

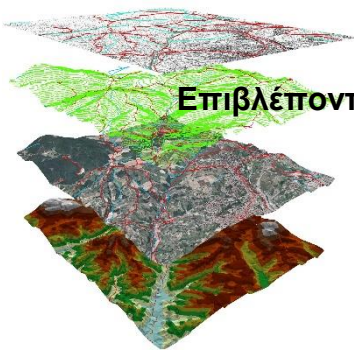


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη αυτόματου εργαλείου
σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών
για την εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων
με στόχο τη βελτιστοποίηση χάραξης αγωγών και τη διευκόλυνση της
ενόργανης παρακολούθησής τους**

Ιωάννα Μίχα



Επιβλέποντες : Μαρίνος Καπτής, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, ΕΔΙΠ/ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη αυτόματου εργαλείου
σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών
για την εκτίμηση του κινδύνου των κατολισθήσεων
με στόχο τη βελτιστοποίηση χάραξης αγωγών και τη διευκόλυνση της
ενόργανης παρακολούθησής τους**

Ιωάννα Μίχα

Επιβλέποντες : Μαρίνος Κατής Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, ΕΔΙΠ/ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Αθήνα Μάρτιος 2017

Copyright © Ιωάννα Χ. Μίχα, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στους γονείς μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γεγονός πως οι αγωγοί αποτελούν το βασικό μεταφορικό μέσο ενεργειακών αποθεμάτων. Τις επόμενες δεκαετίες αναμένεται να κατασκευαστούν παγκοσμίως πολλές χιλιάδες χιλιομέτρων αγωγών. Η επέκτασή τους σε νέες περιοχές εισάγει νέες συνιστώσες στις απαιτούμενες μελέτες χάραξης των αγωγών, όπως για παράδειγμα ο παράγοντας των γεωκινδύνων, ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με μεγαλύτερη βαρύτητα. Ένας από τους πιο σημαντικούς γεωκινδύνους είναι οι κατολισθήσεις σε εδαφικά ή βραχώδη πρηνή κατά μήκος του αγωγού. Ο έλεγχος ύπαρξης περιοχών επιρρεπών σε κατολισθήσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί πλέον ερμηνεύοντας πολυεπίπεδους πληροφοριακά χάρτες σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε λογισμικό για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας εδαφικών πρηνών (τόσο υπό στατικές, όσο και υπό σεισμικές συνθήκες), καθώς και αυτόματο εργαλείο εκτίμησης του κινδύνου των κατολισθήσεων το οποίο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Το εργαλείο επεξεργάζεται πληροφορία από πολυεπίπεδους χάρτες και τα αποτελέσματα του προαναφερθέντος λογισμικού και εξάγει χάρτες ευστάθειας πρηνών. Η σύνδεση του εργαλείου με τον λογισμικό ήταν επιτυχής μετά από έλεγχο και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων από πραγματικό περιστατικό χάραξης αγωγού φυσικού αερίου.

ABSTRACT

"Development of an automatic GIS-based tool for the assessment of landslide hazard in order to optimize the routing of oil and gas pipelines and facilitate their real-time monitoring"

It is a fact that pipelines are the main means of transportation for energy reserves. During the next few decades the construction of several thousand kilometers of pipelines is expected in a worldwide scale. Their expansion in new territories introduces new aspects in their design process, such as the geohazards that should be taken seriously into account. One of the most important geohazards is the landsliding of slopes along the pipeline routing. Checking for areas prone to landslides is a process that can be performed by interpreting maps with multilevel information in Geographic Information Systems (GIS).

During the performance of this thesis (a) a software for the calculation of slope's Safety Factor (under static and seismic conditions) and (b) an automatic tool in GIS environment have been developed. The tool acquire information from multilevel maps and the aforementioned software, and displays its results in slope stability maps. The connection of the tool with the software was successful after verification and confirmation of the results from an actual incident of routing of a gas pipeline.


ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ



Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την πολύτιμη βοήθειά τους, θα ήταν δύσκολη η ολοκλήρωσή της.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά τους κ. κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο και Μαρίνο Καττή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν με την ανάθεση αυτής της εξαιρετικά ενδιαφέρουσας και πρωτότυπης διπλωματικής εργασίας καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή τους σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη της καθώς και τους φίλους και συμφοιτητές με τους οποίους δουλέψαμε και ζήσαμε μαζί αυτά τα μοναδικά χρόνια. Τέλος ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στους Γιώργο Δημόπουλο και Παναγιώτα Καλλιακούδη καθώς με την μοναδική βοήθεια που μου πρόσφεραν έγινε δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1. ΑΓΩΓΟΙ : ΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ.....	16
1.2. ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	19
1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ.....	22
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
2.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΞΗΣ	23
2.2.1. Χάραξη διαδρομής: Η βάση για το σχεδιασμό ενός αγωγού.....	23
2.2.2. Επιλογή διαδρομής στα κύρια στάδια του έργου	24
2.2.3. Ανάλυση σταδίων υλοποίησης του έργου.....	27
2.3. ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΓΩΓΩΝ	30
2.3.1. Η σημασία της πληροφορίας για την αποφυγή και διαχείριση των γεωκινδύνων ...	33
2.3.2. Παρακολούθηση γεωκινδύνων	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ.....	40
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	40
3.2. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΣΓΠ	42
3.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	43
3.4. ΡΟΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ Σ.Γ.Π.....	46
3.5. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ.....	48
3.6. ΦΥΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	51
3.7. ΠΗΓΕΣ ΧΩΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	52
3.8. ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Σ.Γ.Π.....	54
3.9. ArcGIS Desktop.....	55
3.9.1. ArcMAP 	55

3.9.2. ArcCatalog 	56
3.9.3. ArcToolbox	59
3.9.4. ModelBuilder	60
3.9.5. Python Toolbox 	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	66
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	66
4.2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	67
4.2.1. Κατολισθήσεις	67
4.2.2. Παράγοντες που προκαλούν κατολισθήσεις	79
4.2.3. Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών	83
4.2.4. Μέθοδος Bishop	90
4.3. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	94
4.3.1. Τύποι σεισμικών κατολισθήσεων	94
4.3.2. Πραγματικά σεισμικά κατολισθητικά φαινόμενα	96
4.3.3. Μέθοδοι ευστάθειας πρανών υπό δυναμικές συνθήκες	97
4.3.4. Μέθοδος Bishop με δυναμική φόρτιση	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΤΟ Σ.Γ.Π.	104
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	104
5.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SLOPE.EXE	105
5.2.1. Προδιαγραφές και δυνατότητες του λογισμικού	105
5.2.2. Απαιτήσεις λογισμικού	106
5.2.3. Τεχνολογία	108
5.2.4. Παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας της εφαρμογής	109
5.2.5. Επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του λογισμικού	116
5.2.6. Εφαρμογές για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων	119
5.2.7. Τροποποίηση λογισμικού	123

5.3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS.....	123
5.3.1. Πρώτη φάση (<i>ExportSoilDataTABLE</i>).....	124
5.3.2. Δεύτερη φάση (<i>SlopeStabilityMap</i>).....	130
5.3.3. Εφαρμογή του εργαλείου στη περιοχή της Θεσπρωτίας.....	132
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	140
6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	140
6.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	141

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Είδη αγωγών: (α) στην επιφάνεια του εδάφους, (β) υπόγειοι, (γ) υποθαλάσσιοι..	17
Εικόνα 1.2. Αριστερά απεικονίζεται το δίκτυο αγωγών της Ευρώπης, (Pipeline Technology Journal, 2013), ενώ δεξιά παρουσιάζεται ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης, (European Seismological Commission).....	18
Εικόνα 2.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή χάραξης ενός αγωγού, (Rizkalla, 2008)	22
Εικόνα 2.2. Τυπικά στάδια μελέτης και κατασκευής αγωγού και η αντίστοιχη μείωση του πλάτους του «διαδρόμου» (www.iploca.com).....	26
Εικόνα 2.3. Οι βασικοί γεωκίνδυνοι λόγω σεισμού : ενεργό ρήγμα, ρευστοποίηση και αστάθεια πρανών.....	33
Εικόνα 2.4. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM) , (www.bgs.ac.uk).....	34
Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση της σχέσης των όρων Δεδομένα, Πληροφορία και Γνώση (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας, 2004).....	42
Εικόνα 3.2. Σχηματική αναπαράσταση όπου παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά ενός Σ.Γ.Π, το υπολογιστικό σύστημα αποτελούμενο από το hardware και το software, τα δεδομένα και το ανθρώπινο δυναμικό. (www.geography.hunter.cuny.edu).....	43
Εικόνα 3.3. Πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών από περιβάλλον ArcGIS 10.2.2, όπου φαίνονται οι βασικές έννοιες του σχεσιακού μοντέλου δεδομένων.....	45
Εικόνα 3.4. Σχηματική μορφή των εργασιών σε ένα Σ.Γ.Π (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας, 2004)	46
Εικόνα 3.5. Διαφορά αναπαράστασης του πραγματικού κόσμου από μία διανυσματική (vector) δομή σε μία κανονικοποιημένη ή ψηφιδωτή (raster) δομή. (www.geography.hunter.cuny.edu).....	48
Εικόνα 3.6. Αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας με διανυσματική (vector) δομή δεδομένων, (www.geography.hunter.cuny.edu).....	49
Εικόνα 3.7. Αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας με κανονικοποιημένη ή ψηφιδωτή (raster) δομή δεδομένων, (www.geography.hunter.cuny.edu)	50
Εικόνα 3.8. Παραδείγματα αμετάβλητων τοπολογικών σχέσεων (Molenaar, 1995)	51
Εικόνα 3.9. Πηγές δεδομένων για τα Σ.Γ.Π, (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας, 2004) .	53
Εικόνα 3.10. Οργάνωση των δεδομένων σε θεματικά επίπεδα, (www.seos-project.eu)	54
Εικόνα 3.11. Περιβάλλον εφαρμογής ArcMAP του ArcGIS Desktop 10.2.2	56

Εικόνα 3.12. Περιβάλλον εφαρμογής ArcCatalog του ArcGIS Desktop 10.2.2.....	57	
Εικόνα 3.13. Πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών (Attribute Table) γεωλογικών πολυγώνων	58	
Εικόνα 3.14. Python Window ενσωματωμένο στο ArcMAP 10.2.2	61	
Εικόνα 3.15. Κειμενογράφος Python IDLE (GUI) του ArcGIS Desktop 10.2.2.....	62	
Εικόνα 3.16. Έτοιμη δομή κώδικα ενός Python Toolbox σε IDLE κειμενογράφο.....	64	
Εικόνα 4.1.α: Φυσικό Πρανές	Εικόνα 4.1.β : Τεχνητό πρανές, Επίχωμα οδοποιίας.....	66
Εικόνα 4.2.. Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων: Κάτοψη μιας τυπικής κατολίσθησης, στην οποία η κόκκινη γραμμή δείχνει το ίχνος της επιφάνειας αστοχίας στην αρχική επιφάνεια εδάφους. Οι αριθμοί αναφέρονται στον πίνακα. (IAEG Commission of Landslides, 1990).....	68	
Εικόνα 4.3. Επτά διαφορετικοί τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα ανάλογα με τη κίνηση (Varnes, 1978)	72	
Εικόνα 4.4. Κατολίσθηση στο Χαροκόπι Ιωαννίνων, (Δεκέμβριος 2005)	74	
Εικόνα 4.5. Περιπτώσεις περιστροφικής ολίσθησης,	75	
Εικόνα 4.6. Περιστροφική ολίσθηση που συνέβη στο Moorabool της Αυστραλίας, (Νοέμβρης 2001)	76	
Εικόνα 4.7. Τυπικά μέρη μιας περιστροφικής ολίσθησης σύμφωνα με τον IAEG, (www.usgs.gov)	76	
Εικόνα 4.8 . Κατολίσθηση Lemieux, Ottawa Καναδά 1993, (www.ottawagatineaugeoheritage.ca)	78	
Εικόνα 4.9. Συνήθεις γεωμετρίες επιφανειών αστοχίας	84	
Εικόνα 4.10. Η Μέθοδος των λωρίδων.....	85	
Εικόνα 4.11. Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση.....	86	
Εικόνα 4.12. Μέθοδος της σφήνας.....	88	
Εικόνα 4.13. Προσομοίωση πρανούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	89	
Εικόνα 4.14. Μέθοδο λωρίδων Bishop,	92	
Εικόνα 4.15. Δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μία λωρίδα σύμφωνα με τη μέθοδο Bishop....	93	
Εικόνα 4.16. Κατολίσθηση Las Colinas, 2001	96	
Εικόνα 4.17 Κατολίσθηση Nikawa, Ιαπωνία, 1995	97	
Εικόνα 4.18. Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδας, Ζώνη I : $\alpha_h = 0,16g$, Ζώνη II : $\alpha_h = 0,24g$, Ζώνη III : $\alpha_h = 0,36g$,	99	
Εικόνα 4.19. Δυνάμεις που δρουν σε ένα τριγωνικό πρίσμα εδάφους, πάνω από την επιφάνεια αστοχίας.....	100	

Εικόνα 4.20. Στατικές και ψευδοστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στη λωρίδα σύμφωνα με τη μέθοδο Bishop.....	102
Εικόνα 5.1. Διάγραμμα ροής εργασιών, που υποδεικνύει την λειτουργία του εργαλείου.....	105
Εικόνα 5.2. Λειτουργία Compiler της C++, (www.ebooks4greeks.gr).....	109
Εικόνα 5.3. Μεταβαλλόμενη γεωμετρία του σχήματος εξαιτίας της εξέτασης όλων των πιθανών επιφανειών αστοχίας.....	111
Εικόνα 5.4. Περίπτωση 1 : η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται μέσα στο πρανές	112
Εικόνα 5.5. Περίπτωση 2. Η επιφάνεια ολίσθησης ξεκινά μέσα από το πρανές και καταλήγει στη βάση.....	112
Εικόνα 5.6. Περίπτωση 3. Η επιφάνεια ολίσθησης ξεκινά από την κορυφή και καταλήγει μέσα στο πρανές	113
Εικόνα 5.7. Περίπτωση 4. Η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται σε όλο το πρανές	113
Εικόνα 5.8. Υπόθεση υδροφόρου ορίζοντα	114
Εικόνα 5.9. Διάγραμμα ροής δεδομένων του αλγορίθμου του slope.exe	115
Εικόνα 5.10. Εφαρμογή 1 ^η , (slope.exe).....	116
Εικόνα 5.11 . Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 1	117
Εικόνα 5.12. Εφαρμογή 2 ^η , (slope.exe).....	117
Εικόνα 5.13. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 2	118
Εικόνα 5.14. Εφαρμογή 3 ^η , (slope.exe).....	118
Εικόνα 5.15. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 3	119
Εικόνα 5.16. Εφαρμογή 1 ^η , (slope.exe).....	120
Εικόνα 5.17. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 1	120
Εικόνα 5.18. Εφαρμογή 2 ^η , (slope.exe).....	121
Εικόνα 5.19. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 2	121
Εικόνα 5.20. Εφαρμογή 3 ^η , (slope.exe).....	122
Εικόνα 5.21. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 3	122
Εικόνα 5.22. Παράθυρο εργαλείου ExportSoilDataTABLE, (ArcGIS 10.2.2 , 2017)	125
Εικόνα 5.23. Μορφή πίνακα excel όπως προκύπτει μετά το τρέξιμο του ExportSoilDataToTABLE,.....	125
Εικόνα 5.24. Παράδειγμα υπολογισμού κλίσης από το εργαλείο Slope (Spatial Analyst), (Help, ArcGIS 10.2.2)	126
Εικόνα 5.25. Παράδειγμα χρήσης του εργαλείου Int (Spatial Analyst) , (Help, ArcGIS 10.2.2)	127
Εικόνα 5.26. Παράδειγμα χρήσης του εργαλείου Intersect(Analysis), (Help,ArcGIS 10.2.2) .	127

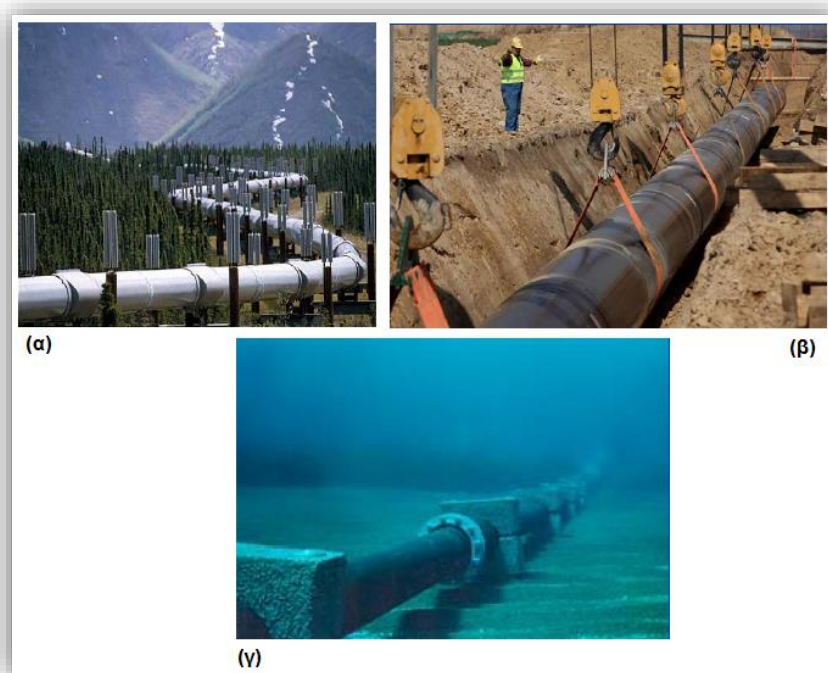
Εικόνα 5.27. Παράδειγμα χρήσης του εργαλείου Dissolve (Data Management), (Help, ArcGIS 10.2.2)	128
Εικόνα 5.28. Διάγραμμα ροής εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του εργαλείου ExportSoilDataToTABLE,.....	129
Εικόνα 5.29. Παράθυρο εργαλείου SlopeStabilityMap, (ArcGIS 10.2.2 , 2017).....	131
Εικόνα 5.30. Διάγραμμα ροής εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του εργαλείου SlopeStabilityMap	132
Εικόνα 5.31. Περιοχή εφαρμογής στη Θεσπρωτία, (Google Maps)	133
Εικόνα 5.32. Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους περιοχής, (ArcGIS 10.2.2).....	134
Εικόνα 5.33. Εδαφολογικά πολύγωνα της περιοχής, (ArcGIS 10.2.2)	135
Εικόνα 5.34. Χάρτης Ευστάθειας Πρανών υπό Στατικές Συνθήκες στην περιοχή της Θεσπρωτίας, όπως υπολογίστηκε από το ημιαυτόματο εργαλείο	137
Εικόνα 5.35. . Χάρτης Ευστάθειας Πρανών υπό Σεισμικές Συνθήκες στην περιοχή της Θεσπρωτίας, όπως υπολογίστηκε από το ημιαυτόματο εργαλείο	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΑΓΩΓΟΙ : ΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ

Οι αγωγοί είναι κατασκευές μεγάλου μήκους, μέσω των οποίων μεταφέρονται υγρά ή αέρια ενεργειακά αποθέματα (όπως ακατέργαστο πετρέλαιο και παράγωγά του, φυσικό αέριο, διοξείδιο του άνθρακα, ατμός). Παρότι υπάρχουν πολλοί τρόποι μεταφοράς των διάφορων ενεργειακών αποθεμάτων (φορτηγά, τρένα, πλοία), οι αγωγοί χαρακτηρίζονται ως τα πιο ασφαλή και αποτελεσματικά μέσα μεταφοράς τους από τις πηγές παραγωγής στα διυλιστήρια και στις μονάδες επεξεργασίας, και στη συνέχεια στους καταναλωτές.

Αποτελούν ένα αναντικατάστατο μέσο μεταφοράς ενεργειακών αποθεμάτων σε όλο τον κόσμο από τα οποία τροφοδοτούνται δισεκατομμύρια καταναλωτών. Σε στοιχεία του έτους 2014 καταγράφονται ελαφρώς λιγότερα από 3,5 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών υπό λειτουργία, διασκορπισμένα σε 120 χώρες του κόσμου, όπου η μεγαλύτερη πλειοψηφία του παγκόσμιου αριθμού τους (75%) να συγκεντρώνεται σε τρεις χώρες : Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (65%), Ρωσία (8%) και Καναδάς (3%). Επίσης, πρόσφατη παγκόσμια έρευνα έδειξε ότι 161,118 χιλιόμετρα αγωγών βρίσκονται ακόμη υπό σχεδιασμό ή κατασκευή. (*Pipeline Gas Journal, 2015*).



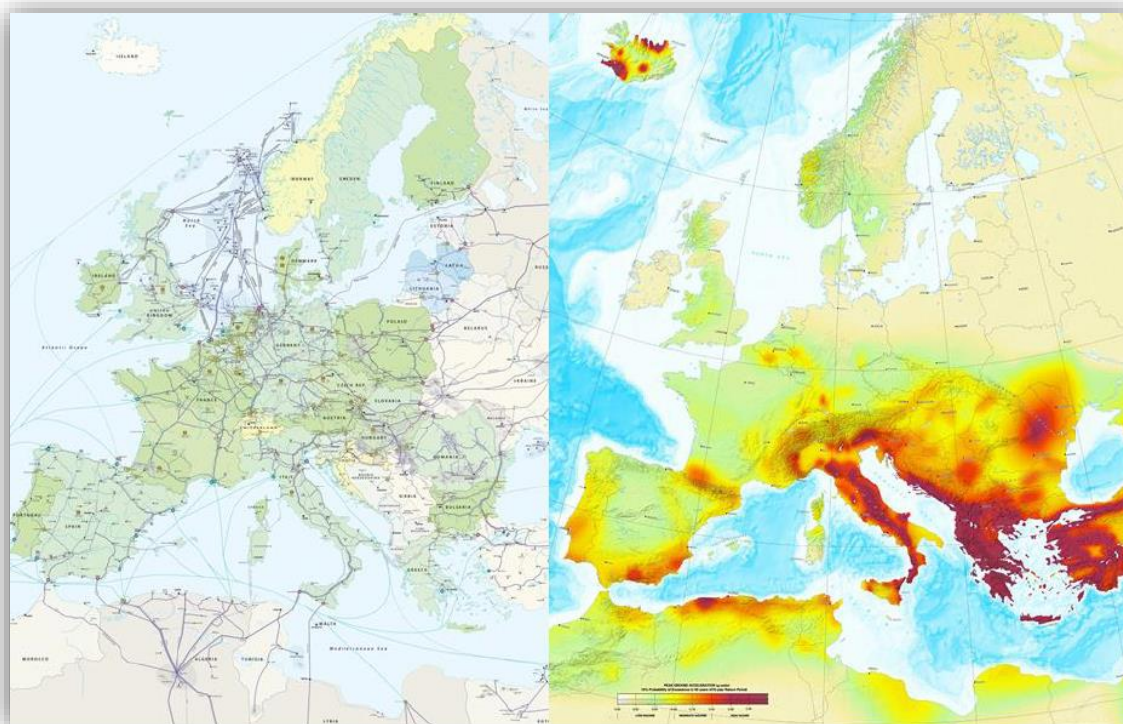
Εικόνα 1.1. Είδη αγωγών: (α) στην επιφάνεια του εδάφους, (β) υπόγειοι, (γ) υποθαλάσσιοι

Τα διεθνή έργα κατασκευής αγωγών πολλές φορές μπορεί να αποτελούν πρόκληση για τους εμπλεκόμενους μηχανικούς. Οι προκλήσεις αυτές είναι απόρροια της εγγενούς αλληλεπίδρασης του αγωγού με τη γήινη επιφάνεια και με τις κοινότητες των ανθρώπων που ζουν και εργάζονται κοντά στις εγκαταστάσεις του. Η πιθανότητα ενός καταστροφικού φαινομένου λόγω της ευφλεκτότητας των υλικών που μεταφέρει είναι πάντα μεγάλη. Μια πρόσφατα μεγάλη καταστροφή από έκρηξη σε αγωγό φυσικού αερίου της πετρελαϊκής εταιρίας *Petronas* πλησίον της πόλης *Lawas* της Μαλαισίας, που συνέβη τον Ιούνιο του 2014, επιβεβαιώνει την πιθανότητα αυτή. Η έκρηξη δεν οδήγησε σε απώλεια ανθρώπινων ζωών, λόγω της μεγάλης απόστασης της πόλης από τον αγωγό και της έγκαιρης εκκένωσης των πιο κοντινών οικισμών, αλλά είχε σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο στην περιοχή. Τέτοιου είδους μεγάλα ατυχήματα παρατηρούνται σε σημεία όπου υπάρχουν παρεμβάσεις από τρίτους ή σε σημεία όπου ο αγωγός έχει υποστεί ρήξη.

Η άμεση επαφή του αγωγού με τη γήινη επιφάνεια τον καθιστά επιρρεπή σε γεωκινδύνους και σε εδαφικές αστοχίες, όπως για παράδειγμα σε πιθανή ενεργοποίηση κατολισθήσεων (τόσο υπό στατικές συνθήκες όσο και κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος), σε περιοχές κατά μήκος του αγωγού.

Τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της επέκτασης των αγωγών σε τέτοιες επικίνδυνες περιοχές, έχουν αρχίσει να γίνονται κάποιες ενέργειες για την αποφυγή των γεωκινδύνων αυτών κατά το στάδιο της επιλογής της χάραξης του αγωγού, αλλά δεν είναι αρκετές. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι μέχρι σήμερα οι περισσότερες κατασκευές συστημάτων αγωγών έχουν πραγματοποιηθεί σε περιοχές όπου οι γεωκίνδυνοι δεν ήταν ιδιαίτερα κρίσιμοι, λόγω τοπογραφικής και γεωλογικής ομαλότητας στις περιοχές αυτές.

Στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης για παράδειγμα, μέχρι σήμερα η πλειοψηφία των αγωγών είναι εγκαταστημένη στις Βόρειες χώρες της Ηπείρου όπου οι εδαφικές αστοχίες και τα σεισμικά γεγονότα δεν αποτελούν ιδιαίτερο κίνδυνο (Εικόνα 1.2). Η προσπάθεια επέκτασης των αγωγών όμως σε Νότιες χώρες και κυρίως στα Βαλκάνια καθιστά τους γεωκινδύνους αυτούς σημαντικό παράγοντα στο στάδιο επιλογής της κατάλληλης χάραξης των αγωγών.



Εικόνα 1.2. Αριστερά απεικονίζεται το δίκτυο αγωγών της Ευρώπης, (*Pipeline Technology Journal*, 2013), ενώ δεξιά παρουσιάζεται ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης, (*European Seismological Commission*).

Καταλήγοντας λοιπόν, η επέκταση των διαδρομών των αγωγών σε περιοχές ενδεχόμενης εδαφικής αστάθειας και έντονης σεισμικότητας, δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης νέων εργαλείων για την υπόδειξη των επικίνδυνων αυτών περιοχών στα στάδια της χάραξης αγωγών και την πρόβλεψη πιθανών εδαφικών και δομικών αστοχιών μετέπειτα στη φάση της λειτουργίας τους.

1.2. ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός νέου εργαλείου για τη λήψη αποφάσεων στο στάδιο της μελέτης χάραξης ενός αγωγού, εστιάζοντας στην αποφυγή περιοχών επιρρεπών σε κατολισθητικά φαινόμενα. Το εργαλείο αυτό αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), και συνδέθηκε με εξωτερικό λογισμικό υπολογισμού ευστάθειας πρανών υπό στατικές και υπό σεισμικές συνθήκες, το οποίο αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στόχο αυτής της προσπάθειας αποτέλεσε η ανάδειξη του προβλήματος των κατολισθήσεων σε σεισμικές περιοχές όπως ο Ελλαδικός χώρος, και η σημασία που πρέπει να δίνεται στις μελέτες χάραξης αγωγών μεγάλου μήκους στις περιοχές αυτές. Συνδυάζοντας διαφορετικές πτυχές της πληροφορικής, τις δυνατότητες που παρέχουν τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και την ευκολία στην πρόσβαση της πληροφορίας που δίνουν οι νέες τεχνολογίες, δορυφόροι, συστήματα *LiDAR*, αεροφωτογραφίες, δημιουργήθηκε το συγκεκριμένο ημιαυτόματο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να παίρνει αποφάσεις για την επικινδυνότητα των πρανών με στόχο να διευκολύνει το έργο των μηχανικών. Επιπλέον η ανάπτυξη του εργαλείου έχει γίνει με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπει μελλοντική αναβάθμισή του, με απώτερο σκοπό την ενόργανη παρακολούθηση των ασταθών πρανών σε πραγματικό χρόνο.

1.3. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια της χάραξης ενός αγωγού μεγάλου μήκους και δίνεται έμφαση στον γεωκινδύνους που επηρεάζουν την τελική επιλογή της διαδρομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και στον τρόπο που αυτά διαχειρίζονται πολυεπίπεδες πληροφορίες. Παρουσιάζεται επίσης το περιβάλλον *ArcGIS* που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διάφοροι μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρηνών υπό στατικές και δυναμικές συνθήκες, και αναλύεται σε βάθος η μέθοδος *Bishop(1955)*.

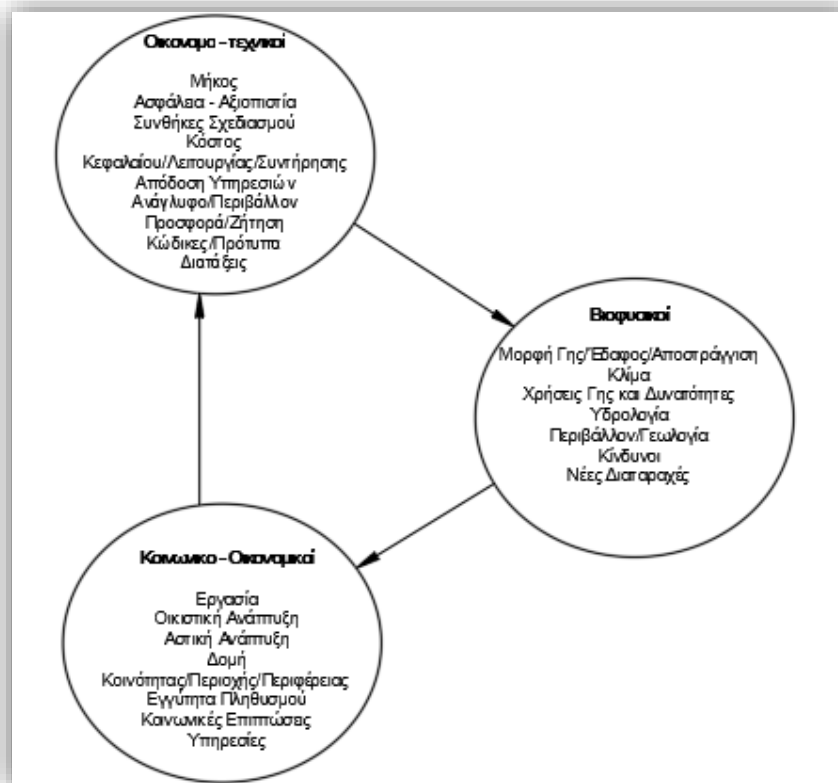
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται το λογισμικό και το εργαλείο που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας των πρηνών και την παρουσίαση του σε χάρτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται συμπεράσματα και προεκτάσεις που προέκυψαν από την ανάπτυξη του εργαλείου του κεφαλαίου 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιλογή της κατάλληλης χάραξης για έναν αγωγό μεγάλου μήκους είναι μια πολυεπίπεδη και μακροχρόνια διαδικασία καθώς υπάρχουν πολλοί φορείς και παράγοντες που εμπλέκονται και την καθορίζουν. Κάθε εναλλακτική διαδρομή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά ανάλογα με τη φύση και την συμπεριφορά των παραγόντων που την επηρεάζουν. Σε όλη τη διαδικασία επιλογής κατάλληλης χάραξης, τα χαρακτηριστικά της κάθε διαδρομής αποτελούν έναν συνδυασμό επιρροών μηχανικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικοοικονομικών και πολιτικών παραγόντων. (Εικόνα 2.1)



Εικόνα 2.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή χάραξης ενός αγωγού, (Rizkalla, 2008)

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στους γεωτεχνικούς παράγοντες και πιο συγκεκριμένα στους γεωκινδύνους, και πως αυτοί επηρεάζουν την τελική επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού, καθώς και την μετέπειτα λειτουργία του.

2.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΧΑΡΑΞΗΣ

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία της επιλογής χάραξης όπως προτείνεται από την Διεθνή Ένωση *IPLOCA (International Pipe Line & Offshore Contractors Association)*. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια τυπική προσέγγιση χάραξης της διαδρομής ενός αγωγού μεταξύ ενός σημείου έναρξης και πολλαπλών σημείων πέρατος, χωρίς να αποκλείεται η διέλευση της από ενδιάμεσα σημεία παροχής του μεταφερόμενου προϊόντος. Μια περιγραφή που θα καλύπτει όλα τα πιθανά ενδεχόμενα μίας προς χάραξη διαδρομής είναι αδύνατη, καθώς όπως ήδη ειπώθηκε παραπάνω κάθε διαδρομή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά λόγω των διαφορετικών παραγόντων της κάθε περιοχής μελέτης, όπως οι εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες, οι χρήσεις γης, οι υπάρχουσες υποδομές, το περιβάλλον, οι αρχαιολογικές περιοχές και τέλος, οι τοπικοί κανονισμοί και οι απαραίτητες άδειες. Επιπλέον, κάθε φάση της διαδικασίας θα εξαρτάται από το χρονοδιάγραμμα του προς υλοποίηση έργου. Είναι απόλυτα θεμιτό να ολοκληρωθεί και να εγκριθεί η τελική διαδρομή στη φάση του σχεδιασμού, όμως τα υπόλοιπα έργα δε μπορούν να υλοποιηθούν μέχρι τη φάση υλοποίησης του έργου (λεπτομερής σχεδιασμός).

Η τελική χάραξη της διαδρομής ενός αγωγού, που συνδέει το σημείο έναρξης με τα ενδιάμεσα σημεία παροχής και τέλος με το σημείο πέρατος θα πρέπει να είναι:

- Ασφαλής
- Περιβαλλοντολογικά αποδεκτή
- Οικονομική
- Πρακτική και υλοποιήσιμη

2.2.1. Χάραξη διαδρομής: Η βάση για το σχεδιασμό ενός αγωγού

Η διαδρομή του αγωγού αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι των απαιτούμενων πληροφοριών από τις οποίες εξαρτάται ο σχεδιασμός του αγωγού. Είναι αυτή που θα καθορίσει το μέγεθος του αγωγού, τη γεωμορφολογία, το έδαφος και τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός ο οποίος βασίζεται σε προεπιλεγμένα κριτήρια, αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι στην εκτέλεση

ενός τεχνικού έργου μεγάλου μήκους. Για να καταστεί δυνατή η επίτευξη της καλύτερης χάραξης και η βελτιστοποίηση των συνιστωσών της (συγκεκριμένα των φάσεων της), θα πρέπει να μελετηθούν με τη παρακάτω σειρά:

- Ορισμός εύρους διαδρομής (*corridor*)
- Δημιουργία διαδρομής (*route*)
- Χάραξη (*alignment*)
- Επιλογή κατασκευαστικής γραμμής (*construction line selection*)

2.2.2. Επιλογή διαδρομής στα κύρια στάδια του έργου

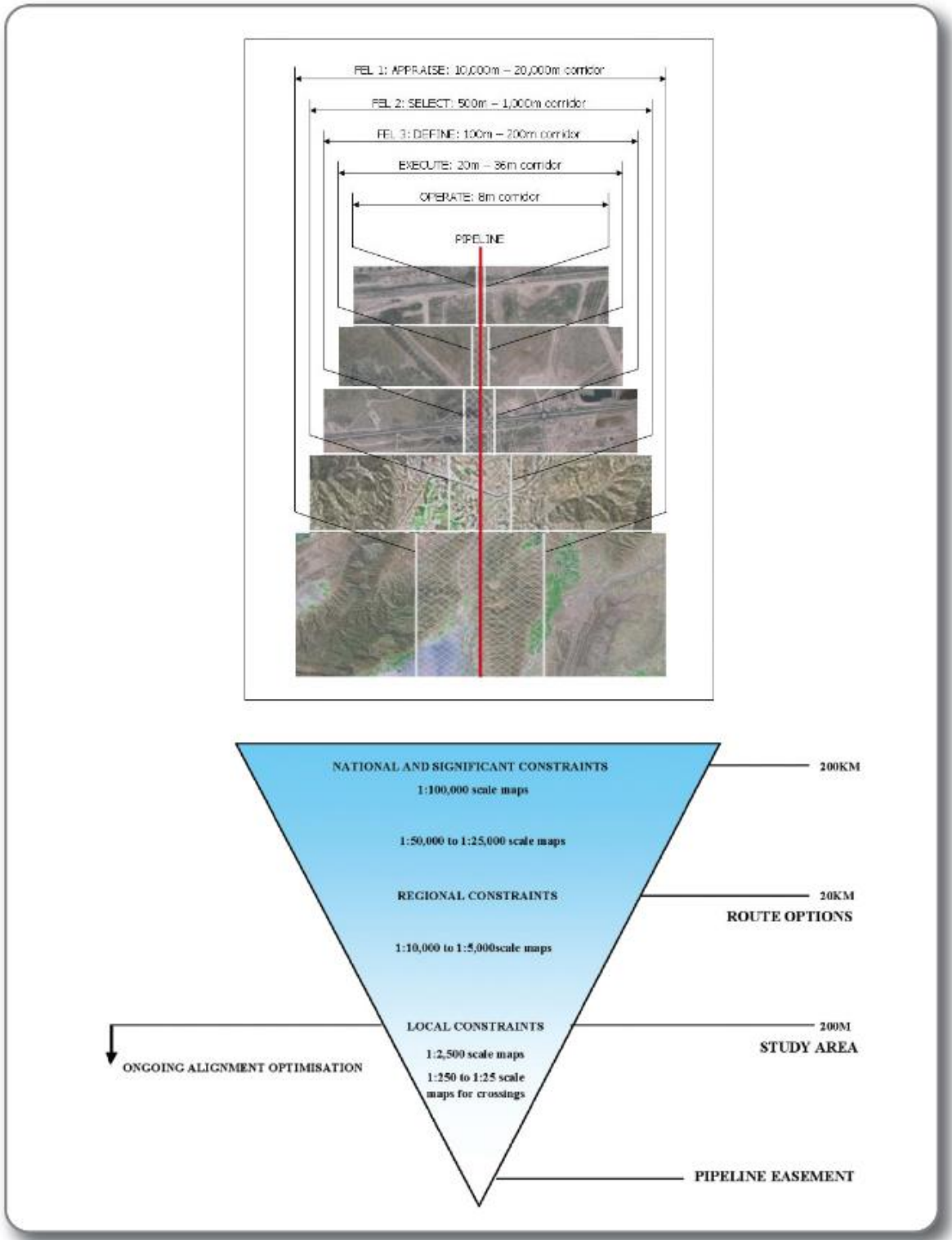
Η διαδικασία επιλογής διαδρομής του αγωγού αρχίζει με τον καθορισμό μιας ευρείας περιοχής αναζήτησης μεταξύ των καθορισμένων σημείων έναρξης και λήξης. Η περιοχή αυτή αποτελεί έναν διάδρομο του αγωγού (*corridor*). Μετά τον καθορισμό της αρχίζει να «φιλτράρεται» λαμβάνοντας υπόψη τη δημόσια ασφάλεια, τους γεωκινδύνους, την ακεραιότητα του αγωγού, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τις συνέπειες διαρροής του μεταφερόμενου προϊόντος και κοινωνικοοικονομικά, τεχνικά, κατασκευαστικά, ιδιοκτησιακά και κοστολογικά κριτήρια.

Η επιλογή της τελικής διαδρομής ενός αγωγού είναι μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία ξεκινά από διαδρομές μεγάλου πλάτους, οι οποίες στενεύουν όσο εξελίσσονται τα στάδια του έργου και κατά συνέπεια και οι περιορισμοί από τους διάφορους παράγοντες που τις καθορίζουν, μέχρι την τελική διαδρομή *ROW (Right Of Way)*. Οι αρχικές διαδρομές μπορούν να έχουν πλάτος μεγαλύτερο των 10 km. Τυπικά τα στάδια επιλογής διαδρομής μπορούν να περιγραφούν όπως στην Εικόνα 2.2 και στον Πίνακα 2.1. Κάθε έργο θα ακολουθεί τη δική του διαδικασία για τον ορισμό και την μείωση του πλάτους των διαδρομών του αγωγού, βασισμένη στο μέγεθος και την τοποθεσία του έργου.

Η επιλογή των αρχικών διαδρομών γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι κύριοι περιορισμοί, και έπειτα συμπεριλαμβάνοντας τις διαβουλεύσεις των ενδιαφερόμενων φορέων, των ιδιοκτητών γης και τα κριτήρια των Μελετών Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, αναθεωρούνται με σκοπό την αποφυγή επιπρόσθετων περιορισμών. Ο στόχος είναι η τελική επιλογή προς κατασκευή μιας οικονομικής και περιβαλλοντικά αποδεκτής διαδρομής.

Πίνακας 2.1. Τυπικά στάδια μελέτης και κατασκευής αγωγού και η αντίστοιχη μείωση του πλάτους του «διαδρόμου» (www.iploca.com)

ΣΤΑΔΙΟ	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ			ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΟΥ(ΕΚΤΕΛΕΣΗ)	ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ)
	FEL 1 ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ (ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ)	FEL2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣ ΕΩΝ (ΕΠΙΛΟΓΗ)	FEL3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΟΥ (ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ)		
Ακρίβεια εκτίμησης κόστους	Τάξη μεγέθους	+/-30%	+/-15%	+/-5%	Ολοκλήρωση
Διαδικασία	Αξιολόγηση	Βιωσιμότητα	Επιλογή καθορισμός	Εγκρίσεις/Εκτέλεση/Κατασκευή	Λειτουργία
Δραστηριότητα	Εξερεύνηση εναλλακτικών «διαδρομών» στο γραφείο	Επιλογή «διαδρόμου» και αναγνώριση εναλλακτικής διαδρομής, επιλογές ευθυγράμμισης	Επιλογή διαδρομής, εξέταση και διαβούλευση, διαπραγματεύσεις	Λεπτομερής ευθυγράμμιση, αδειοδότηση της τελικής διαδρομής και κατασκευαστικής γραμμής, τέλος διαπραγματεύσεων και απόκτηση γης	Συντήρηση
Πλάτος "διαδρόμου"	10km-20km πλάτους «διάδρομος ενδιαφέροντος»	500m-1km πλάτους «διάδρομος» προτιμώμενης διαδρομής (χάρτες μικρής κλίμακας)	100m-200m πλάτους καθορισμένος «διάδρομος» (πιο λεπτομερείς χάρτες)	20m-36m πλάτους «διάδρομος» κατασκευή	8m πλάτους «μόνιμος διάδρομος» για συνεχόμενη εποπτεία και απαιτούμενη συντήρηση
Εικόνες	Χάρτες 1:25000 ή 1:50000 κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με την πολυπλοκότητα του εδάφους	Χάρτες 1:10000 ή 1:25000 κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αεροφωτογραφίες 250mm ή καλύτερες σε υπέρθεση με συντεταγμένες σε κλίμακα 1:10000 μπορούν να παραχθούν και να χρησιμοποιηθούν	Χάρτες κλίμακας 1:2500 μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Χαρτιά ευθυγράμμισης μπορούν να προετοιμαστούν από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:2500. Διασταυρώσεις ειδικού ενδιαφέροντος πρέπει να διευκρινιστούν: τυπική κλίμακα μεταξύ 1:250 και 1:25 αναφορικά με την πολυπλοκότητα	Σχέδια για συμφωνίες με τους γεωκλήμονες πρέπει να βασίζονται σε χάρτες κλίμακας 1:2500 ή μεγαλύτερης.	Ακριβή σχέδια κατασκευής (στην ίδια κλίμακα από τα προερχόμενα σχέδια) πρέπει να δίνονται σε όλους τους εμπλεκόμενους κατά την ολοκλήρωση του έργου. Αυτά τα σχέδια πρέπει να περιέχουν όλες τις λεπτομέρειες.
Παραγόμενα αποτελέσματα	Προκαταρκτικά σχέδια διαδρομής Χάρτες κλίμακας 1:100000	Δρομολόγηση χρησιμοποιώντας χάρτες της διαδρομής κλίμακας 1:50000. Σχέδια αναγνώρισης του πεδίου.	Δρομολόγηση χρησιμοποιώντας χάρτες κλίμακας από 1:5000 έως 1:10000. Απόκτηση γής και απαραίτητα σχέδια. Τελικά σχέδια αποτύπωσης της περιοχής. Χαρτιά ευθυγράμμισης. Σχέδια διασταυρώσεων	Τελικά σχέδια ευθυγράμμισης. Σχέδια για γαιοκτήμονες και έγκριση/αδεια /αποδοχή. Αγορά γης. Λεπτομερή σχέδια διασταυρώσεων.	Σχέδια κατασκευής



Εικόνα 2.2. Τυπικά στάδια μελέτης και κατασκευής αγωγού και η αντίστοιχη μείωση του πλάτους του «διαδρόμου» (www.iploca.com)

2.2.3. Ανάλυση σταδίων υλοποίησης του έργου

Στην υποενότητα αυτή θα αναλυθούν με λεπτομέρεια οι διάφορες διαδικασίες που ακολουθούνται σε κάθε στάδιο υλοποίησης του έργου. Σε κάθε στάδιο, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, εισέρχονται νέοι παράγοντες και περιορισμοί ελαττώνοντας την αρχικά μεγάλη σε πλάτος περιοχή διέλευσης του αγωγού, μέχρι την τελική επιλογή χάραξης.

✓ Στάδιο πρώτο : Εναλλακτικές επιλογές «διαδρόμου» [FEL 1, Appraise]

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τις αρχικές εργασίες γραφείου, κατά τις οποίες επιλέγονται οι αρχικές πιθανές διαδρομές του αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη γνωστές περιβαλλοντικές και πολιτιστικές ευαισθησίες. Οι πληροφορίες για τις εργασίες του πρώτου σταδίου λαμβάνονται από υπάρχοντες τοπογραφικούς και γεωλογικούς χάρτες, αεροφωτογραφίες ή/και δορυφορικές εικόνες, καθώς και από απαραίτητα δημόσια έγγραφα, όπως χωροταξικούς χάρτες. Χρησιμοποιώντας του χάρτες αυτούς, καθορίζονται οι αρχικοί περιορισμοί για τον καθορισμό των πρώτων επιλογών του αρχικού «διαδρόμου» (*corridor*).

✓ Στάδιο δεύτερο: Επιλογή αρχικού «διαδρόμου» [FEL 2, Select]

Στο δεύτερο στάδιο, επιλέγεται ο αρχικός «διάδρομος» από τις διαφορετικές επιλογές του πρώτου σταδίου, διασφαλίζοντας ότι ο «διάδρομος» αυτός είναι ο πλέον κατάλληλος και δεν πρόκειται να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα σε μεταγενέστερα στάδια. Η μελέτη γραφείου και η ποιοτική εκτίμηση μέσω εικόνων και χαρτών, κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών στο πλαίσιο του δημόσιου τομέα, θα πρέπει να προηγηθεί της υιοθέτησης μιας προσωρινής διαδρομής εντός του επιλεχθέντος «διαδρόμου». Πριν από τις συζητήσεις με τους αρμόδιους φορείς, πρέπει να συλλεχθούν, σε πρώτη φάση, από ήδη υπάρχουσες δημοσιευμένες πηγές, πληροφορίες που αφορούν τα γεωλογικά, αρχαιολογικά και περιβαλλοντολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που μελετάται.

Τα γεωγραφικά όρια της περιοχής στην οποία πρόκειται να χαραχθεί η διαδρομή του αγωγού, καθορίζονται με την αναγνώριση και σταθεροποίηση των σημείων έναρξης και των ενδιάμεσων σημείων. Τα σημεία αυτά θα πρέπει να επισημαίνονται σε σχέδια της περιοχής υπό κατάλληλη κλίμακα. Έπειτα η διαδρομή ενδιαφέροντος, πρέπει να εξερευνηθεί από κοντά κατά τη διαδρομή που ορίζουν τα προαναφερθέντα σταθερά σημεία, έτσι ώστε να αποτυπωθούν και να αξιολογηθούν τα βασικά θέματα και οι περιορισμοί που ενδέχεται να επηρεάσουν την αρχική χάραξη της διαδρομής. Το πλάτος του διαδρόμου θα εξαρτηθεί από το φυσικό ανάγλυφο της περιοχής που διερευνήθηκε, τις παροντικές και μελλοντικές ροές πληθυσμού

και την αναμενόμενη πολυπλοκότητα, όπως αυτή διαμορφώνεται από τις περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές και κατασκευαστικές συνιστώσες της. Επιπλέον, όπου αυτό κριθεί εφικτό, ο «διάδρομος» πρέπει να επιλεγεί ώστε να αποφεύγει τις αστικές περιοχές, το κύριο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, τις θαλάσσιες διαβάσεις και τις περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.

Πρέπει να αναγνωρίζονται οι υπάρχοντες και προς σχεδίαση περιορισμοί εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, ώστε να διευκολύνουν τη ρύθμιση της επιλεγείσας διαδρομής. Οι περιορισμοί αυτοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την πολυπλοκότητα της γεωμορφολογίας και των πληροφοριών που συγκεντρώθηκαν. Τα βασικά εμπόδια και οι περιορισμοί θα πρέπει να αποφεύγονται όσο το δυνατόν γίνεται. Έπειτα, επιλέγεται μια προτιμώμενη διαδρομή, βάσει τεχνικών, περιβαλλοντικών και σχετικών με την ασφάλεια παραγόντων, οι οποίοι ενδέχεται να αποδειχθούν σημαντικοί και κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος του αγωγού. Η επιλογή της διαδρομής θα πρέπει να ακολουθεί μια συγκριτική μελέτη.

Για την καλύτερη καταγραφή και διαχείριση των δεδομένων που συλλέγονται στο στάδιο αυτό, συνιστάται η χρήση ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), για την ολοκλήρωση των διαδικασιών του σταδίου σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

✓ Στάδιο τρίτο : Διερεύνηση και διαβούλευση διαδρομής [FEL 3, Define, FEED]

Σε αυτό το στάδιο συγκεντρώνονται περισσότερο λεπτομερείς πληροφορίες, για να τονιστούν και να χαρτογραφηθούν οι περιορισμοί μέσα στον επιλεγμένο διάδρομο, με σκοπό τη βοήθεια για την επιλογή της τελικής προτιμώμενης διαδρομής. Αυτό επιτρέπει στο έργο να μεταβεί στο επόμενο στάδιο των διαπραγματεύσεων. Πλέον, όλοι οι περιορισμοί και τα προβλήματα σχεδιασμού που μπορεί να επηρεάσουν τον αγωγό πρέπει να αντιμετωπίζονται και να καταγράφονται. Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας, πρέπει να καταρτιστεί ένα σχέδιο διαχείρισης της κυκλοφορίας του μεταφερόμενου προϊόντος.

Έπειτα προτείνεται η εφαρμογή μιας ποσοτικής εκτίμησης QRA (*Quantitative Risk Assessment*), η οποία διευκολύνει τη σύγκριση των εναλλακτικών διαδρομών, βάσει της πιθανότητας εμφάνισης επικίνδυνων συμβάντων και των αντίστοιχων συνεπειών τους κατά μήκος της κάθε διαδρομής. Απαιτείται η διενέργεια μιας εμπειριστατωμένης εξέτασης της διαδρομής και του περιβάλλοντος στο οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί ο αγωγός. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να πραγματοποιηθούν, μετά από την απόκτηση αδειών από τους ιδιοκτήτες, τοπογραφικές, γεωτεχνικές και εδαφολογικές επιτόπιες έρευνες, οι οποίες θα εκτελούνται από ομάδες αποτελούμενες από μηχανολόγους, τοπογράφους και γεωτεχνικούς

μηχανικούς, αρχαιολόγους, περιβαλλοντολόγους και ανθρωπολόγους. Τα δεδομένα από τις έρευνες αυτές τροφοδοτούν το κομμάτι του σχεδιασμού και της κατασκευής της γραμμής του αγωγού. Σε αυτή τη φάση περιλαμβάνονται οι επισκοπήσεις των απαραίτητων εγκαταστάσεων (υπέργειων και υπόγειων) για το μεταγενέστερο κατασκευαστικό στάδιο, όπως η οδική υποδομή πρόσβασης και οι εγκαταστάσεις διαμονής και κατασκευαστικής προετοιμασίας.

Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει συνεχή επαφή με τις αρμόδιες αρχές και τους ενδιαφερόμενους τρίτους φορείς, έτσι ώστε να λαμβάνονται λεπτομέρειες για οποιαδήποτε γνωστή ή προβλεπόμενη ανάπτυξη ή καταπάτηση κατά μήκος του αγωγού, για τοποθεσίες υπόγειων εμποδίων, υπηρεσιών και δομών, καθώς και για άλλα σχετικά δεδομένα. Οι διαβουλεύσεις με τις σχεδιαστικές και κανονιστικές αρχές (συμπεριλαμβανομένων των τοπικών αρχών σχεδιασμού και τις υπηρεσίες ασφάλειας της κυβέρνησης) και με οποιεσδήποτε άλλες κατάλληλες οργανώσεις και πρόσωπα, όπως οι ιδιοκτήτες γης, πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν νωρίτερα. Με τη συνοδεία των ιδιοκτητών και εκπροσώπων των αρμόδιων φορέων, η προτεινόμενη διαδρομή πρέπει να εξετάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, ειδικότερα εκείνες οι περιοχές που ήταν δύσκολο να προσδιοριστούν από τους χάρτες κατά τις μελέτες του γραφείου. Σημαντικές επίσης αποτελούν και οι διαπραγματεύσεις για τη χρήση των οδών πρόσβασης, κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της συντήρησης του αγωγού.

Οι γεωλογικές και περιβαλλοντικές έρευνες πρέπει να εκτελούνται σε επαρκές πλάτος και βάθος γύρω από τη προσωρινή διαδρομή του αγωγού και να έχουν παράλληλα καλή ακρίβεια, ώστε να εντοπίσουν όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να επηρεάσουν δυσμενώς την εγκατάσταση και λειτουργία του αγωγού. Αυτό συνεπάγεται περαιτέρω λεπτομερή διαβούλευση με τους θιγόμενους τρίτους φορείς. Επιπλέον, θα πρέπει να ερευνηθούν πιθανές δραστηριότητες από τρίτους κατά μήκος του αγωγού. Τα ενδιαφερόμενα μέρη και η άδεια των τοπικών αρχών και της εθνικής κυβέρνησης θα πρέπει να αποφασίζονται και να λαμβάνονται σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις.

Ένα πλήρες σύνολο δεδομένων που σχετίζεται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του αγωγού συντίθεται από τη συγκέντρωση αρχείων, χαρτών και αποτελεσμάτων φυσικών επιτόπιων ερευνών και αποτυπώσεων. Η προτεινόμενη διαδρομή θα πρέπει να καταγράφεται σε ευθυγραμμισμένα φύλλα χάρτου με κατάλληλη κλίμακα. Οι συντεταγμένες όλων των σημαντικών σημείων, όπως τα σταθερά σημεία-στόχοι, τα σημεία διασταυρώσεων και τα σημεία έναρξης και τέλους του αγωγού θα πρέπει να υπολογίζονται και να αναγράφονται στα φύλλα χάρτου. Επιπρόσθετα, οι ισοΰψεις καμπύλες

πρέπει να καταγράφονται σε επαρκή χωρικά διαστήματα (κατάλληλη ισοδιάσταση), καθώς και χρονικά, για σκοπούς σχεδιασμού, κυρίως όσον αφορά της εγκατάσταση και τη μετέπειτα φάση λειτουργίας. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ανάγκη για ένα κάθετο προφίλ της διαδρομής.

✓ Σχεδιασμός και έγκριση της τελικής διαδρομής [Project execution face, detailed design

Στο τελικό στάδιο καθορίζεται η καλύτερη δυνατή διαδρομή και τα συστατικά της κομμάτια. Πλέον οριστικοποιούνται η έγκριση του τοπικού σχεδιαστικού φορέα και οι συμφωνίες μεταξύ ιδιοκτητών και ενοικιαστών της γης. Η διαδρομή του αγωγού θα πρέπει να αναγνωρίζεται στο πεδίο μέσω ενός συστήματος εντοπισμού, όπως η επισήμανση σημείων κατά μήκος της διαδρομής. Οι θέσεις τοποθέτησης των βαλβίδων του αγωγού, οι διαβάσεις των ποταμών και οι τοποθεσίες πιθανής εκδήλωσης γεωκινδύνων πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά και να προετοιμαστούν σε επίπεδο κατασκευής. Η φυσική κατασκευή του αγωγού και η λειτουργία του αγωγού είναι πλέον έτοιμη να αρχίσει, βάσει των κριτηρίων σχεδιασμού.

2.3. ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΓΩΓΩΝ

Κατά τις μελέτες επιλογής της κατάλληλης χάραξης ενός αγωγού, οι διάφορες πιθανές διαδρομές χαρακτηρίζονται από τις εκάστοτε γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες, καθώς και τους γεωκινδύνους της περιοχής. Οι συνέπειες της ενεργοποίησης ενός γεωκινδύνου κατά μήκος ενός αγωγού είναι τεράστιες και γι'αυτό τον λόγο, το κομμάτι που αφορά τους γεωτεχνικούς παράγοντες είναι σημαντικό και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή της τελικής διαδρομής ενός αγωγού.

Η αποφυγή των επικίνδυνων περιοχών λόγω πιθανών γεωκινδύνων, στο στάδιο επιλογής της διαδρομής αποτελεί πρωταρχικό στόχο για την ομάδα των γεωτεχνικών, αλλά δεν είναι πάντα εφικτή. Η επιλογή της τελικής χάραξης είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας πολλών ομάδων και αρμόδιων φορέων, οπότε πολλές φορές επιλέγεται να διέρχεται από επικίνδυνες περιοχές.

Στις περιπτώσεις αυτές, στην επόμενη φάση κατά τη λειτουργία του αγωγού, η ενεργοποίηση μιας εδαφικής αστοχίας κατά μήκος του είναι πολύ πιθανή και μπορεί να έχει καταστρεπτικές

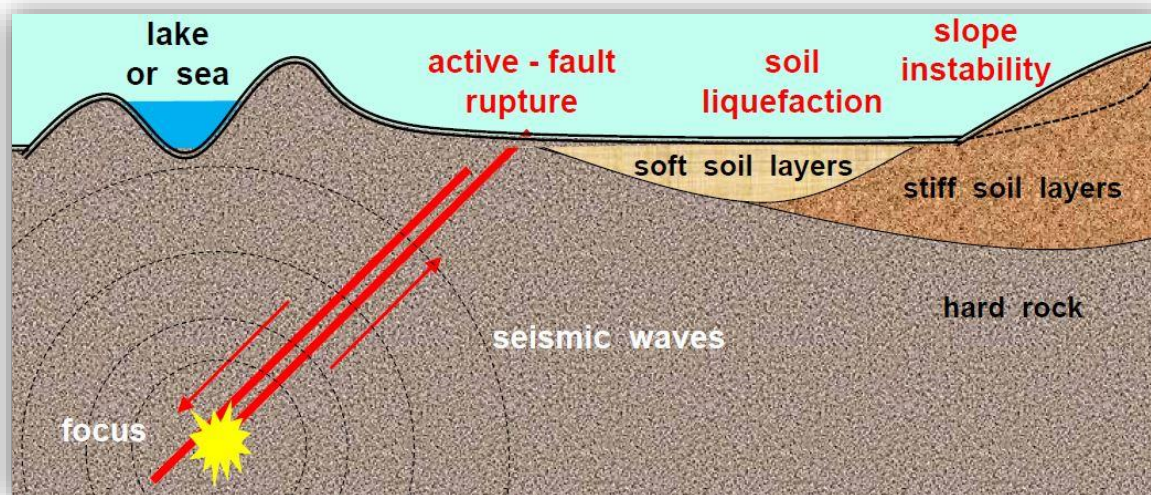
συνέπειες. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων επιβάλλεται να παρακολουθείται οπτικά τόσο το έδαφος όσο και ο αγωγός σε όλο το μήκος του (*monitoring*).

Στον Πίνακα 2.2 αναφέρονται και περιγράφονται όλοι οι πιθανοί γεωκινδύνους και οι τρόποι με τους οποίους επηρεάζουν τον αγωγό, καθώς και διάφορες επιλογές για τη μείωση τους, ενώ στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται οι γεωκίνδυνους που σχετίζονται με τη σεισμική δραστηριότητα, όπως ενεργά ρήγματα, ρευστοποίηση εδάφους και αστάθεια πρανών.

Πίνακας 2.2 Πιθανοί Γεωκίνδυνοι κατά μήκος ενός αγωγού και επιπτώσεις τους, (*Rizkalla, 2008*)

Γεωκίνδυνοι	Περιγραφή	Κίνδυνοι λειτουργίας και συντήρησης	Επιλογές των γεωτεχνικών μηχανικών		
			Έρευνα	Χάραξη	Σχεδιασμός και κατασκευή
Σεισμοί – ρήγματα	Πιθανή κίνηση κατά μήκος προϋπάρχοντων ρηγμάτων κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας	Μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, ρήξη, ανεξέλεγκτη διαρροή. Μπορεί να προκληθούν κατολισθήσεις και κατάρρευση εδάφους	Εντοπισμός ζώνης ρήγματος, εκτίμηση σεισμικής προϊστορίας	Λεπτομερή έλεγχο της χάραξης σε ζώνες ρηγμάτων	Ειδική σχεδίαση τάφρου
Σεισμοί - ρευστοποίηση	Η δόνηση του εδάφους προκαλεί ρευστοποίηση των χαλαρών λεπτόκοκκων και μεταστατικών εδαφών	Απώλεια στήριξης, μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, ρήξη, ανεξέλεγκτη διαρροή	Εντοπισμός και ταξινόμηση του είδους και της δομής του εδάφους	Αποφυγή ευπαθών εδαφών μέσω πλευρικής μετατόπισης της χάραξης ή με εμβάθυνσή της	Βελτίωση εδαφών
Κατολισθήσεις	Αργές ή και γρήγορες μετατοπίσεις εδάφους που προκαλούνται από την αλλαγή της γεωμετρίας, από την ύπαρξη υπογείων υδάτων ή σεισμικότητας.	Απώλεια στήριξης, μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, ρήξη, επιπλέον φόρτιση, ανεξέλεγκτη διαρροή	Εντοπισμός είδη υπαρχόντων κατολισθήσεων, εδάφους επιρρεπές σε κατολισθήσεις και εδάφους που εκτείνεται σε πλάτος	Λεπτομερή έλεγχο της χάραξης για την αποφυγή υπαρχόντων κατολισθήσεων. Ελαχιστοποίηση πιθανών ασταθών εδαφών που εκτείνονται κατά πλάτος	Προσεκτική σχεδίαση χωματουργικών εργασιών, μέτρα διαχείρισης αστοχίας και αποκατάσταση

Διάβρωση εδάφους	Αφαίρεση εδάφους από την κίνηση νερού κατά μήκος ή σε περιοχές κοντά στον αγωγό.	Απώλεια στήριξης, μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, ρήξη, ανεξέλεγκτη διαρροή	Εκτίμηση του εδάφους πλαγίως του αγωγού	Ελαχιστοποίηση πλαγίως εκτεινόμενου εδάφους και αποφυγή περιοχών με ενεργή διάβρωση	Προσεκτική σχεδίαση χωματουργικών εργασιών, μέτρα προστασίας για περιοχές απορροής υδάτων και ευάλωτων σε διάβρωση
Καρστικοί ασβεστόλιθοι	Ο ασβεστόλιθος που διαβρώνεται από την ύπαρξη υπογείων υδάτων οδηγεί στην δημιουργία καταβοθρών, σπηλιών κτλ με αποτέλεσμα να ρέπει σε ξαφνική κατάρρευση	Απώλεια στήριξης, μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, ρήξη, ανεξέλεγκτη διαρροή σε συστήματα υπογείων υδάτων	Εκτίμηση και κατάταξη της καρστικοποίησης	Αποφυγή, ελαχιστοποίηση, λεπτομερή έλεγχο χάραξης	Μέτρα ενίσχυσης του εδάφους
Καρστικοί γύψοι	Ο γύψος ή άλλα εδάφη πλούσια σε θείο που διαβρώνεται από την ύπαρξη υπογείων υδάτων οδηγεί στην δημιουργία καταβοθρών, σπηλιών κτλ με αποτέλεσμα να ρέπει σε ξαφνική κατάρρευση	Απώλεια στήριξης, μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, ρήξη, ανεξέλεγκτη διαρροή σε συστήματα υπογείων υδάτων	Εκτίμηση και κατάταξη της καρστικοποίησης	Αποφυγή, ελαχιστοποίηση, λεπτομερή έλεγχο χάραξης	Μέτρα ενίσχυσης του εδάφους



Εικόνα 2.3. Οι βασικοί γεωκίνδυνοι λόγω σεισμού : ενεργό ρήγμα, ρευστοποίηση και αστάθεια πρανών.

2.3.1. Η σημασία της πληροφορίας για την αποφυγή και διαχείριση των γεωκινδύνων

Για να χαρακτηριστεί μια περιοχή ακατάλληλη προς επιλογή κατά το στάδιο μελέτης χάραξης διαδρομής ενός αγωγού, λόγω πιθανών γεωκινδύνων, απαιτούνται έμπειροι μηχανικοί και πληροφορίες για την περιοχή αυτή. Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τη χρήση γης, τις εδαφοκαλύψεις, την τοπογραφία, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τη γεωλογία, την υδρολογία, τη σεισμολογία και το κλίμα και επηρεάζουν τα γεωτεχνικά, υδρολογικά και γεωπεριβαλλοντικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

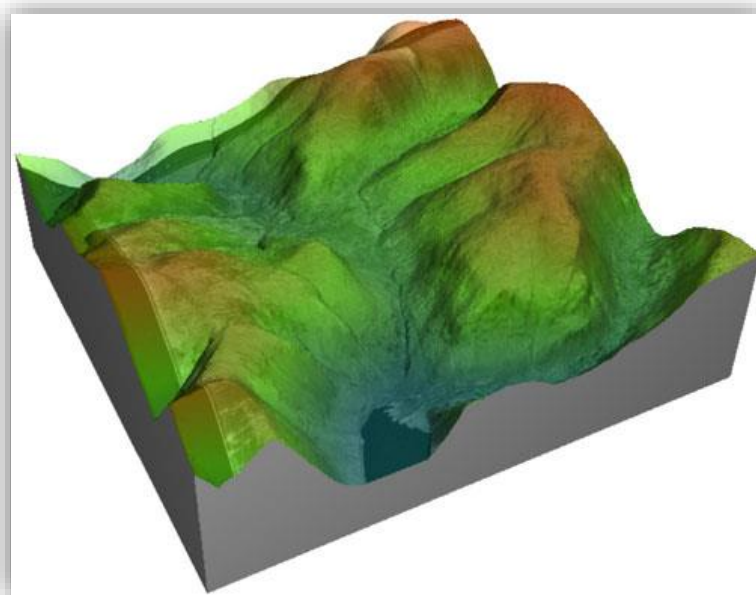
Η συλλογή και η σωστή ερμηνεία αυτής της πληροφορίας είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι κατά την επιλογή της κατάλληλης χάραξης. Σύγχρονοι τηλεπισκοπικοί μέθοδοι συλλογής δεδομένων (*remote sensing data*), προσφέροντας δεδομένα και χάρτες υψηλής ακρίβειας, δίνουν τη δυνατότητα στους γεωτεχνικούς και γεωλόγους να μελετήσουν με προσοχή και να εντοπίσουν πιθανούς γεωκινδύνους πριν ακόμη βγουν στο πεδίο.

✓ Μελέτες τηλεπισκόπησης για την απόκτηση πληροφορίας

Κατά τις μελέτες επιλογής κατάλληλης χάραξης, οι αναλυτές τηλεπισκόπησης, χρησιμοποιούν αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες (*satellite imagery*) για να αναγνωρίσουν επιφανειακά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας, καθώς επίσης και γενεσιουργές και περιβαλλοντικές διαδικασίες που τα δημιουργήσαν, με σκοπό την απόκτηση πληροφοριών για

γεωτεχνικά και γεωπεριβαλλοντικά χαρακτηριστικά τους. Οι μελέτες τηλεπισκόπησης που γίνονται στα πλαίσια των εργασιών γραφείου, αποκαλύπτουν προβληματικά εδάφη και γεωκινδύνους, που μπορούν να αποφευχθούν στα αρχικά στάδια επιλογής διαδρομής και να οδηγήσουν σε επιτόπου ειδικές έρευνες πεδίου σε επιλεγμένα κομμάτια των διαδρομών.

Πολυεπεπίπεδοι χάρτες, δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες μπορούν να αποκτηθούν από διεθνείς, εθνικές και τοπικές κυβερνητικές οργανώσεις καθώς και ιδιωτικές εταιρίες. Σε πολλές περιπτώσεις επίσης, χρήσιμη πηγή δεδομένων μπορεί να είναι και οι ασπρόμαυρες στερεοσκοπικές αεροφωτογραφίες. Σε εθνικές και τοπικές υπηρεσίες υπάρχουν διαθέσιμες τέτοιου τύπου αεροφωτογραφίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον σκοπό. Αξιόπιστη τηλεπισκοπική πηγή δεδομένων ακόμη μπορεί να είναι οι ψηφιακές ορθοφωτογραφίες, οι οποίες εύκολα μετατρέπονται σε ψηφιακά μοντέλα εδάφους (*DTM*) (Εικόνα 2.4), προσομοιώνοντας με μεγάλη ακρίβεια τον πραγματικό κόσμο.



Εικόνα 2.4. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (*DTM*) , (www.bgs.ac.uk)

Τέλος, άλλη μία χρήσιμη πηγή πληροφοριών μπορούν να αποτελέσουν οι εναέριες φωτογραφίες *LidAR (Light Detection and Ranging)*, οι οποίες συλλέγονται με χαμηλές πιθήσεις αεροσκαφών, και αποτελούν ένα ακριβές τηλεπισκοπικό εργαλείο για τοπογραφική χαρτογράφηση. Οι φωτογραφίες *LIDAR* μπορούν να εντοπίσουν και να μετρήσουν ταυτόχρονα τη βλάστηση και την εδαφική επιφάνεια με ακρίβεια 50mm. (Ενότητα 2.3.2)

✓ Σύνθεση εδαφικών δεδομένων σε Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)

Η συλλογή των δεδομένων με όλες τις τηλεπισκοπικές μεθόδους που αναφέρθηκαν αποτελεί απλά το πρώτο στάδιο για την απόκτηση της απαραίτητης πληροφορίας. Περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία τους επιτυγχάνεται σε περιβάλλοντα *Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών*. Μηχανικοί που ασχολούνται με την κατασκευή και τον έλεγχο των αγωγών συλλέγουν, συνθέτουν και αναλύουν δεδομένα σε Σ.Γ.Π και εξάγουν συμπεράσματα για την γεωλογία και τους γεωτεχνικούς κινδύνους μιας περιοχής.

2.3.2. Παρακολούθηση γεωκινδύνων

Η παρακολούθηση των κινήσεων του εδάφους και των ενεχόμενων επιδράσεων τους στην ακεραιότητα του αγωγού είναι ένας βασικός στόχος κατά τη φάση λειτουργίας του αγωγού, σε περιπτώσεις όπου δε κατέστη δυνατή η αποφυγή των γεωκινδύνων κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Όταν ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός ενός γεωκινδύνου στη διαδρομή του αγωγού (*ROW*), η ακεραιότητά του απειλείται από τη συσσώρευση τάσεων, οι οποίες είναι αποτέλεσμα των μετακινήσεων του εδάφους, κάτω ή πάνω από τον αγωγό. Οι τάσεις αυτές μπορούν να αυξηθούν σε οριακό σημείο, προκαλώντας παραμορφώσεις και ενδεχομένη του αγωγού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κύριοι μέθοδοι παρακολούθησης των σημαντικότερων γεωκινδύνων, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια.

Πίνακας 2.3. Κύριες μέθοδοι παρακολούθησης γεωκινδύνων, (Rizkalla, 2008)

Γεωκίνδυνοι	Μέθοδοι παρακολούθησης γεωκινδύνων			
	Εναέριοι Μέθοδοι	Δορυφορικές Μέθοδοι	Επίγεια Όργανα	Συμβατική έρευνα
1. Κατολισθήσεις/Μετακινήσεις Μαζών				
Βαθιά εδραζόμενες κατολισθήσεις	✓	✓	✓	✓
Ερπυσμός	✓	✓		✓
Βραχοπτώσεις	✓			
Χιονοστιβάδα				
2. Τεκτονικοί/Σεισμικοί				
Μετατόπιση ρήγματος	✓	✓	✓	
Ρευστοποίηση				
Δυναμική κίνηση εδάφους				
3. Υδρολογικοί				
Κάθετη ροή				✓
Μετατόπιση κοίτης	✓	✓		✓
Πλευστότητα (ανύψωση αγωγού)	✓	✓		
Ταχεία αποστράγγιση λίμνης	✓	✓		
Παράκτια πλημμύρα	✓	✓		
4. Διάβρωση				
Διάβρωση επίχωσης	✓			
Διάβρωση κατά μήκος του αγωγού	✓			
Διάβρωση υπεδάφους	✓			

✓ Εναέρια Περιπολία

Η εναέρια επιτήρηση ή περιπολία κατά μήκος όλου του αγωγού, είναι η πιο κοινή μέθοδος για τον εντοπισμό και τον έλεγχο των κινήσεων του αγωγού. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζονται αστάθειες στα πρηνή, διάβρωση και άλλες συνθήκες που είναι ορατές από ψηλά. Προσωπικό εξοικειωμένο σε μακροχρόνιες καταστάσεις ελέγχου του αγωγού, συμμετέχει στις εναέριες αποστολές και εντοπίζει βασικούς δείκτες εδαφικής αστάθειας. Οι παρατηρήσεις τους στέλνονται στους μηχανικούς οι οποίοι εντοπίζουν το επίπεδο του κινδύνου και παίρνουν τα κατάλληλα μέτρα.

Οι εναέριες περιπολίες περιλαμβάνουν: επιτήρηση της περιοχής, ερμηνεία αεροφωτογραφιών, γεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες, και ενόργανες παρακολουθήσεις για να ελέγχουν την πρόοδο των εδαφικών κινήσεων.

✓ Έρευνα με LiDAR

Ένα τυπικό σύστημα *LiDAR* μεταδίδει ταχείς παλμούς φωτός οι οποίοι αντανακλούνται από το έδαφος και άλλα αντικείμενα. Ο επιστρεφόμενος παλμός μετατρέπεται από φωτόνια σε ηλεκτρικά ερεθίσματα και συλλέγονται από έναν υψηλής ταχύτητας εγγραφέα δεδομένων. Επειδή η ταχύτητα του φωτός είναι γνωστή, τα χρονικά διαστήματα από την εκπομπή μέχρι τη συλλογή υπολογίζονται εύκολα. Στη συνέχεια μετατρέπονται σε αποστάσεις βασισμένες σε γνωστές θέσεις από επίγειους δέκτες *GPS* και από μετρητές τοποθετημένους πάνω στα αεροσκάφη.

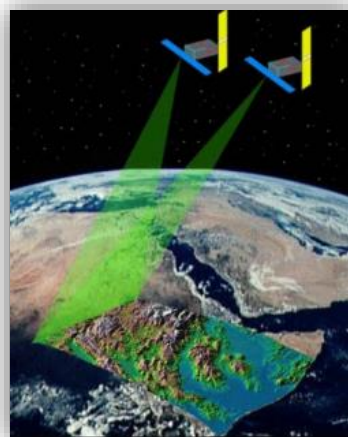
Τα συστήματα *LiDAR* συλλέγουν συντεταγμένες (x,y,z) σημείων σε προκαθορισμένα διαστήματα. Το αποτέλεσμα είναι ένα δίκτυο από πυκνές υψομετρικές θέσεις. Εδαφικές παραμορφώσεις μετρούνται συνδυάζοντας μια *LiDAR* έρευνα με έρευνες βασικής γραμμής.



Εικόνα 2.5. Εναέριες φωτογραφίες LiDAR

✓ Δορυφορικές μέθοδοι παρακολούθησης

Τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (*SAR*) αποτελούν νέες διαστημικές τεχνολογίες που έχουν ως σκοπό την παρατήρηση της Γης από το διάστημα. Ειδικότερη εφαρμογή τους αποτελεί η Συμβολομετρία Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (*InSAR*) η οποία εφαρμόζεται κυρίως για μελέτες εδαφικές μετακινήσεων, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια εκατοστού. Η τεχνολογία αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση των αγωγών σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 2.6. InSAR: Μια δορυφορική μέθοδος παρακολούθησης αλλαγών της γήινης επιφάνειας σε πραγματικό χρόνο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, γνωστά διεθνώς ως *Geographical Information Systems (GIS)*, τα οποία είναι μια νέα γενιά ψηφιακών συστημάτων και αποτελούν κλάδο της επιστήμης της Γεωπληροφορικής.

Οι ραγδαίες εξελίξεις στον ευρύτερο τομέα της Πληροφορικής και η ανάγκη για την αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων που αφορούν πληροφορίες του πραγματικού κόσμου, οδήγησαν στη δημιουργία και ανάπτυξη των Συστημάτων Βάσεων Δεδομένων, τα οποία με την πρόσθεση της χωρικής πληροφορίας κατάφεραν να διεισδύσουν στον κόσμο της Χαρτογραφίας και της Γεωγραφίας, δημιουργώντας την επιστήμη της Γεωπληροφορικής και κατά συνέπεια τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

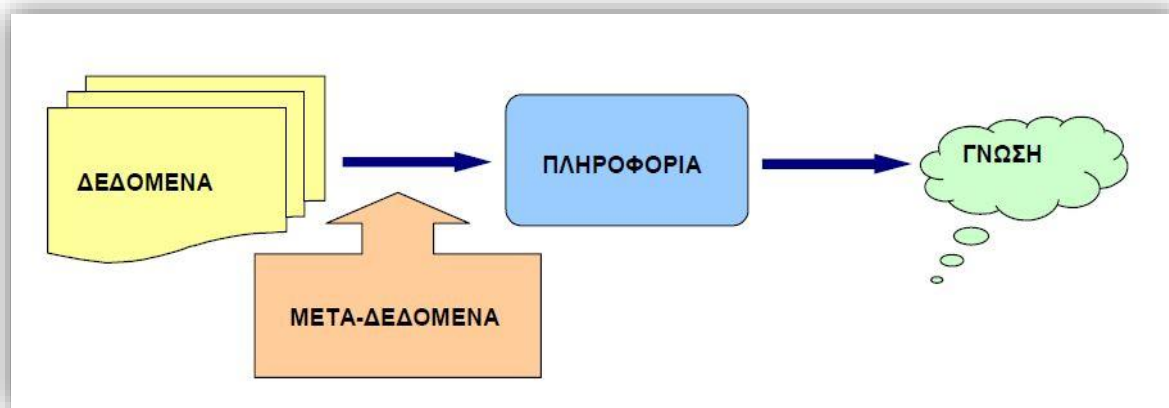
Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών επιτρέπουν στους χρήστες να δημιουργήσουν μια εικόνα του πραγματικού κόσμου σε ψηφιακό περιβάλλον, συλλέγοντας και συνδέοντας γεωγραφικά δεδομένα από διαφορετικές πηγές φαινομενικά ασύνδετων μεταξύ τους. Έως σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλά πακέτα λογισμικών (*software*) που παρέχουν ένα σύνολο από εργαλεία κατάλληλα για τη διαχείριση και ανάλυση των γεωγραφικών αυτών δεδομένων.

Η χωρική συνιστώσα είναι το χαρακτηριστικό που κάνει τα Σ.Γ.Π ιδιαίτερα, καθώς τα καθιστά απαραίτητα εργαλεία κατά τη λήψη αποφάσεων σε πολλά πεδία μελέτης. Γεωγράφοι, μηχανικοί, αρχαιολόγοι και επαγγελματίες σε πολλούς άλλους κλάδους, έχουν ενσωματώσει τα Σ.Γ.Π στις εργασίες τους, στα στάδια της διαχείρισης και ανάλυσης των δεδομένων από οποιαδήποτε πηγή και αν προέρχονται. Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορα πεδία εφαρμογής των *GIS*.

ΧΡΗΣΕΙΣ-ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ GIS (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μαρίνος Κάβουρας, 2004)

- Κτηματολόγιο
- Δίκτυα κοινής ωφέλειας (AM/FM)
- Αυτόματη Σχεδίαση (CAD)
- Θεματική Χαρτογραφία
- Υδρογραφία
- Φωτογραμμετρία-Τηλεπισκόπηση
- Περιγραφή τοπογραφικού αναγλύφου
- Φυσικά διαθέσιμα
- Σχεδιασμός μεταφορών
- Αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών
- Απογραφές-Δημογραφία
- Γεω-*marketing*
- Γεωτεχνική
- Αρχαιολογία
- Στρατιωτικές εφαρμογές

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως στα Συστήματα Βάσεων Δεδομένων οι όροι δεδομένα, πληροφορίες και γνώση είναι διαφοροποιημένοι. Σε σχηματική αναπαράσταση που ακολουθεί (Εικόνα 3.1) φαίνεται η σχέση που συνδέει τις τρεις αυτές έννοιες. Τα δεδομένα, αποτελούν απεικονίσεις του πραγματικού κόσμου, αντιπροσωπεύοντας τη γνώση μας πάνω σε αυτόν σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ενώ η πληροφορία παράγεται από τα δεδομένα με τη χρήση της διακριτικής και γνωστικής ικανότητας μας. Τα μετά-δεδομένα είναι επιπρόσθετα δεδομένα που χρησιμοποιούνται πολλές φορές για να γίνουν κατανοητά τα δεδομένα.

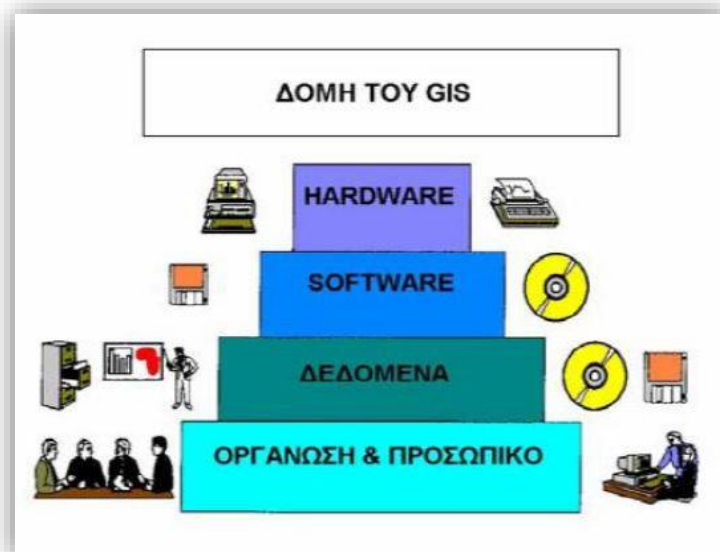


Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση της σχέσης των όρων Δεδομένα, Πληροφορία και Γνώση (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας,2004)

3.2. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΣΓΠ

Η σωστή λειτουργία ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών εξαρτάται από τα τρία βασικά συστατικά του. Το υπολογιστικό σύστημα, δηλαδή όλος εκείνος ο μηχανικός εξοπλισμός (*hardware*) και το λογισμικό (*software*) που είναι απαραίτητα για την αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων, τα γεωγραφικά δεδομένα και τους χρήστες, δηλαδή το ανθρώπινο δυναμικό που εργάζεται (Εικόνα 3.2). Σημειώνεται πως τα τελευταία χρόνια έχει προστεθεί και ένα τέταρτο απαραίτητο συστατικό για τη λειτουργία των *GIS*, το *internet*.

Τα γεωγραφικά δεδομένα μπορεί να έχουν πολλές μορφές. Μπορεί να είναι πραγματικά δεδομένα, για παράδειγμα οι συνθήκες του εδάφους ή οι καιρικές συνθήκες, να έχουν συλλεχθεί από φυσικές συσκευές όπως οι φωτογραφικές μηχανές ή οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες, να είναι ερμηνευόμενα, δηλαδή να προέρχονται από σχεδιαγράμματα ερωτηματολόγια ή βιβλία ή να είναι επεξεργασμένα σε κωδικοποιημένη μορφή όπως στους αναλογικούς χάρτες. Τέλος μπορεί να είναι να είναι δομημένα ή οργανωμένα από ήδη υπάρχουσες βάσεις δεδομένων.



Εικόνα 3.2. Σχηματική αναπαράσταση όπου παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά ενός Σ.Γ.Π, το υπολογιστικό σύστημα αποτελούμενο από το *hardware* και το *software*, τα δεδομένα και το ανθρώπινο δυναμικό. (www.geography.hunter.cuny.edu)

3.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα γεωγραφικά δεδομένα ή αλλιώς χωρικά (*spatial data*), συσχετίζονται με μια σειρά από περιγραφικά δεδομένα. Η χαρακτηριστική δυνατότητα που παρέχουν τα *GIS* είναι αυτή της σύνδεσης της χωρικής με την περιγραφική πληροφορία (η οποία δεν έχει από μόνη της χωρική υπόσταση). Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την λειτουργία αυτή βασίζεται:

- Είτε στο σχεσιακό (*relational*) μοντέλο δεδομένων, όπου τα περιγραφικά δεδομένα πινακοποιούνται χωριστά και αργότερα συσχετίζονται με τα χωρικά δεδομένα μέσω κάποιων μοναδικών τιμών που είναι κοινές και στα δύο είδη δεδομένων.
- Είτε στο αντικειμενοστραφές (*object-oriented*) μοντέλο δεδομένων, όπου τόσο τα χωρικά όσο και τα περιγραφικά δεδομένα συγχωνεύονται σε αντικείμενα, τα οποία μπορεί να μοντελοποιούν κάποια αντικείμενα με φυσική υπόσταση (π.χ. κατηγορία = "δρόμος", όνομα = "Πανεπιστημίου", γεωμετρία = "[X1,Y1],[X2,Y2]...", πλάτος = "20μέτρα").

Το αντικειμενοστραφές μοντέλο τείνει να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές *GIS* εξαιτίας των αυξημένων δυνατοτήτων του σε σχέση με το σχεσιακό μοντέλο της

δυνατότητας που παρέχει για την εύκολη και απλοποιημένη μοντελοποίηση σύνθετων φυσικών φαινομένων και αντικειμένων με χωρική διάσταση. (www.el.wikipedia.org)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν, κάποιες βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο, για την καλύτερη κατανόηση τους.

✓ Σχισιακό μοντέλο δεδομένων

Η ρχισιακή δομή δεδομένων περιγράφεται από πίνακες οι οποίοι καλούνται ρχέςεις. Κάθε ρχέση αποτελείται από ένα σύνολο γραμμών οι οποίες ονομάζονται πλειάδες ή εγγραφές. Κάθε εγγραφή είναι μοναδική και η σειρά τοποθέτησης τους δεν είναι ρητά καθορισμένη.

Οι στήλες κάθε ρχέσης ονομάζονται γνωρίσματα (*attributes*) ή πεδία (*fields*). Η τομή κάθε στήλης και γραμμής ενός πίνακα αποτελεί την τιμή του πεδίου ή το χαρακτηριστικό του.

Σε κάθε ρχέση υπάρχει μια μοναδική ταυτότητα των εγγραφών η οποία μπορεί να είναι ένα γνώρισμα ή ένας συνδυασμός γνωρισμάτων. Η ταυτότητα αυτή καλείται κλειδί (*key*) και στο ρχισιακό μοντέλο υπάρχουν τριών ειδών κλειδιά. (*Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Χαλκιάς Χ, 2011*)

- Το υποψήφιο κλειδί (*candidate key*) : κάθε γνώρισμα ή συνδυασμός γνωρισμάτων που ταυτοποιεί τις εγγραφές μιας ρχέσης.
- Το πρωτεύον κλειδί (*primary key*) : είναι το υποψήφιο κλειδί που επιλέγεται για την ταυτοποίηση των εγγραφών μιας ρχέσης.
- Το ξένο κλειδί (*foreign key*) : κάθε κλειδί μίας ρχέσης που έχει το ίδιο πεδίο ορισμού με το κλειδί μιας άλλης.

Πρωτεύον κλειδί

Πεδία

Table

Thes_Soil_Polygons

OBJECTID *	Shape *	Id	Soil_type	y	c	φ	Shape_Length	Shape_Area
1	Polygon	4	flysch	20	30	30	872.098163	42542.527532
2	Polygon	3	clay-sand	18	35	22	1080.004547	68000.013023
3	Polygon	1	rock1	22	80	35	3637.513617	312304.136987
4	Polygon	2	clay-silt	19	5	28	1800.004447	140000.420382
5	Polygon	5	alluvial	20	5	30	3323.115246	289468.653207
6	Polygon	6	flsych	20	30	30	702.429939	29917.634242
7	Polygon	7	breccia	22	50	30	1500.632106	110063.210197
8	Polygon	8	rock1	22	80	35	2196.672912	179704.444839
9	Polygon	9	marl	20	35	22	1508.494684	110295.551416
10	Polygon	10	clay1	18	15	25	699.885457	29988.535408
11	Polygon	11	marl	20	35	22	1100.114708	70011.480054
12	Polygon	12	rock1	22	80	35	2000.000106	159999.979832
13	Polygon	13	marl	20	35	22	800.000063	40000.014304
14	Polygon	14	clay2	20	12	28	599.000042	19899.998275
15	Polygon	15	silt	19	5	28	698.068345	29951.195659
16	Polygon	16	rock2	22	15	35	2010.948642	246170.13065

Εγγραφή

Τιμή πεδίου

Εικόνα 3.3. Πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών από περιβάλλον ArcGIS 10.2.2, όπου φαίνονται οι βασικές έννοιες του σχεσιακού μοντέλου δεδομένων.

✓ Αντικειμενοστραφές μοντέλο δεδομένων

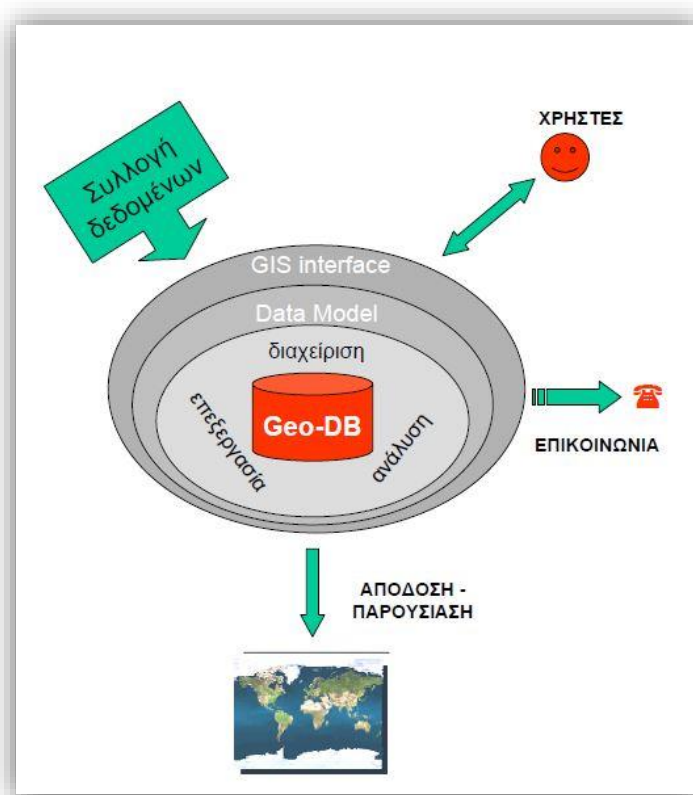
Σε αντίθεση με το σχεσιακό μοντέλο για την αντικειμενοστραφή δομή δεδομένων δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη τυποποίηση. Παρόλα αυτά, η δομή αυτή μπορεί να περιγραφεί με τους παρακάτω όρους: (*Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Χαλκιάς Χ, 2011*)

- Ταυτότητα αντικειμένου: είναι μοναδική και υλοποιείται από το σύστημα μέσω ενός μοναδικού αναγνωριστικού αντικειμένου. Στη δομή αυτή τα αναγνωριστικά αντικειμένου είναι αμετάβλητα.
- Τιμές ή καταστάσεις: αναφέρονται στα σύνθετα αντικείμενα και μπορούν να κατασκευάζονται από άλλα αντικείμενα με τη χρήση των τελεστών κατασκευής τύπων. Ένας τρόπος αναπαράστασης τέτοιων αντικειμένων, είναι να θεωρείται κάθε αντικείμενο ως τριάδα (i, c, v) όπου i = μοναδικό αναγνωριστικό αντικειμένου, c = ο

τελεστής κατασκευής (ένδειξη σχετικά με τον τελεστή κατασκευής της τιμής του αντικειμένου) και v = τιμή ή κατάσταση του αντικειμένου. Οι βασικότεροι τελεστές κατασκευής αναφέρονται σαν ατομική τιμή, πλειάδα και σύνολο. Συχνά επίσης χρησιμοποιούνται και οι τελεστές λίστα και πίνακας (*list*, *array*).

3.4. ΡΟΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ Σ.Γ.Π

Σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, για την εξαγωγή του τελικού επιθυμητού προϊόντος, πρέπει να γίνουν μια σειρά από εργασίες. Η ακολουθία των διαδικασιών αυτών περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα με σχηματική αναπαράσταση και αναλύεται εκτενέστερα στη συνέχεια. (Εικόνα 3.4)



Εικόνα 3.4. Σχηματική μορφή των εργασιών σε ένα Σ.Γ.Π (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας, 2004)

✓ Εισαγωγή

Σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών η εισαγωγή είναι το τμήμα που είναι υπεύθυνο για την τροφοδότηση του συστήματος με δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να είναι σε ψηφιακή μορφή (Ενότητα 3.5) και μπορεί να προέρχονται από πολλές διαφορετικές πηγές (Ενότητα 3.7). Αυτό το στάδιο αφορά τόσο τη γεωγραφική όσο και τη περιγραφική διάσταση των δεδομένων.

✓ Επεξεργασία

Στο στάδιο της επεξεργασίας συγκαταλέγονται η διόρθωση και η διαχείριση των εισαχθέντων δεδομένων στο σύστημα προς περαιτέρω χρήση και ανάλυση. Αυτό μπορεί να αφορά την ορθή απόδοση του συστήματος συντεταγμένων, την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των δεδομένων, τη διόρθωση σφαλμάτων, την μετάβαση από μια δομή σε μια άλλη. (Ενότητα 3.6)

✓ Ανάλυση

Το στάδιο της ανάλυσης αποτελεί την καρδιά κάθε Σ.Γ.Π. Στο στάδιο αυτό ο χρήστης-αναλυτής θέτει ερωτήσεις (*queries*) χωρικού ή περιγραφικού τύπου προς απάντηση, σύμφωνα με τη δυνατότητα των ίδιων των δεδομένων.

✓ Απόδοση

Στο στάδιο της απόδοσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε χάρτες. Ένας καλός χάρτης, θα πρέπει να πληροφορεί σωστά εκείνους που πρόκειται να τον χρησιμοποιήσουν, να αποκαλύπτει και να διασαφηνίζει στοιχεία και λεπτομέρειες που πιθανόν να μην είχαν προβλεφθεί και τέλος, να πείθει τον αναγνώστη του για την πληρότητα του.

Η απόδοση των αποτελεσμάτων σε χάρτες μπορεί να γίνεται, είτε αναλογικά μέσω της εκτύπωσης χαρτογραφικών προϊόντων, είτε σε ψηφιακές πλατφόρμες, είτε με τη χρήση του Διαδικτύου μέσω διαδραστικών χαρτών (*Web-based GIS*), είτε σε εσωτερικά δίκτυα οργανισμών μέσω εφαρμογών που υποστηρίζουν πολλαπλούς χρήστες με διακριτούς ρόλους (*Enterprise GIS*)

✓ Έλεγχος

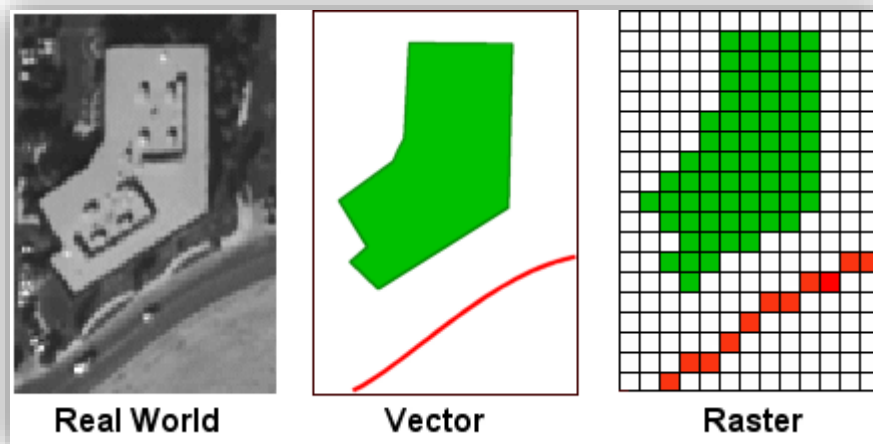
Κάθε σύστημα οφείλει να έχει μηχανισμούς ανάδρασης (*feedback*) ώστε να εξασφαλίζεται η ορθότητα και ακρίβεια των πληροφοριών. Αυτό, μπορεί να γίνεται μέσω λογισμικού με διαδικασίες κανόνων επικύρωσης, με διαδικασίες ελέγχου ακρίβειας συντεταγμένων και

γενικότερα με διαδικασίες ποιοτικών και ποσοτικών ελέγχων ανάλογα με τη φύση των δεδομένων.

3.5. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

Τα γεωμετρικά δεδομένα που εισάγονται σε Σ.Γ.Π, βοηθούν στην ανάπτυξη μιας εικόνας της γήινης επιφάνειας. Υπάρχουν δύο θεωρήσεις ή αλλιώς μοντέλα, για την περιγραφή της γήινης επιφάνειας. Το πρώτο μοντέλο, ονομάζεται μοντέλο πεδίων (*field-based approach*) και θεωρεί τη γήινη επιφάνεια ως ένα χωρικό συνεχές και ομογενές μέσο και το δεύτερο μοντέλο ονομάζεται μοντέλο αντικειμένων (*object-oriented*) και θεωρεί ότι ο γεωγραφικός χώρος αποτελείται από στοιχεία (*features*) ή αντικείμενα (*objects*) που έχουν γεωμετρική θέση και σχήμα.

Για την υλοποίηση των θεωρήσεων αυτών, έχουν αναπτυχθεί δύο γεωμετρικές δομές δεδομένων, η κανονικοποιημένη ή ψηφιδωτή (*raster*) και η διανυσματική (*vector*) αντίστοιχα. Η διαφορά στην απεικόνιση του πραγματικού κόσμου ανάλογα με τη δομή των δεδομένων και το μοντέλο το οποίο εκφράζουν φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.5.

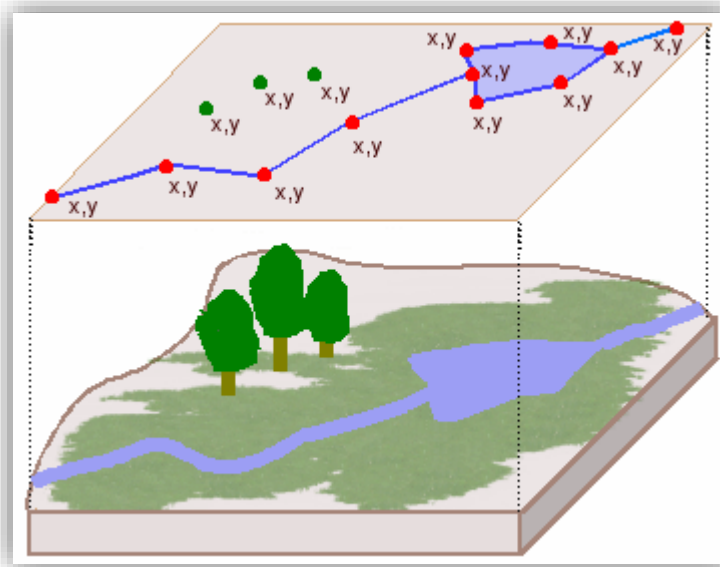


Εικόνα 3.5. Διαφορά αναπαράστασης του πραγματικού κόσμου από μία διανυσματική (*vector*) δομή σε μία κανονικοποιημένη ή ψηφιδωτή (*raster*) δομή. (www.geography.hunter.cuny.edu)

✓ Διανυσματική δομή δεδομένων

Στη διανυσματική δομή δεδομένων (*vector data structure*) (Εικόνα 3.5) η βασική λογική μονάδα αντιστοιχεί σε μια γραμμή η οποία μπορεί να αναπαριστά μια ισούψη καμπύλη, ένα ποταμό, ένα δρόμο, το όριο μιας επιφάνειας ή ένα γραμμικό τμήμα των παραπάνω. Ένα διανυσματικό σύστημα, απεικονίζει τα δεδομένα ως σύνολα χωρικών αρχετύπων. Στα δισδιάστατα μοντέλα τα χωρικά αρχέτυπα είναι σημεία, γραμμές και πολύγωνα, ενώ στα τρισδιάστατα χρησιμοποιούνται επιπλέον οι επιφάνειες και οι όγκοι. Φυσικά, ποια χωρικά αρχέτυπα χρησιμοποιούνται κάθε φορά εξαρτάται από τη κλίμακα παρατήρησης ή το επίπεδο γενίκευσης. Σε μικρή κλίμακα, οι πόλεις αναπαρίστανται από σημεία, ενώ οι ποταμοί και οι δρόμοι αναπαρίστανται από γραμμές. Όμως, καθώς αυξάνεται η κλίμακα παρατήρησης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επιφανειακή διάσταση των φαινομένων.

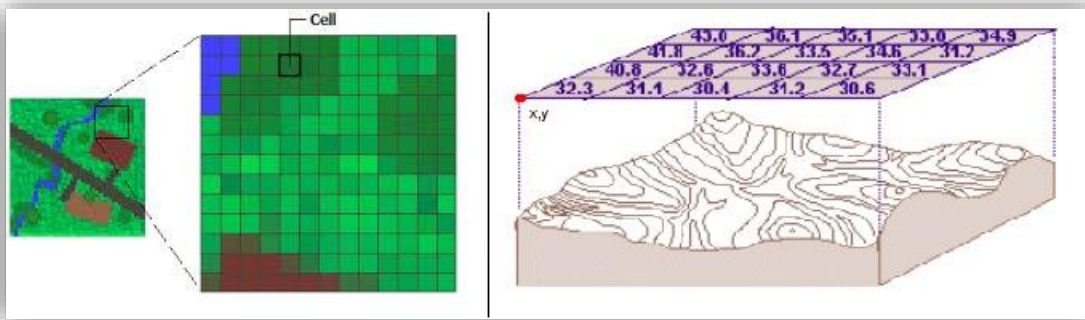
Οι γραμμές ή τα τόξα είναι σειρές διατεταγμένων σημείων των οποίων καταγράφονται οι συντεταγμένες. Οι επιφάνειες ή τα πολύγωνα αποθηκεύονται επίσης ως διατεταγμένες σειρές σημείων, όμως το αρχικό και τελικό σημείο ταυτίζονται, έτσι ώστε να ορίζεται ένα κλειστό σχήμα. Τα σημεία σε μια διανυσματική δομή δεδομένων περιγράφονται ως γραμμές μηδενικού μήκους.



Εικόνα 3.6. Αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας με διανυσματική (*vector*) δομή δεδομένων, (www.geography.hunter.cuny.edu)

✓ Κανονικοποιημένη δομή δεδομένων

Η κανονικοποιημένη δομή δεδομένων (*raster data structure*) (Εικόνα 3.7) αντιλαμβάνεται το χώρο ως μωσαϊκή διαίρεση φατνίων-ψηφίδων (*tessellation of cells*), δηλαδή τοποθετεί και αποθηκεύει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα πίνακα ή ένα κάναβο φατνίων. Συνήθως αναφερόμαστε σε ένα φατνίο με τον όρο εικονοστοιχείο (*pixel=picture element*). Η ψηφιδωτή δομή δεδομένων χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το χωρικό φαινόμενο που αποτυπώνεται χαρακτηρίζεται ως συνεχής μεταβλητή (π.χ. το υψόμετρο του εδάφους, η κατανομή του θορύβου) ή σε περιπτώσεις που στο ΣΓΠ θέλουμε να ενσωματώσουμε μια δορυφορική εικόνα ή μια σαρωμένη αεροφωτογραφία.



Εικόνα 3.7. Αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας με κανονικοποιημένη ή ψηφιδωτή (*raster*) δομή δεδομένων, (www.geography.hunter.cuny.edu)

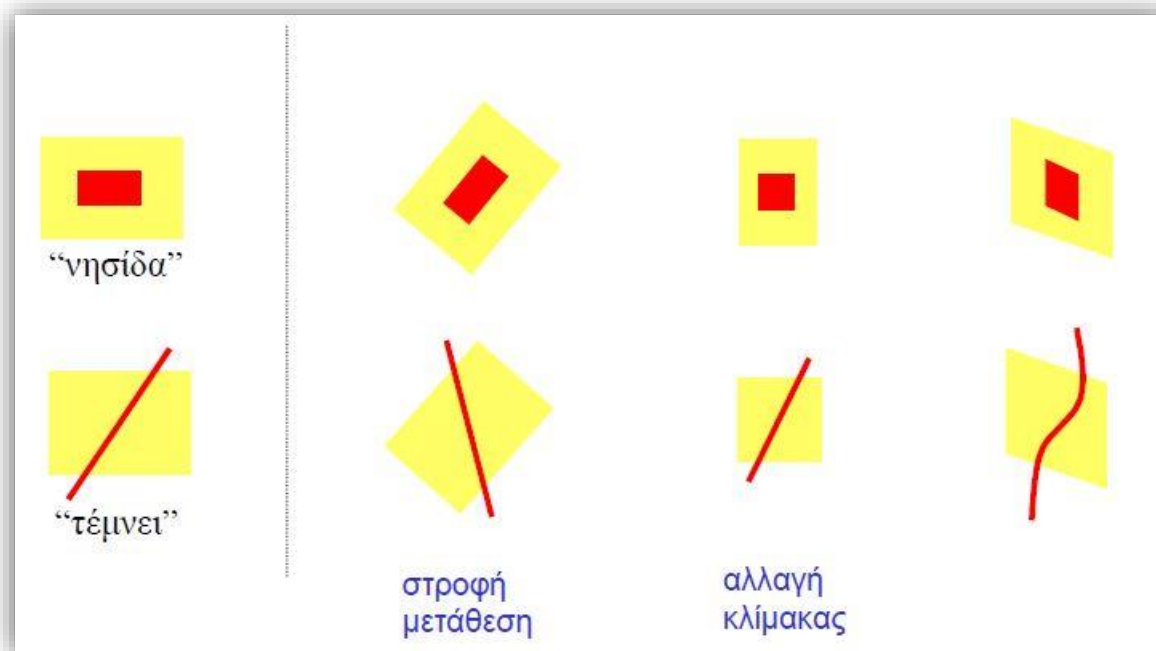
Οι δύο δομές διαχειρίζονται γεωμετρική πληροφορία, η οποία αναφέρεται στις μετρητικές (*metrics*) και στις τοπολογικές (*topology*) ιδιότητες των στοιχείων.

Οι μετρητικές ιδιότητες αναφέρονται στη θέση, τον προσανατολισμό, το σχήμα και το μέγεθος των γεωμετρικών στοιχείων. (*Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας, 2004*)

- Η θέση και ο προσανατολισμός εκφράζονται σε σχέση με κάποιο σύστημα αναφοράς. Η θέση κάθε σημείου προσδιορίζεται από ένα ζεύγος συντεταγμένων, ενώ ο προσανατολισμός των πλευρών δίνεται από τη γωνία που σχηματίζουν με τον άξονα συντεταγμένων.
- Το σχήμα και το μέγεθος των γεωμετρικών στοιχείων εκφράζονται ανεξάρτητα από το σύστημα συντεταγμένων. Οι μετρήσεις αυτές προκύπτουν από το μήκος των πλευρών των γεωμετρικών στοιχείων και από τις γωνίες που σχηματίζουν οι πλευρές μεταξύ τους. Επομένως, η πληροφορία αυτή παραμένει αμετάβλητη μετά από οποιοδήποτε

μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων που διατηρεί σταθερή την κλίμακα και τη γωνία μεταξύ των αξόνων.

Οι τοπολογικές σχέσεις ορίζονται ανεξάρτητα από τη θέση, τον προσανατολισμό, το σχήμα και το μέγεθος των αντικειμένων. Επομένως, παραμένουν αμετάβλητες κάτω από οποιοδήποτε μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων. Επιπλέον, οι τοπολογικές σχέσεις παραμένουν αμετάβλητες και κάτω από παραμορφώσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8. Παραδείγματα αμετάβλητων τοπολογικών σχέσεων (Molenaar, 1995)

3.6. ΦΥΣΗ ΧΩΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών μπορούν να εισαχθούν δεδομένα από πολλές και διαφορετικές πηγές, και με διάφορες μεθόδους και τεχνολογίες διαχείρισης τους μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους. Τα κυριότερα ζητήματα που επηρεάζουν τη συλλογή και τη συσχέτιση αυτών των δεδομένων είναι :

- Ο ορισμός ενός συστήματος αναφοράς. Πριν τη δημιουργία της βάσης δεδομένων είναι απαραίτητος ο ορισμός του γεωδαιτικού *Datum* (ελλειψοειδές αναφοράς) και η επιλογή της κατάλληλης προβολής (Μερκατορική, σύστημα UTM-6°, κλπ.) για την

αναπαράσταση των γεωγραφικών συντεταγμένων (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) σε ένα επίπεδο χάρτη (X, Y).

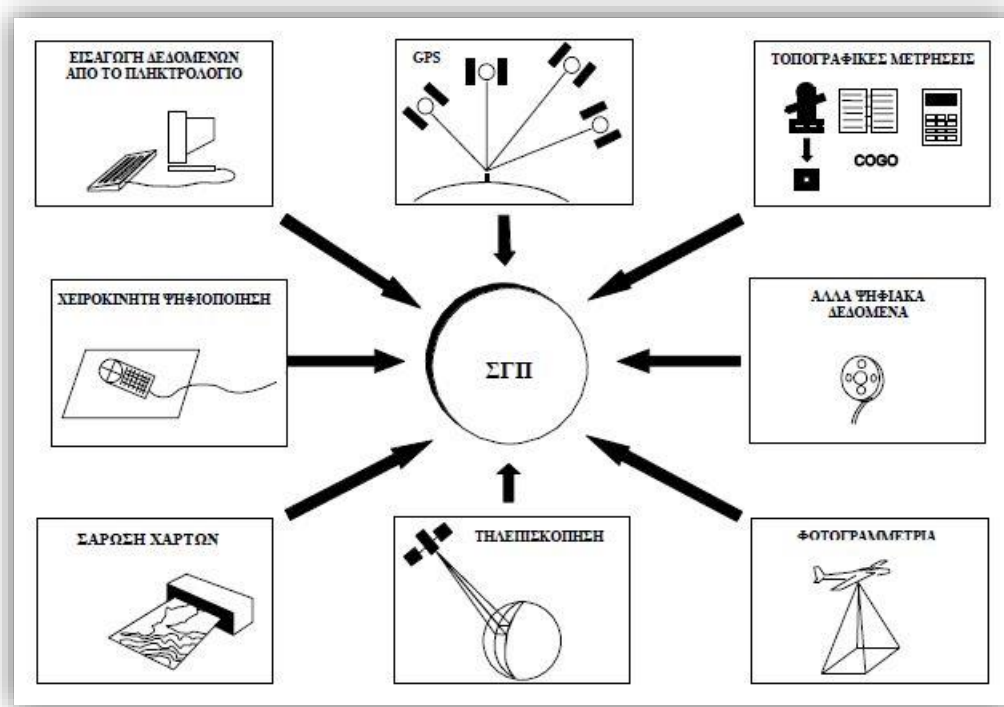
- Η αναφορά της κλίμακας. Παρόλο που τα ψηφιακά δεδομένα είναι τυπικά ανεξάρτητα της κλίμακας, η αναφορά στην κλίμακα χρησιμεύει ως δείκτης της ακρίβειας των δεδομένων. Όταν σε μια Βάση Δεδομένων συμπεριλαμβάνονται δεδομένα από διαφορετικές πηγές, χάνεται κάθε πληροφορία για την αρχική τους ακρίβεια. Επομένως κρίνεται αναγκαία:
 - (α) η ανάπτυξη μέτρων ακρίβειας και ελέγχων αξιοπιστίας
 - (β) η περιγραφή της πηγής και ακρίβειας των γεωγραφικών στοιχείων της Βάσης Δεδομένων.
- Η συσχέτιση των διανυσματικών (*vector*) και κανονικοποιημένων (*raster*) δεδομένων. Τα σύγχρονα συστήματα περιλαμβάνουν αυτόματα ή ημιαυτόματα εργαλεία για τη *vector/raster* μετατροπή και τη σύνδεση των κανονικοποιημένων και διανυσματικών δεδομένων.
- Η επαναδειγματοληψία για την επίλυση του προβλήματος του διαφορετικού μεγέθους των *pixels* και της διαφορετικής αρχής, προβολής και προσανατολισμού των κανονικοποιημένων δεδομένων. (*Αρχές Γεωπληροφορικής, Κάβουρας Μ., 2004*)

3.7. ΠΗΓΕΣ ΧΩΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα γεωγραφικά δεδομένα μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές πηγές δεδομένων, οι οποίες θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν είτε ως πρωτογενείς, είτε ως δευτερογενείς. Οι πρωτογενείς πηγές γεωγραφικών δεδομένων είναι εκείνες που προέρχονται από άμεσες μετρήσεις ενώ οι δευτερογενείς είναι εκείνες που έχουν ήδη συλλεγεί και βρίσκονται σε μορφή που δεν εξυπηρετεί τους στόχους μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Παρακάτω παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 και στην Εικόνα 3.9 τυπικά παραδείγματα πηγών για διανυσματικά και ψηφιδωτά δεδομένα.

Πίνακας 3.1. Πηγές ψηφιδωτών και διανυσματικών δεδομένων.

ΠΗΓΕΣ		
	Πρωτογενείς	Δευτερογενείς
Διανυσματικών δεδομένων	τοπογραφικές μετρήσεις	ψηφιοποίηση χαρτών
	μετρήσεις GPS	μετατροπή ψηφιδωτών σε διανυσματικά
Ψηφιδωτών δεδομένων	δορυφορικές εικόνες	σάρωση αναλογικών χαρτών
	ψηφιακές αεροφωτογραφίες	σάρωση αεροφωτογραφιών

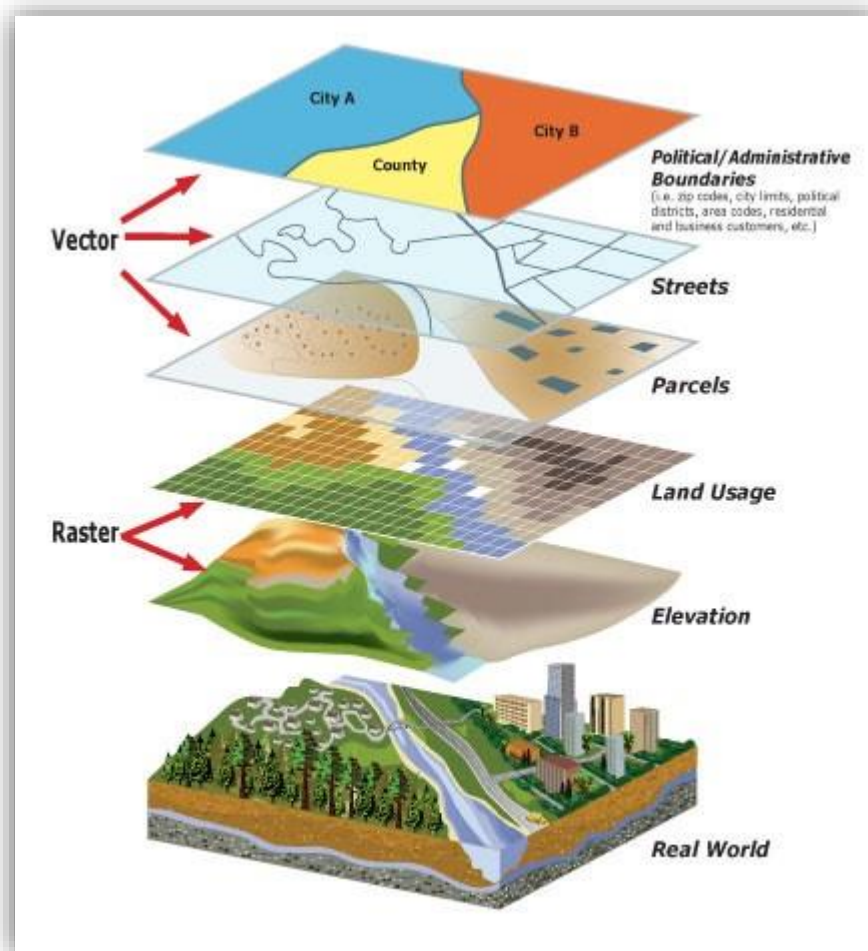


Εικόνα 3.9. Πηγές δεδομένων για τα Σ.Γ.Π, (Αρχές Γεωπληροφορικής, Μ.Κάβουρας,2004)

3.8. ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Σ.Γ.Π

Τα δεδομένα ανεξάρτητα της δομής τους και της πηγής τους σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών συχνά οργανώνονται σε πληροφοριακά επίπεδα (*layers*) τα οποία αφορούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή (Εικόνα 3.10). Το καθένα από αυτά τα επίπεδα περιλαμβάνει είτε δεδομένα στην αρχική τους μορφή (π.χ τοπογραφικές μετρήσεις) είτε επεξεργασμένες θεματικές πληροφορίες (π.χ τύπος εδαφών, ανάγλυφο κτλ).

Κύριο χαρακτηριστικό σε αυτή τη λογική των επιπέδων είναι η ύπαρξη ενός κοινού συστήματος αναφοράς, ώστε να καθίσταται δυνατή η συνδυαστική αξιοποίηση τους, ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη.



Εικόνα 3.10. Οργάνωση των δεδομένων σε θεματικά επίπεδα, (www.seos-project.eu)

3.9. ArcGIS Desktop

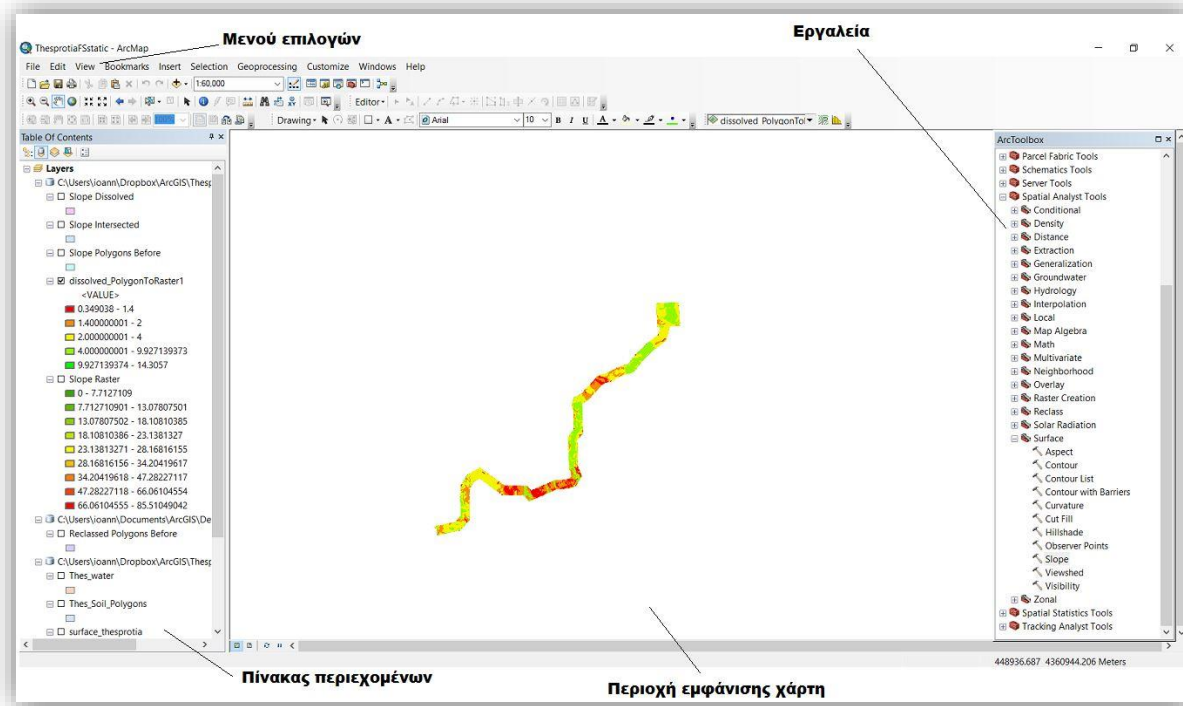
Για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκε είναι το *ArcGIS Desktop 10.2.2*. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον διαχείρισης χαρτών και γεωγραφικών βάσεων δεδομένων, και υπάρχει σε τρεις εκδόσεις που αναφέρονται σε *Basic*, *Standard* και *Advance*, οι οποίες βασίζονται στις ίδιες αρχές και λειτουργούν παρόμοια, διαφέροντας μόνο στις δυνατότητες που παρέχει η κάθε μία. Κάθε έκδοση περιέχει τις εξής τρεις βασικές εφαρμογές : *ArcMAP*, *ArcCatalog*, *Geoprocessing* (*ArcToolbox*, *Model-Builder*, *Python Toolbox*), καθώς και μια σειρά από προαιρετικά προϊόντα όπως : *Spatial Analyst*, *3D Analyst*, *Geostatistical Analysis*. Στη συνέχεια της ενότητας αυτής παρουσιάζονται οι δυνατότητες και οι λειτουργίες που παρέχει το *ArcGIS* σε κάθε χρήστη και γνώστη Γεωγραφικών Βάσεων Δεδομένων.

3.9.1. ArcMAP

Το *ArcMAP*, όπως υποδηλώνει και το όνομα αφορά εφαρμογές, που σχετίζονται με χάρτες (*Map*). Πιο συγκεκριμένα το *ArcMAP* δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν χάρτες από επίπεδα χωρικής πληροφορίας, να αναλυθούν χωρικές σχέσεις και να επιλεγούν μέσα από αναζητήσεις χωρικά και μη χωρικά στοιχεία. Επίσης μπορούν να σχεδιαστούν και να δημιουργηθούν διαφορετικές απεικονίσεις ενός χάρτη, αλλάζοντας χρώματα και συμβολισμό. (*Εφαρμογές του ArcGIS*, Κ.Κουτσόπουλος, 2005)

Για την πραγματοποίηση διάφορων αναλύσεων και τη δημιουργία νέων επιπέδων πληροφοριών, το *ArcMAP* διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων (*ArcToolbox*), συγκεντρωμένα σε θεματικές εργαλειοθήκες. Ανάλογα με το επίπεδο αγορασμένης άδειας καθορίζονται και τα διαθέσιμα εργαλεία.

Στην Εικόνα 3.11. παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του *ArcMAP*, το οποίο αποτελείται από τον πίνακα περιεχομένων, την περιοχή εμφάνισης του χάρτη, τη ράβδο μηνυμάτων καθώς και τα διάφορα εργαλεία και το μενού επιλογών.

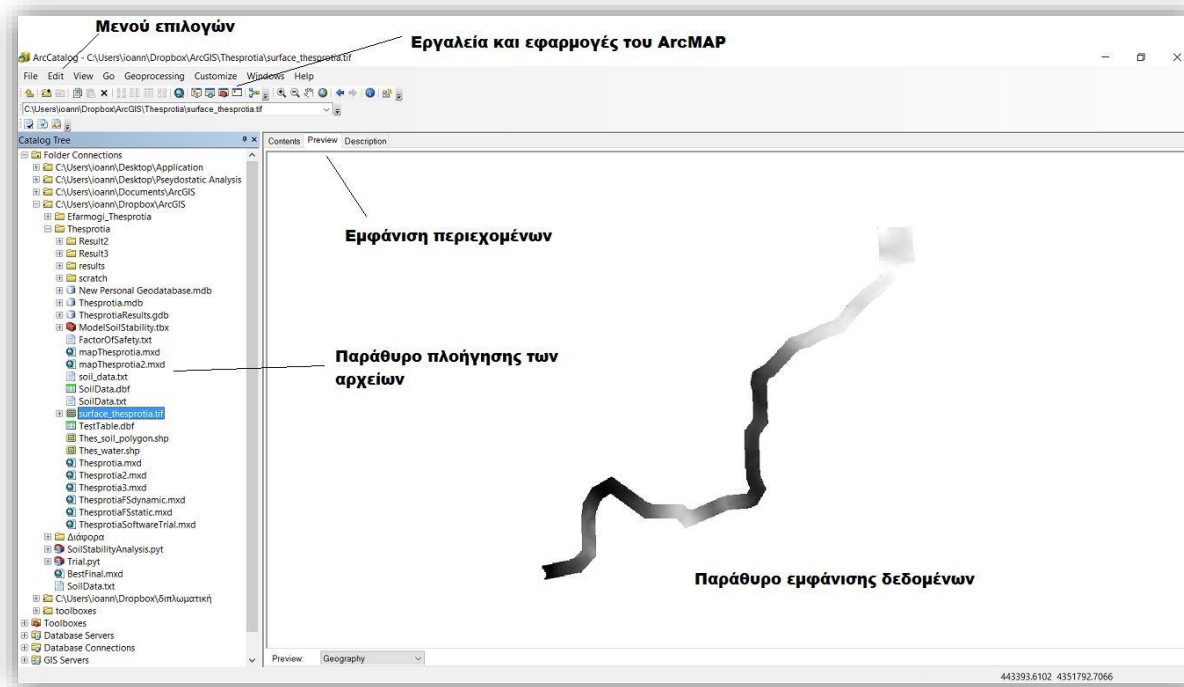


Εικόνα 3.11. Περιβάλλον εφαρμογής ArcMAP του ArcGIS Desktop 10.2.2

3.9.2. ArcCatalog

Το *ArcCatalog* είναι μια εφαρμογή διαχείρισης γεωγραφικών δεδομένων. Εκτελεί παρόμοιες λειτουργίες με τον Windows Explorer, προσανατολισμένο όμως στα γεωγραφικά δεδομένα. Με το *ArcCatalog* μπορεί να γίνει διερεύνηση και διαχείριση χωρικών δεδομένων που υπάρχουν στο δίσκο του Η/Υ, σε ένα τοπικό δίκτυο ή στο διαδίκτυο. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να γίνει εύκολα διαγραφή, αντιγραφή ή μετονομασία ενός θεματικού επιπέδου ή ενός συνόλου δεδομένων, ακόμη και να δημιουργήσει νέα δεδομένα. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι δίνει τη δυνατότητα παρουσίασης τα δεδομένων στην οθόνη με όλη την πληροφορία που περιέχουν, ώστε να μπορεί ο χρήστης να βλέπει συνολικά τα δεδομένα του και να επιλέγει τι από αυτά θα χρησιμοποιήσει στο *ArcMAP* για περαιτέρω ανάλυση. (*Εφαρμογές του ArcGIS, Κ.Κουτσόπουλος, 2005*)

Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του *ArcCatalog* το οποίο περιλαμβάνει ένα παράθυρο εμφάνισης γεωγραφικών δεδομένων, ένα παράθυρο όπου ο χρήστης μπορεί να πλοηγηθεί στη δενδρική δομή των αρχείων του συστήματος του, ένα μενού επιλογών και πολλά εργαλεία πλοήγησης, γεωγραφίας και μεταδεδομένων.



Εικόνα 3.12. Περιβάλλον εφαρμογής *ArcCatalog* του *ArcGIS Desktop 10.2.2*

Στο σημείο αυτό καθώς, το *ArcCatalog* αποτελεί το κομμάτι του συστήματος του *ArcGIS* που είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των δεδομένων, αξίζει να αναφερθούν όλοι οι τύποι αρχείων και δεδομένων που υποστηρίζει. Κάθε αρχείο έχει το δικό του χαρακτηριστικό εικονίδιο και χρώμα.

✓ Ομάδα οντοτήτων (feature class)

Ο συνδυετικός κρίκος για τη διαχείριση όλων των αρχείων του *ArcGIS* είναι η ομάδα οντοτήτων, η οποία ορίζεται ως ένα σύνολο οντοτήτων (σημεία, γραμμές, πολύγωνα) που αντιπροσωπεύουν γεωγραφικά αντικείμενα. Επομένως το καθοριστικό μιας ομάδας οντοτήτων είναι η γεωμετρία και όχι ο αριθμός των οντοτήτων που περιλαμβάνει ή οτιδήποτε άλλο. (Εφαρμογές του *ArcGIS*, Κ.Κουτσόπουλος, 2005)

✓ Πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών

Οι ομάδες οντοτήτων που συνήθως καλούνται και επίπεδα (*layers*) αποθηκεύονται σε πίνακες της βάσης δεδομένων που αποτελούνται από γραμμές και στήλες οντοτήτων και ονομάζονται Πίνακες Περιγραφικών Χαρακτηριστικών. Κάθε γραμμή περιέχει μια οντότητα (εγγραφή) και

κάθε στήλη (πεδίο) περιέχει μια ιδιότητα της οντότητας ή όπως καλείται πιο συχνά ένα περιγραφικό χαρακτηριστικό (*attribute*). Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη τομή μιας στήλης με μια γραμμή καλούνται τιμές (*values*). Οι πίνακες Γεωγραφικών δεδομένων διαφέρουν από τους μη Γεωγραφικούς πίνακες, λόγω της παρουσίας μιας επιπλέον στήλης (*shape column*) στην οποία αποθηκεύεται η μορφή ή η γεωμετρία της οντότητας (σημείο, γραμμή, πολύγωνο). Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται ένα πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών, ο οποίος περιέχει τους γεωλογικούς σχηματισμούς μιας περιοχής.

Ταυτότητα αντικειμένου

Πεδία

OBJECTID	Shape	Id	Soil_type	γ	α	φ	Shape_Length	Shape_Area
1	Polygon	4	flysch	20	30	30	872.098163	42542.527532
2	Polygon	3	clay-sand	18	35	22	1080.004547	68000.013023
3	Polygon	1	rock1	22	80	35	3637.513617	312304.136987
4	Polygon	2	clay-silt	19	5	28	1800.004447	140000.420382
5	Polygon	5	alluvial	20	5	30	3323.115246	289468.653207
6	Polygon	6	flysch	20	30	30	702.429939	29917.634242
7	Polygon	7	breccia	22	50	30	1500.632106	110063.210197
8	Polygon	8	rock1	22	80	35	2196.672912	179704.444839
9	Polygon	9	marl	20	35	22	1508.494684	110295.551416
10	Polygon	10	clay1	18	15	25	699.885457	29988.535408
11	Polygon	11	marl	20	35	22	1100.114708	70011.480054
12	Polygon	12	rock1	22	80	35	2000.000106	159999.979832
13	Polygon	13	marl	20	35	22	800.000063	40000.014304
14	Polygon	14	clay2	20	12	28	599.000042	19899.998275
15	Polygon	15	silt	19	5	28	698.068345	29951.195659
16	Polygon	16	rock2	22	15	35	2010.948642	246170.13065

Εγγραφή

Γεωμετρία οντότητας

Περιγραφικό χαρακτηριστικό

Τιμή πεδίου

Εικόνα 3.13. Πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών (*Attribute Table*) γεωλογικών πολυγώνων

✓ Σχηματικά αρχεία (*Shape files*)

Ένα σχηματικό αρχείο (*.shp*) είναι η φυσική μορφή που μπορεί να διαχειριστεί το ArcGIS. Αποτελεί μία μη τοπολογική μορφή για την αποθήκευση χωρικής και περιγραφικής πληροφορίας. Τα γεωγραφικά δεδομένα μέσω ενός σχηματικού αρχείου αντιπροσωπεύονται από σημεία, γραμμές ή πολύγωνα (μία ομάδα οντοτήτων κάθε φορά).

✓ Γεωβάση δεδομένων (Geodatabase)

Μια γεωβάση αποτελεί μια ειδική μορφή δεδομένων ειδικά σχεδιασμένη για το ArcGIS, και αποτελείται από ένα σύνολο ομάδων οντοτήτων. Υπάρχουν δύο ειδών γεωβάσεις, οι προσωπικές (*personal geodatabase*) και οι πολλών χρηστών (*geodatabase*). Οι προσωπικές γεωβάσεις υποστηρίζουν πολλούς χρήστες για χρήση και μόνο έναν για διόρθωση. Γενικά, χωρικά μαζί με περιγραφικά χαρακτηριστικά αποθηκεύονται σε πίνακες της *Microsoft Access* και με τον τρόπο αυτό μπορούν να είναι διαχειρίσιμες χωρίς τη χρήση άλλου λογισμικού. Οι γεωβάσεις πολλών χρηστών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να διορθωθούν από πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, απαιτούν όμως την ύπαρξη ενός *DBMS*, όπως *Oracle* και *SQL server*.

✓ Ψηφιδωτά αρχεία (Grids)

Τα αρχεία αυτά αποτελούνται από πλεγματικά ή ψηφιδωτά δεδομένα (*raster*), κατάλληλα για την περιγραφή γεωγραφικών φαινομένων τα οποία διαφέρουν συνεχώς στον χώρο, όπως τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους.

✓ Εικόνες (Images)

Σε ένα *ArcGIS* περιβάλλον μπορούν να προστεθούν αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και σαρωμένα έντυπα. Με τη σωστή γεωμετρική διόρθωση τους αυτές οι εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόβαθρα για την παραγωγή σχηματικών αρχείων.

✓ Αρχεία Χωρικής Απεικόνισης (CAD Αρχεία)

Στο περιβάλλον του *ArcGIS* μπορούν να εισαχθούν αρχεία σχεδιαστικά από *Autocad* λογισμικό, οποιασδήποτε έκδοσης.

3.9.3. ArcToolbox

Το *ArcToolbox* αποτελεί το κομμάτι του *ArcGIS* που περιέχει διάφορα εργαλεία γεωεπεξεργασίας, μετατροπής και διαχείρισης δεδομένων και άλλων πολλών εργασιών. Με τον όρο γεωεπεξεργασία εννοείται η διαδικασία μετάβασης από τα στοιχεία στην πληροφορία. Τα εργαλεία του *ArcToolbox* είναι δομημένα σε εργαλειοθήκες και μπορούν να διαχειρίζονται όλες τις μορφές δεδομένων που μπορεί να περιέχει το *ArcGIS*. Ορισμένες εργαλειοθήκες του *ArcToolbox* παρουσιάζονται στη συνέχεια.

✓ Analysis Tools

Περιέχει τα κατεξοχήν εργαλεία χωρικής ανάλυσης, παρέχοντας τη δυνατότητα ανάλυσης μεταξύ των Γεωγραφικών οντοτήτων μιας περιοχής. Στην ουσία πρόκειται για την κατεξοχήν δυνατότητα του *GIS* και επομένως χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε όλες σχεδόν τις εργασίες των *GIS*. Χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, εργαλεία εξαγωγής, εργαλεία αλληλεπίθεσης, εγγύτητας και στατιστικής. (*Εφαρμογές του ArcGIS, Κ.Κουτσόπουλος, 2005*)

✓ Spatial analyst tools

Τα εργαλεία αυτά παρέχουν τη δυνατότητα στον χρήστη για τη δημιουργία και διαχείριση χωρικών δεδομένων. Επίσης δίνουν τη δυνατότητα για μαθηματικές πράξεις μεταξύ τους, καθώς και τη δημιουργίας επιφανειών για ειδικές εφαρμογές, όπως περιοχές κάλυψης ορατότητας, κλίσεων, επαναταξινόμησης κ.λ.π. Τα εργαλεία του *Spatial analyst* είναι χρήσιμα καθώς βοηθούν στη λήψη αποφάσεων.

✓ Data Management tools

Είναι μία συλλογή από εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση γεωγραφικών και περιγραφικών δεδομένων, προετοιμάζοντας τα για χωρική και περιγραφική ανάλυση. Χαρακτηριστικά είναι τα εργαλεία προβολής (*Projection and Transformations*) και τα εργαλεία διαχείρισης πεδίων των πινάκων περιγραφικών χαρακτηριστικών.

3.9.4. ModelBuilder

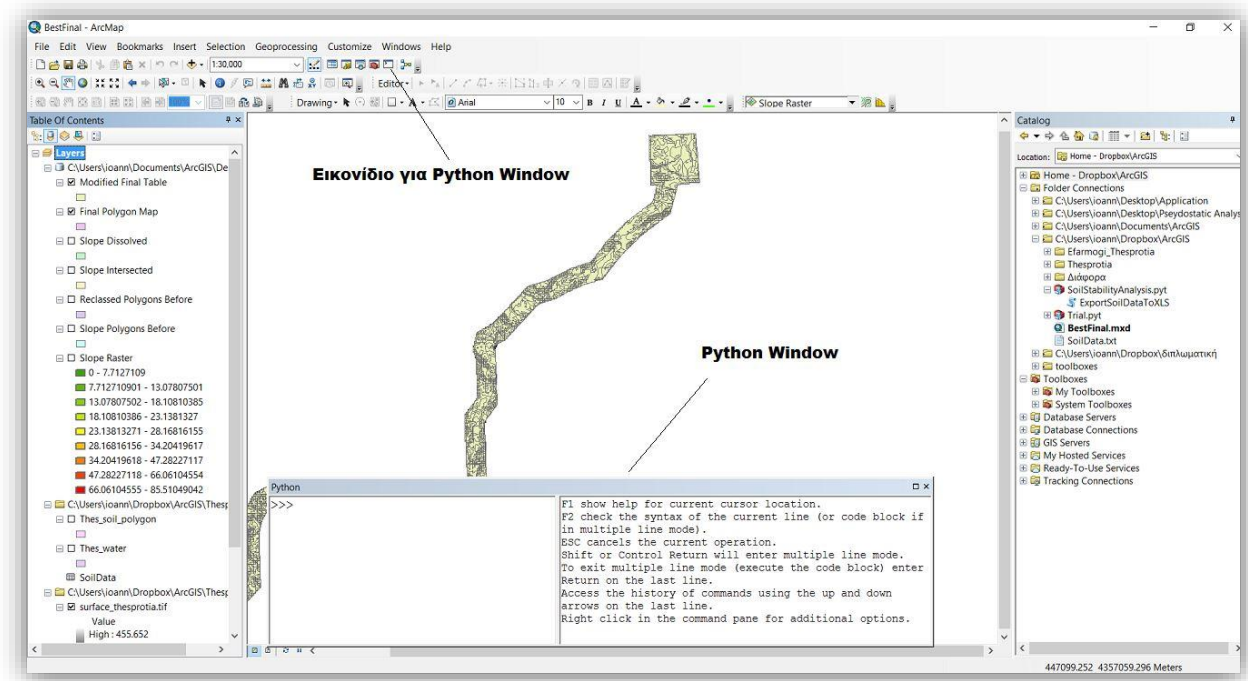
Με το *ModelBuilder* δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων που αποτελούνται από ακολουθίες εργαλείων του *ArcGIS*. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν επί της ουσίας αυτοματοποιημένη χρήση εργαλείων και μπορούν να τρέχουν κάθε φορά με διαφορετικά δεδομένα. Στην Εικόνα παρουσιάζεται ένα παράθυρο χρήσης του *ModelBuilder*, όπου με οβάλ σχήμα είναι τα δεδομένα και σε πολυγωνική μορφή τα εργαλεία.

3.9.5. Python Toolbox

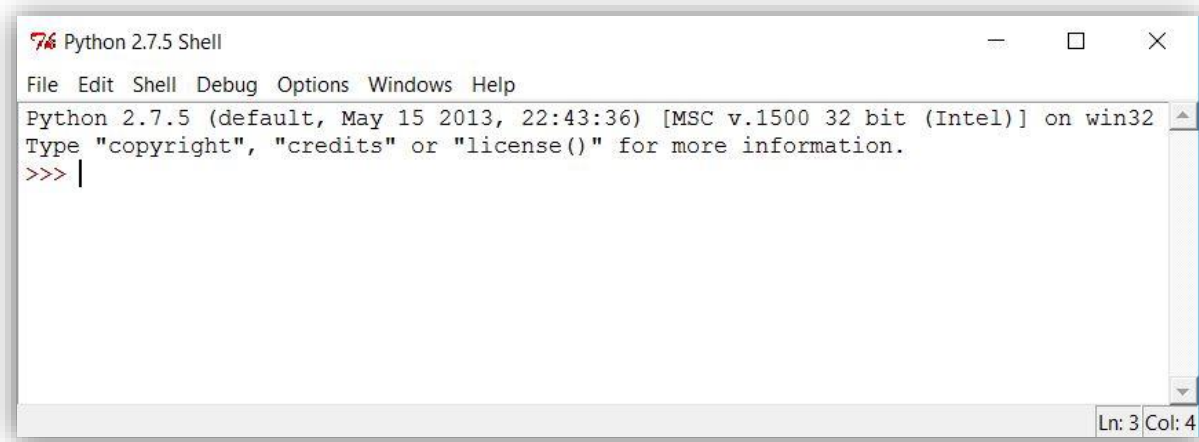
Το *ArcGIS Desktop* έχει ενσωματωμένη στο σύστημα του τη γλώσσα προγραμματισμού *Python*, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο σε προγραμματιστές να αναπτύσσουν τα δικά τους εργαλεία επεξεργασίας γεωγραφικών δεδομένων. Τα εργαλεία αυτά μπορεί να είναι, είτε *script tool* είτε *Python Toolbox*. Η λειτουργία τους είναι ακριβώς ίδια ενώ ο τρόπος δημιουργίας τους

είναι αυτός που διαφέρει. Τα *Python Toolbox* ανήκουν στη νέα γενιά εργαλείων και ο τρόπος δημιουργίας τους είναι πολύ πιο απλός και δομημένος.

Η ανάπτυξη του κώδικα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με το εργαλείο *IDLE (Python GUI)* (Εικόνα 3.15) που εγκαθίσταται μαζί με το *ArcGIS Desktop* είτε μέσω ενός *Python window* (Εικόνα 3.14) που είναι ενσωματωμένο στο περιβάλλον του *ArcMAP*. Πριν αναλυθεί εκτενέστερα η δυνατότητα δημιουργίας εργαλείων με τη χρήση της *Python* θα αναφερθούν κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά της γλώσσας αυτή.



Εικόνα 3.14. Python Window ενσωματωμένο στο ArcMAP 10.2.2



Εικόνα 3.15. Κειμενογράφος Python IDLE (GUI) του ArcGIS Desktop 10.2.2

✓ Python

Η *Python* είναι μια απλή, αλλά ταυτόχρονα ισχυρή γλώσσα προγραμματισμού χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις στη σύνταξη και στη δομή της. Η ευκολία στη χρήση της δίνει τη δυνατότητα στον προγραμματιστή να επικεντρώνεται στη καλύτερη δυνατή λύση του προβλήματος του. Αποτελεί μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού η οποία δημιουργήθηκε από τον Ολλανδό Γκβίντο βαν Ρόσσομ (*Guido van Rossum*) το 1990.

Η *Python* είναι ένα παράδειγμα ΕΛΛΑΚ (Ελεύθερο Λογισμικό και Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα). Με απλά λόγια, μπορούν να διανέμονται αντίγραφα του λογισμικού, να υπάρχει πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα, να πραγματοποιούνται αλλαγές σε αυτόν και να χρησιμοποιούνται κομμάτια του σε νέα ελεύθερα προγράμματα.

Λόγω του ανοικτού της κώδικα, η *Python* έχει υλοποιηθεί (δηλαδή αλλάχθηκε για να λειτουργεί) σε πολλές πλατφόρμες. Όλα τα *Python* προγράμματα μπορούν να δουλέψουν σε οποιαδήποτε πλατφόρμα χωρίς να χρειάζονται καθόλου αλλαγές. Η *Python* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε *Linux*, *Windows*, *FreeBSH*, και άλλες πολλές πλατφόρμες.

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να αναφερθεί περιληπτικά ο τρόπος με τον οποίο τα προγράμματα μετουσιώνονται σε μία επαφή-διάλογο του χρήστη με τον υπολογιστή. Το προγράμματα αποτελούνται από εντολές οι οποίες γράφονται σε έναν απλό επεξεργαστή κειμένου, συνήθως στην Αγγλική γλώσσα. Ο υπολογιστής όμως κατανοεί μόνο τη γλώσσα μηχανής (σειρές από 0 και 1). Υπάρχουν δύο τρόποι για να δημιουργηθεί γλώσσα μηχανής από τις εντολές του επεξεργαστή κειμένου, είτε μεταφράζοντας όλο τον πηγαίο κώδικα σε

γλώσσα μηχανής μέσω ενός μεταφραστή (Υποενότητα 5.2.3) είτε τρέχοντας απευθείας τον κώδικα χωρίς μετάφραση όπως η *Python*. Πιο συγκεκριμένα η *Python* μετατρέπει τον πηγαίο κώδικα σε μια ενδιάμεση μορφή που ονομάζεται *bytecode* και μετά το μεταφράζει στη γλώσσα του Η/Υ και το τρέχει. Οι γλώσσες προγραμματισμού που λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο, καλούνται διερμηνευόμενες. Οπότε η *Python* πρόκειται για μία διερμηνευόμενη γλώσσα.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της *Python* είναι πως μπορεί να υποστηρίζει τόσο το διαδικασιοστρεφή προγραμματισμό (*procedure-oriented*) όσο και τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό (*object-oriented*). Στο διαδικασιοστρεφή προγραμματισμό, το πρόγραμμα δομείται πάνω σε διαδικασίες ή συναρτήσεις οι οποίες δεν είναι τίποτα άλλο από επαναχρησιμοποιούμενα κομμάτια από προγράμματα. Στις αντικειμενοστραφείς γλώσσες, τα προγράμματα δομούνται πάνω σε αντικείμενα τα οποία συνδυάζουν δεδομένα και λειτουργικότητα. Η *Python* έχει έναν πολύ ισχυρό αλλά πολύ απλό τρόπο για αντικειμενοστραφή προγραμματισμό.

Τέλος η πρότυπη βιβλιοθήκη της *Python* είναι πολύ μεγάλη και ελεύθερη στην πρόσβαση. Περιέχει έναν τεράστιο αριθμό από αρθρώματα ή αλλιώς πακέτα τα οποία μπορούν να εισαχθούν και να χρησιμοποιηθούν στον κώδικα. Μερικά πακέτα είναι τα *time*, *sys*, *os* και *math* όπου το τελευταίο περιέχει τριγωνομετρικές συναρτήσεις.

✓ Arcpy (πακέτο)

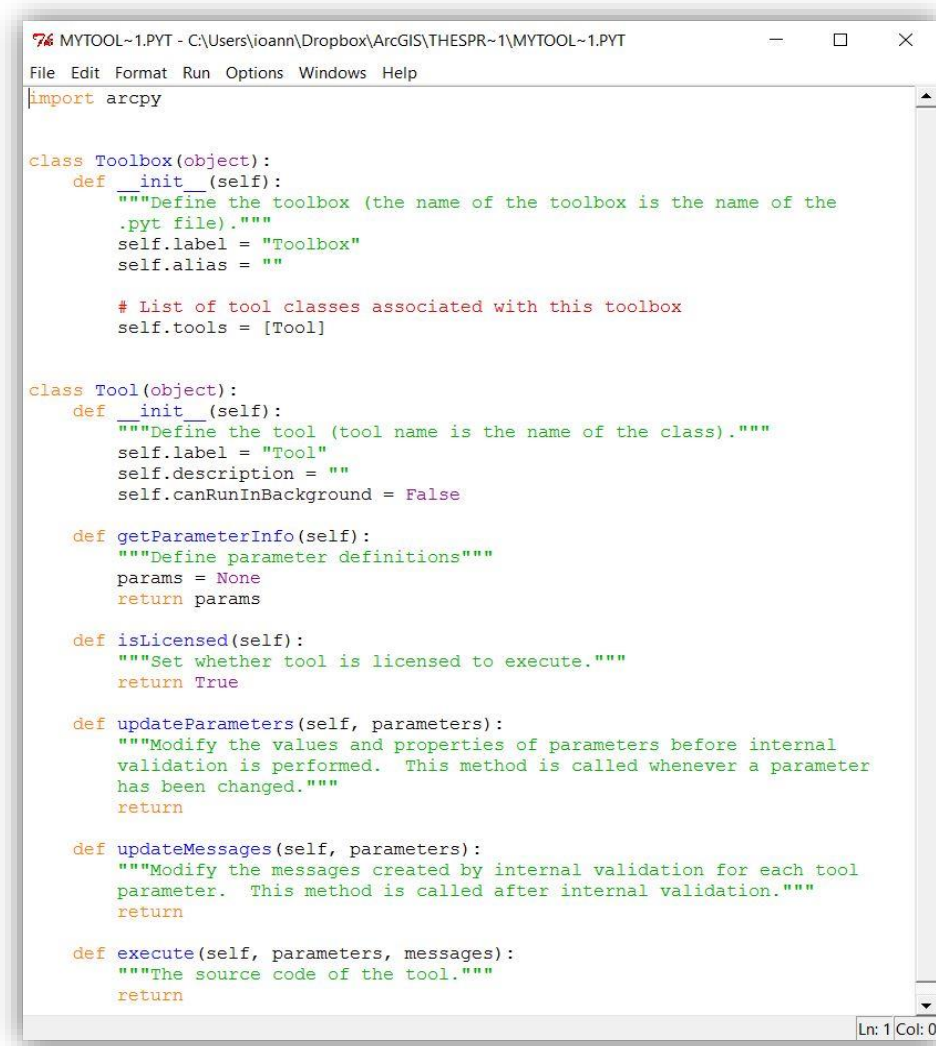
Ξεχωριστά πρέπει να αναφερθεί το πακέτο *arcpy* της πρότυπης βιβλιοθήκης της *Python*, το οποίο αποτελεί κομμάτι του *ArcGIS Desktop* και δίνει πρόσβαση σε κάθε χρήστη που προγραμματίζει μέσω των κειμενογράφων του *ArcGIS* στα εργαλεία γεωεπεξεργασίας του, σε επεκτάσεις, συναρτήσεις και διάφορες τάξεις για την επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων και τη δημιουργία εργαλείων. Το *arcpy* είναι ένα αντικειμενοστραφές πακέτο, το οποίο σημαίνει ότι όσα περιέχονται σε αυτό θεωρούνται μέθοδοι και ιδιότητες του. Αφού εισαχθεί στην το *arcpy* στον κώδικα, ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε όσα εργαλεία υποστηρίζει το είδος της άδειας του.

Λεπτομέρειες που αφορούν τη σύνταξη της γλώσσας παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

✓ Δημιουργία Python Toolbox

Η δημιουργία ενός *Python Toolbox* γίνεται στο περιβάλλον του *ArcMAP* και ο κώδικας γράφεται στον *IDLE* κειμενογράφο. Το *Python Toolbox* είναι μία εργαλειοθήκη η οποία περιέχει το εργαλείο ή τα εργαλεία που δημιουργεί ο χρήστης. Με τη δημιουργία του, δομείται αυτόματα

ένας σκελετός κώδικα στον *IDLE* όπου, η εργαλειοθήκη και το εργαλείο αντιμετωπίζονται ως τάξεις. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τον κώδικα δίνοντας στις τάξεις αυτές τα ονόματα των εργαλείων του, τις παραμέτρους του και στο κομμάτι της εκτέλεσης να γράψει τον κώδικα με τις διαδικασίες του εργαλείου. Το πακέτο *arcpy* ενσωματώνεται αυτόματα οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα εργαλεία γεωεπεξεργασίας. Στην Εικόνα 3.16 παρουσιάζεται η δομή που δημιουργείται αυτόματα κατά τη δημιουργία ενός *Python Toolbox*. Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία ενός *Python Toolbox*, μπορεί να προστεθεί στο *ArcToolbox* και να χρησιμοποιείται όπως τα υπόλοιπα εργαλεία του *ArcMAP*.



```
MYTOOL~1.PYT - C:\Users\ioann\Dropbox\ArcGIS\THESPR~1\MYTOOL~1.PYT
File Edit Format Run Options Windows Help
import arcpy

class Toolbox(object):
    def __init__(self):
        """Define the toolbox (the name of the toolbox is the name of the
        .pyt file)."""
        self.label = "Toolbox"
        self.alias = ""

        # List of tool classes associated with this toolbox
        self.tools = [Tool]

class Tool(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = "Tool"
        self.description = ""
        self.canRunInBackground = False

    def getParameterInfo(self):
        """Define parameter definitions"""
        params = None
        return params

    def isLicensed(self):
        """Set whether tool is licensed to execute."""
        return True

    def updateParameters(self, parameters):
        """Modify the values and properties of parameters before internal
        validation is performed. This method is called whenever a parameter
        has been changed."""
        return

    def updateMessages(self, parameters):
        """Modify the messages created by internal validation for each tool
        parameter. This method is called after internal validation."""
        return

    def execute(self, parameters, messages):
        """The source code of the tool."""
        return
```

Εικόνα 3.16. Έτοιμη δομή κώδικα ενός *Python Toolbox* σε *IDLE* κειμενογράφο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πρηνή ορίζονται ως φυσικοί ή τεχνητοί κεκλιμένοι σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Τα φυσικά πρηνή δημιουργούνται από φυσικές διεργασίες, κυρίως της διάβρωσης, ο σχηματισμός τους είναι βαθμιαίος και απαιτεί μεγάλη χρονική περίοδο (Εικόνα 4.1.α). Αντίθετα, τα τεχνητά πρηνή (Εικόνα 4.1.β) είναι γεώδεις ανθρώπινες κατασκευές με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ανάλογα με τη χρήση τους και τα πιο συνηθισμένα είναι τα πρηνή των εκσκαφών, τα ορύγματα, τα επιχώματα, και τα χωμάτινα φράγματα.



Εικόνα 4.1.α: Φυσικό Πρηνές

Εικόνα 4.1.β : Τεχνητό πρηνές, Επίχωμα οδοποιίας

Τα πρηνή, είτε φυσικά είτε τεχνητά, σε οποιαδήποτε στιγμή μέσα στο χρόνο μπορεί να καταστούν ασταθή και να εξελιχθούν σε κατολισθήσεις. Σε απομακρυσμένες ακατοίκητες περιοχές οι κατολισθήσεις αυτές δεν αποτελούν κίνδυνο, αλλά ένα αναπόσπαστο κομμάτι της φυσικής αποσάθρωσης της επιφάνειας της γης. Σε άλλες όμως περιπτώσεις μπορεί να έχουν καταστρεπτικές συνέπειες σε ζωές και περιουσίες, ιδιαίτερα αν υπάρχουν κατασκευές πάνω στο πρηνές ή κάτω από αυτό.

Για την αποφυγή τέτοιων καταστροφών είναι πολύ σημαντικό για έναν μηχανικό να γνωρίζει πόσο πιθανή είναι η εκδήλωση τέτοιων κατολισθητικών φαινομένων και υπό ποιες συνθήκες μπορεί να συμβεί. Κατά το παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι ποσοτικής εκτίμησης του βαθμού ευστάθειας ενός πρανούς.

Στο κεφάλαιο αυτό, αφού αναφερθούν οι διάφοροι τύποι κατολισθήσεων και γίνει μια σύντομη αναδρομή στις μεθόδους υπολογισμού του βαθμού ευστάθειας που έχουν αναπτυχθεί στην ιστορία της εδαφομηχανικής, μελετάται σε βάθος η μέθοδος ανάλυσης ευστάθειας εδαφικών πρανών *Bishop 1955* υπό στατικές και υπό σεισμικές συνθήκες.

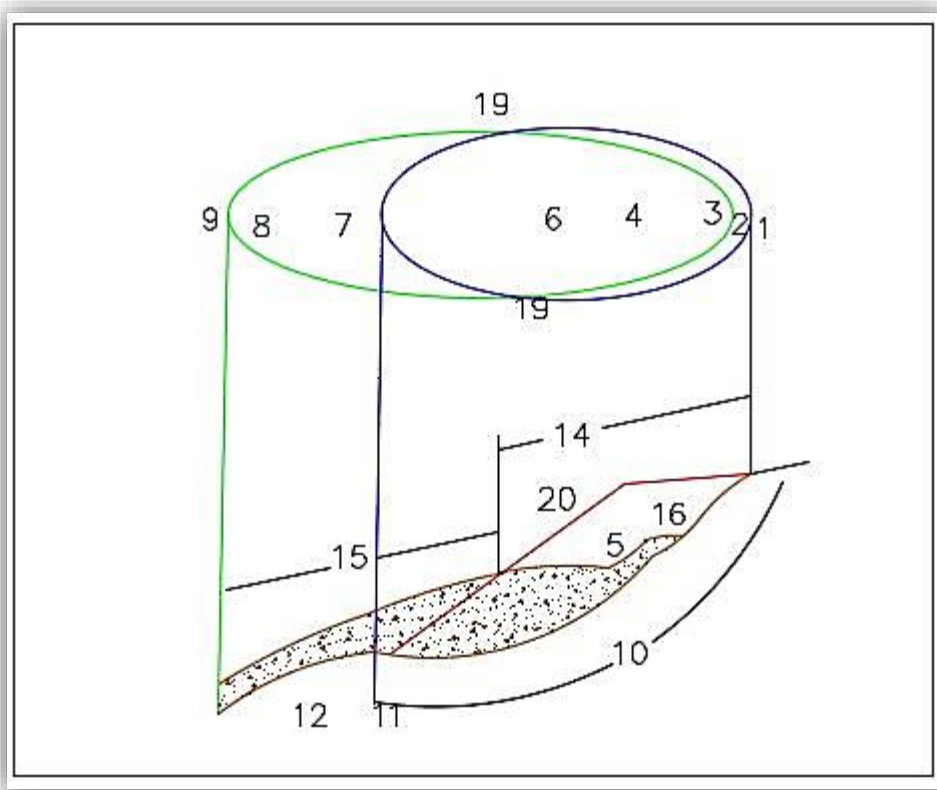
4.2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η ευστάθεια ενός φυσικού ή τεχνητού πρανούς εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής) των εδαφών που το αποτελούν, τη γεωμετρία του (ύψος και κλίση), και τις συνθήκες πίεσης πόρων μέσα σε αυτό.

Σε κάθε πρανές, οι δυνάμεις βαρύτητας που δημιουργούνται από το ύψος και την κλίση του, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις από την πιθανή παρουσία νερού μέσα στο έδαφος, δημιουργούν με τη σειρά τους διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του πρανούς, οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα του προς τα κάτω. Η δημιουργία των διατμητικών τάσεων ενεργοποιεί τη διατμητική αντοχή του εδάφους, η οποία αντιτίθεται στις τάσεις αυτές. Αν οι διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται υπερβούν την αντοχή του εδάφους, τότε το πρανές αστοχεί ή αλλιώς κατολισθαίνει.

4.2.1. Κατολισθήσεις

Οι κατολισθήσεις συμβαίνουν συνεχώς και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της συνεχής εξέλιξης του τοπίου. Ο τύπος της κατολίσθησης που συμβαίνει διαφέρει και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Πριν γίνει εκτενέστερη ανάλυση των διαφόρων τύπων κατολισθήσεων θα πραγματοποιηθεί μια περιγραφή των χαρακτηριστιών μιας τυπικής κατολίσθησης (διαστάσεις, ονοματολογία και γεωμετρία), όπως προκύπτουν από την Επιτροπή κατολισθήσεων της Διεθνούς Ένωσης Τεχνικής Γεωλογία (*IAEG Commission of Landslides*, 1990). Ακολουθούν σχετικός πίνακας και εικόνα. Οι αριθμοί της εικόνας είναι σε αντιστοιχία με αυτούς στον πίνακα.



Εικόνα 4.2.. Χαρακτηριστικά κατολισθήσεων: Κάτοψη μιας τυπικής κατολίσθησης, στην οποία η κόκκινη γραμμή δείχνει το ίχνος της επιφάνειας αστοχίας στην αρχική επιφάνεια εδάφους. Οι αριθμοί αναφέρονται στον πίνακα. (IAEG Commission of Landslides, 1990).

Πίνακας 4.1: Μέρη μιας τυπικής κατολίσθησης, (IAEG Commission of Landslides, 1990)

ΑΡΙΘΜΟΣ	ΟΝΟΜΑ	ΟΡΙΣΜΟΣ
1	Στέψη	Σχεδόν αμετακίνητο υλικό, δίπλα στ ψηλότερα σημεία της κύριας κλιτύος.
2	Κύρια τομή	Απότομη επιφάνεια στο αμετακίνητο έδαφος, στο επάνω μέρος της κατολίσθησης, η οποία προκαλείται από την κίνηση του μετατιθέμενου υλικού. Είναι ένα ορατό μέρος της επιφάνειας αστοχίας (10)
3	Κορυφή	Το ψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής(2)
4	Κεφαλή	Το ανώτερο μέρος της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής, μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και τη κύρια τομής (2)
5	Δευτερεύουσα τομή	Απότομη επιφάνεια στο μετατιθέμενο υλικό, που παράγεται από τις διαφορικές κινήσεις στο εσωτερικό του.
6	Κύριο σώμα	Μέρος του μετατιθέμενου υλικού που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας, μεταξύ της κύριας τομής (2) και του ποδός της επιφάνειας θραύσης (11)
7	Πόδι	Μέρος της κατολίσθησης, το οποίο κινήθηκε μπροστά από το μέτωπο της επιφάνειας αστοχίας (11) και βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20)
8	Αιχμή	Σημείο στο πόδι (9) το πιο απομακρυσμένο από την κορυφή(3) της κατολίσθησης.
9	Μέτωπο	Το κατώτερο, πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή (2) ανάγλυφο περιθώριο του μετατοπισμένου υλικού της κατολίσθησης
10	Επιφάνεια θραύσης	Επιφάνεια, η οποία σχηματίζει (ή έχει σχηματιστεί από) το κατώτερο όριο του μετατιθέμενου υλικού, κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20)
11	Μέτωπο της επιφάνειας θραύσης	Η τομή μεταξύ του χαμηλότερου τμήματος της επιφάνειας θραύσης (10) και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (20)
12	Επιφάνεια αποκόλλησης	Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (20) που υπερκαλύπτεται από το πόδι (7) της κατολίσθησης.
13	Μάζα κατολίσθησης	Υλικό μετατοπισμένο από την αρχική του θέση στην πλαγιά λόγω της κίνησης. Σχηματίζει τόσο την μάζα βύθισης (17) όσο και την μάζα διόγκωσης (18)
14	Ζώνη βύθισης	Περιοχή μιας κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20)

15	Ζώνη διόγκωσης	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20)
16	Βύθιση	Όγκος που περιορίζεται από την κύρια τομή (2), την μάζα βύθισης (17) και την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20)
17	Μάζα Βύθισης	Όγκος του μετατοπισμένου υλικού, που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας(10), αλλά κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20)
18	Διόγκωση	Όγκος του μετατοπισμένου υλικού (13) που βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους
19	Πτερύγια	Αμετακίνητο υλικό, δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας θραύσης (20). Για την περιγραφή των πτερυγίων προτιμώνται οι ενδείξεις της πυξίδας, διαφορετικά περιγράφονται ως δεξί ή αριστερό έχοντας ως στάση τη στέψη (1).
20	Αρχική επιφάνεια εδάφους	Επιφάνεια της πλαγιάς που υπήρχε πριν αρχίσει η κατολίσθηση

Αφού παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής κατολίσθησης, θα αναλυθούν οι διάφοροι τύποι κατολισθήσεων που μπορεί να υπάρχουν. Μέσα από ένα μεγάλο δείγμα κατολισθήσεων που έχουν καταγραφεί στην ιστορία, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι ταξινόμησής τους. Ο κυριότερος είναι αυτός που τις κατατάσσει ανάλογα με το είδος του υλικού που αστοχεί σε βραχώδεις (*rock*) και εδαφικές (*soil*) κατολισθήσεις. Ο βράχος ή αλλιώς πέτρωμα είναι μορφολογικά αυτοτελής σκληρή μάζα με καθορισμένη ορυκτολογική σύσταση. Το έδαφος αποτελείται από διαβρωμένα πετρώματα και χωρίζεται χονδρικά σε χώμα και κορήματα. Ως χώμα θεωρείται το έδαφος που περιέχει περισσότερο από 80% υλικό λεπτόκοκκο (ιλύς και άργιλος) με διάμετρο κόκκων μικρότερη από 2mm, και ως κορήματα θεωρείται το έδαφος με περιεκτικότητα 20%-80% σε χονδρόκοκκα (άμμος και χαλίκι) υλικά με διάμετρο κόκκου μεγαλύτερη των 2mm. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αναλύονται μόνο οι εδαφικές κατολισθήσεις.

Οι *Cruden & Varnes* το 1996 ταξινόμησαν τις κατολισθήσεις με βάση το είδος της κίνησης καθώς και με βάση την ταχύτητα με την οποία κατολισθαίνει η εδαφική μάζα. Ακολουθούν πίνακες με τους βασικούς τύπους των κατολισθήσεων (Πίνακας 4.2) και (Πίνακας 4.3), καθώς

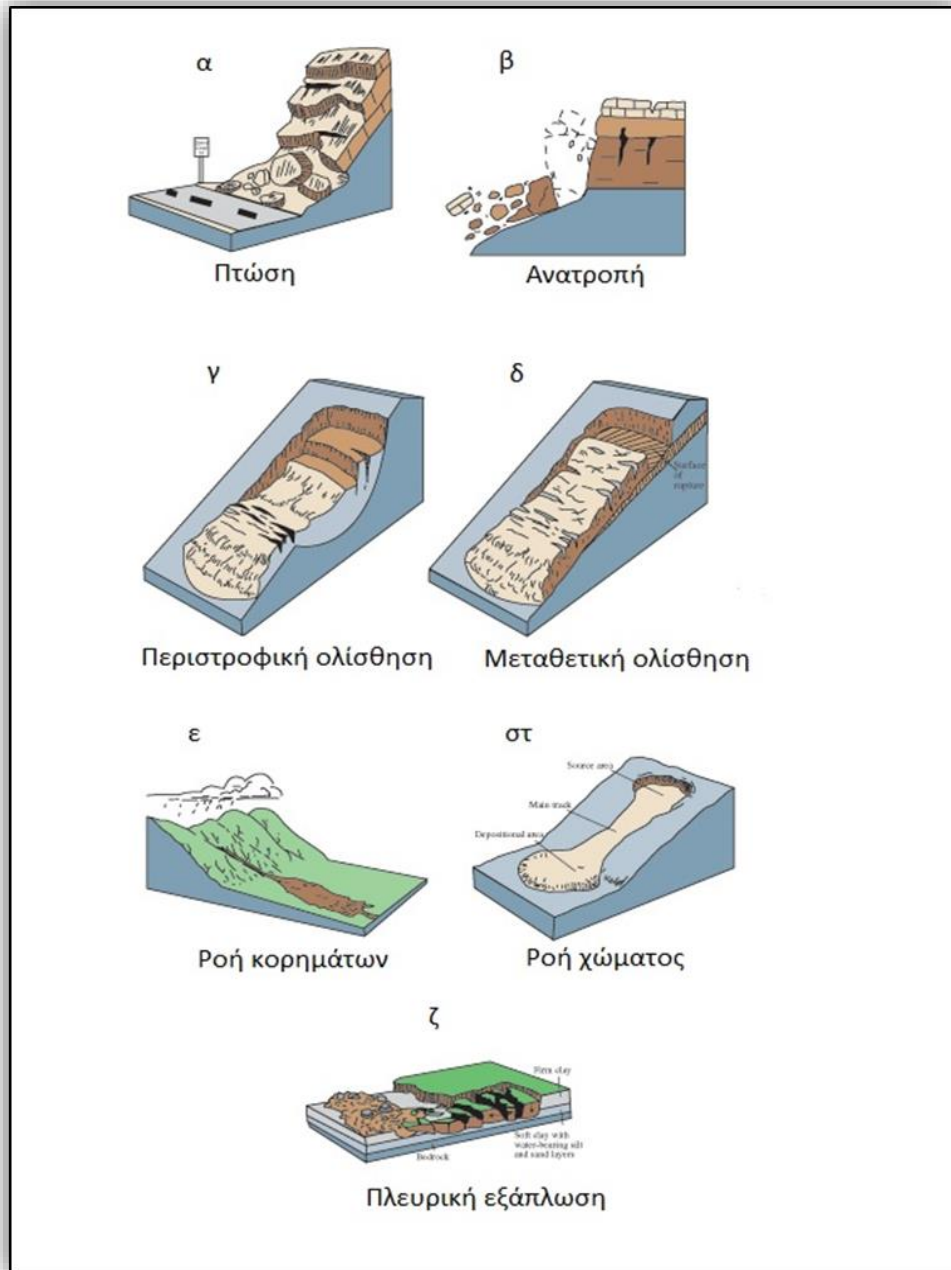
και σχετική εικόνα στην οποία φαίνονται οι πιθανοί τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα με το είδος κίνησης. (Εικόνα 4.3)

Πίνακας 4.2 . Τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα με το είδος της κίνησης (*Cruden & Varnes, 1996*)

Κίνηση	Εδάφη	
	Κυρίως Χονδροκόκκο	Κυρίως Λεπτόκοκκο
Πτώση	Πτώση Κατάλοιπων	Πτώση Χώματος
Ανατροπή	Ανατροπή Κατάλοιπων	Ανατροπή Χώματος
Ολίσθηση	Ολίσθηση Κατάλοιπων	Ολίσθηση Χώματος
Εξάπλωση	Εξάπλωση Κατάλοιπων	Εξάπλωση Χώματος
Ροή	Ροή Κατάλοιπων	Ροή χώματος

Πίνακας 4.3. Τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα με την ταχύτητα κίνησης (*Cruden & Varnes 1996*)

Τάξη Ταχύτητας	Περιγραφή	Ταχύτητα (mm/s)	Τυπική Ταχύτητα
7	Υπερβολικά Γρήγορη	$>5 \times 10^3$	
6	Αρκετά Γρήγορη	5×10^3	m/s
5	Γρήγορη	5×10^1	m/min
4	Μέσης Ταχύτητας	5×10^{-1}	m/h
3	Αργή	5×10^{-3}	m/month
2	Αρκετά Αργή	5×10^{-5}	m/year
1	Υπερβολικά Αργή	5×10	mm/year



Εικόνα 4.3. Επτά διαφορετικοί τύποι κατολισθήσεων σύμφωνα ανάλογα με τη κίνηση (Varnes, 1978)

✓ Πτώση (fall)

Πτώση είναι το είδος της κατολίσθησης στο οποίο αποκολλάται τμήμα συνεκτικού εδάφους (ή βράχου), από ένα απότομο πρανές κατά μήκος μίας επιφάνειας, στην οποία δεν υπάρχει διατμητική αντοχή ή είναι πολύ μικρή. Μετά την αποκόλληση ακολουθεί ελεύθερη πτώση της αστοχούσας εδαφικής μάζας και κύλιση στην πλαγιά. Η κίνηση αυτή είναι εξαιρετικά γρήγορη

και είναι δυνατόν να έχει προηγηθεί της πτώσης, μικρή ολίσθηση ή ανατροπή, κινήσεις οι οποίες οδήγησαν στον προοδευτική αποκόλληση του υλικού από την ακίνητη μάζα. (Εικόνα 4.3.α)

✓ Ανατροπή (topple)

Ανατροπή είναι η προς τα εμπρός περιστροφή μιας αποσπώμενης εδαφικής (ή βραχώδους) μάζας, γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής, ο οποίος βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μάζας. Η ανατροπή κυρίως προκαλείται από τη βαρύτητα, καθώς και από το νερό ή τον πάγο που βρίσκεται στις ρωγμές της μάζας. Συνήθως μετά από την ανατροπή ακολουθεί πτώση ή ολίσθηση, ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς και της αποσπώμενης εδαφικής μάζας. Η ταχύτητα της κίνησης μιας ανατροπής μπορεί να είναι από πάρα πολύ αργή μέχρι πάρα πολύ γρήγορη. (Εικόνα 4.3.β)

✓ Ολίσθηση (slide)

Ολίσθηση είναι η κίνηση της εδαφικής μάζας του πρανούς πάνω σε μία ή περισσότερες επιφάνειες αστοχίας εντός των ορίων μιας σχετικά λεπτής ζώνης έντονων διατμητικών τάσεων. Η κίνηση αυτή μπορεί να είναι ακαριαία (ταχεία) ή προοδευτική, με τα πρώτα σημάδια της να είναι ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος των οποίων σχηματίζεται η κύρια πλαγιά της ολίσθησης. Η μετακινούμενη μάζα μπορεί να παραμένει ενιαία κατά την ολίσθηση ή να διαχωριστεί σε μικρότερες ανεξάρτητες κινούμενες μάζες.

Σε μια τέτοιου τύπου κατολίσθηση, η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας είναι πολύ καλά ορισμένη και μπορεί να είναι είτε επίπεδη, είτε κυκλική, είτε πολυγωνική. Η διαφορετική αυτή γεωμετρία διαχωρίζει τις ολισθήσεις σε μεταθετικές, περιστροφικές και πολύπλοκες.

Στις μεταθετικές ολισθήσεις (*translational slides*) (Εικόνα 4.3.δ) η εδαφική μάζα κινείται κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας ολίσθησης, με πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφική κίνηση και μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις. Οι ολισθήσεις αυτού του τύπου είναι συνήθως αρκετά ρηχές, με το μήκος τους να υπερβαίνει το 10-πλάσιο του βάρους τους.

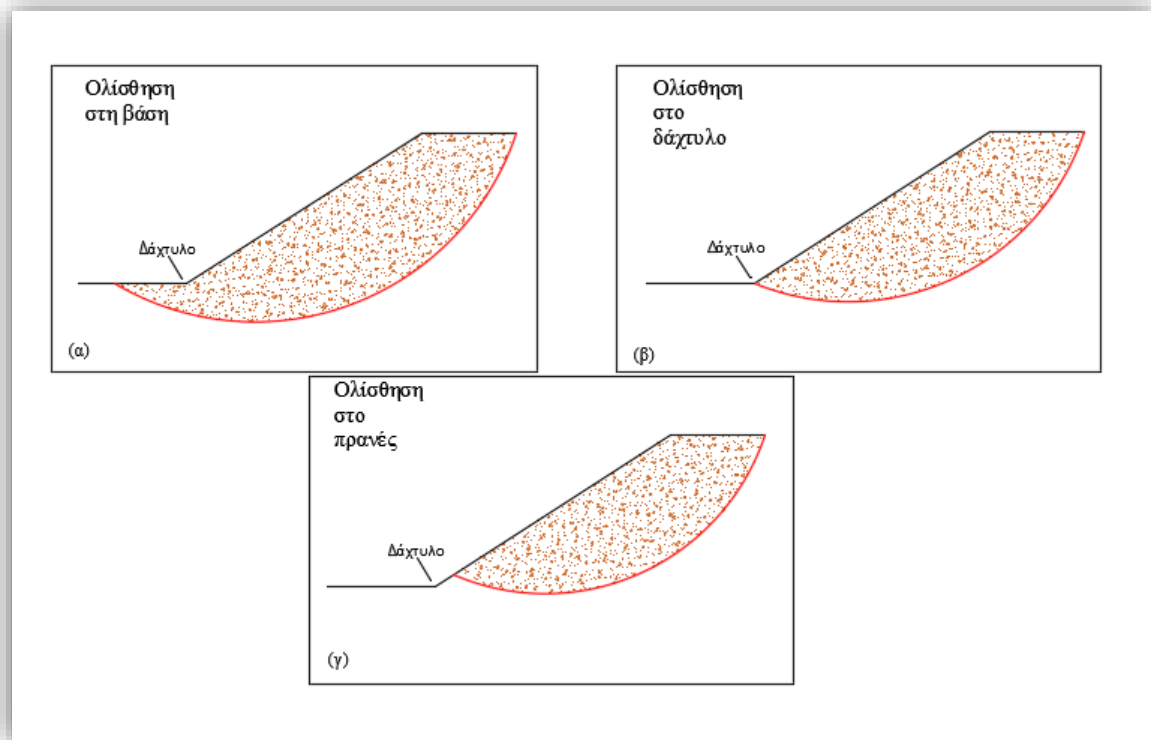
Μεταθετικές ολισθήσεις συμβαίνουν κυρίως σε πρανή που αποτελούνται από χονδρόκοκκα εδάφη και από παράλληλες εδαφικές στρώσεις ίδιας κλίσης, με την επιφάνεια ολίσθησης να σχηματίζεται συνήθως κατά μήκος της γραμμής αλλαγής των στρωμάτων. Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται μια μεταθετική ολίσθηση που συνέβη στο Χαροκόπι Ιωαννίνων σε σχηματισμούς φλύσχη, ύστερα από δυνατή βροχόπτωση, το Δεκέμβριο του 2005. Φαίνεται

μια άποψη του ανάντη τμήματος της κατολίσθησης όπου διακρίνονται εύκολα η στέψη, η κεφαλή, η δεξιά πλευρά, το κύριο σώμα και η επιπεδότητα της επιφάνειας ολίσθησης.



Εικόνα 4.4. Κατολίσθηση στο Χαροκόπι Ιωαννίνων, (Δεκέμβριος 2005)

Στις περιστροφικές ολισθήσεις (*rotational slides*) η εδαφική μάζα ολισθαίνει πάνω σε μία κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με κέντρο ένα φανταστικό σημείο περιστροφής σε άξονα παράλληλο στο πρηνές (Εικόνα 4.3.γ). Οι κατολισθήσεις αυτού του τύπου συνηθίζονται σε ομοιογενή λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά και συνήθως το μήκος τους είναι 3-7 φορές το βάθος τους. Ανάλογα με την έκταση της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το πρηνές, διακρίνονται σε τρεις περιπτώσεις. Στις ολισθήσεις βάσης, όπου η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται σε όλο το πρηνές (Εικόνα 4.5.α), στις ολισθήσεις όπου η επιφάνεια ολίσθησης καταλήγει στο πόδι του πρηνούς (Εικόνα 4.5.β) και τέλος στις ολισθήσεις όπου η επιφάνεια ολίσθησης καταλήγει μέσα στο πρηνές (Εικόνα 4.5.γ).

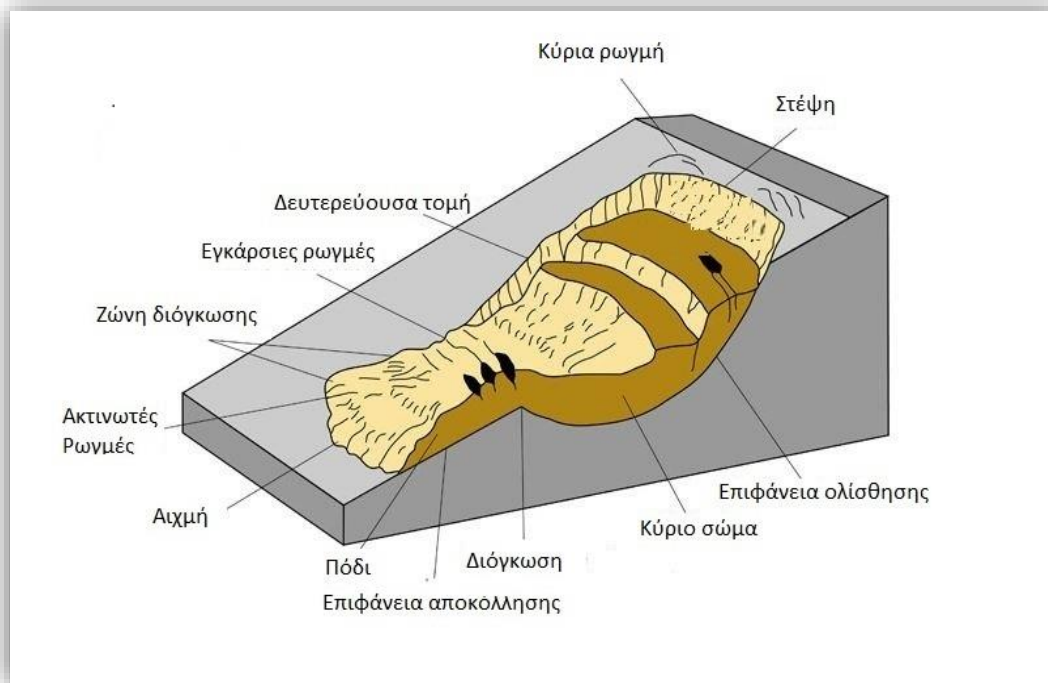


Εικόνα 4.5. Περιπτώσεις περιστροφικής ολίσθησης.

Η πολύ καλά ορισμένη γεωμετρία μιας περιστροφικής ολίσθησης είναι εμφανής στην Εικόνα 4.6, όπου αναγράφονται τα χαρακτηριστικά της κατολίσθησης όπως αυτά έχουν οριστεί από τον *IAEG*. Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζεται μια περιστροφική ολίσθηση που συνέβη το Νοέμβρη του 2001 στο *Moorabool* της Αυστραλίας λόγω διάβρωσης από το ποτάμι της περιοχής. Φαίνεται καθαρά η κυκλική επιφάνεια ολίσθησης, η στέψη, η κεφαλή, το κύριο σώμα της ολίσθησης.



Εικόνα 4.6. Περιτροφική ολίσθηση που συνέβη στο Moorabool της Αυστραλίας, (Νοέμβρης 2001)



Εικόνα 4.7. Τυπικά μέρη μιας περιτροφικής ολίσθησης σύμφωνα με τον IAEG, (www.usgs.gov)

✓ Εξάπλωση (spread)

Ως εξάπλωση ορίζεται η επέκταση ενός συνεκτικού εδάφους πάνω σε εδαφικές στρώσεις μαλακότερου υλικού και η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι μια επιφάνεια έντονης διατμητικής τάσης. Στα εδαφικά πρηνή συνηθισμένες είναι οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης του εδάφους, οι οποίες εκδηλώνονται σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες χωρίς αντοχή και δομή ή σε ρευστοποιήσιμους σχηματισμούς. Η κίνηση είναι μεταφορική και συμβαίνει μια βαθμιαία θραύση η οποία εξελίσσεται οπισθοδρομικά έως τη στέψη της αστοχίας. Τα τεμάχια που αποσπώνται αρχικά καθιζάνουν και μπορεί να περιστραφούν, να ολισθήσουν, να βυθιστούν ή να υγροποιηθούν και να ρεύσουν. Η εξάπλωση είναι γενικά ένα ξαφνικό φαινόμενο και μπορεί να εξελιχθεί με μεγάλη έως πολύ μεγάλη ταχύτητα χωρίς καμία προειδοποίηση. (Εικόνα 4.3.ζ).

✓ Ροή (flow)

Η ροή είναι μια συνεχής κίνηση στον χώρο, στην οποία οι επιφάνειες αστοχίας δεν είναι καλά διαμορφωμένες, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και είναι κοντά η μία στην άλλη. Εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά και μπορούν να είναι υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές. Το κάτω όριο της μάζας που αστοχεί μπορεί να είναι μια επιφάνεια κατά μήκος της οποίας λαμβάνει χώρα διαφορετική κίνηση ή μια παχιά ζώνη με κατανεμημένη διάτμηση. Έτσι υπάρχει μια βαθμιαία μετάβαση από ολισθήσεις σε ροές, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό των υλικών αλλά και ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε λεπτομερή υλικά, υλικά δηλαδή που αυξάνουν την κινητικότητα τους. Οι εδαφικές ροές διακρίνονται σε ροές κορημάτων (*debris flows*) (Εικόνα 4.3.ε) και σε ροές χώματος (*earth flow*) (Εικόνα 4.3.στ), όπου στις δεύτερες είναι αυξημένη η περιεκτικότητά τους σε λεπτόκοκκα υλικά (άμμο, ιλύ, άργιλο). Στις ροές χώματος, στην περίπτωση που η περιεκτικότητά σε νερό είναι μεγάλη, οι κινήσεις είναι εξαιρετικά γρήγορες και αναφέρονται ως ροές λάσπης.

Στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται μια ροή χώματος που συνέβη το 1993 στην πόλη *Lenioux* της *Ottawa*. Το 1991 γεωτεχνικές έρευνες έδειξαν πως η πόλη είναι χτισμένη πάνω σε θαλάσσια αργιλώδη εδάφη τα οποία ήταν πολύ πιθανό να αστοχήσουν, και τότε η πόλη μεταφέρθηκε σε άλλη περιοχή. Μόλις δύο χρόνια αργότερα επήλθε η αστοχία, το μέτωπο της οποίας προωθήθηκε από τις όχθες του Βόρειου Εθνικού Ποταμιού σε διάστημα μικρότερο από μία ώρα, καταστρέφοντας έκταση 17.000m². Τα εδαφικά υλικά που αστόχησαν μεταφέρθηκαν αντίθετα και προς τη ροή του ποταμού προκαλώντας τη δημιουργία αναχωμάτων και πλημμυρίζοντας τεράστιες εκτάσεις.



Εικόνα 4.8 . Κατολίσθηση Lemieux, Ottawa Καναδά 1993, (www.ottawagatineaugeoheritage.ca)

✓ Ερπυσμός (Creep)

Ο ερπυσμός είναι μια αργή έως πάρα πολύ αργή ροή σύμφωνα με τους *Cruden & Varnes*. Εκδηλώνεται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους προσβάλοντας μεγάλες εκτάσεις, με μέγιστο βάθος μετακινούμενης μάζας τα 2-3m και στην εδαφική μάζα που αστοχεί δεν εμφανίζονται εφελκυστικές και διατμητικές ρωγμές. Ροή τύπου ερπυσμού μπορεί να παρατηρηθεί από τις κάμψεις των κορμών των δέντρων και την εκτροπή των στύλων από την κατακόρυφο.

Άλλη μια επιπλέον ταξινόμηση των κατολισθήσεων ανάλογα με την ενέργεια που περιέχει η κάθε κατολίσθηση τις κατατάσσει σε *ενεργές* και *ανενεργές* κατολισθήσεις.

Ενεργές κατολισθήσεις είναι εκείνες οι οποίες έχουν παρουσιάσει πρόσφατα δραστηριότητα κατά τον τελευταίο εποχικό κύκλο και μπορεί να είναι είτε νέες, δηλαδή κινήσεις πρώτης φοράς, είτε επανενεργοποιημένες. Οι τελευταίες είναι κατολισθήσεις οι οποίες είναι πάλι ενεργές μετά από μια περίοδο κατά την οποία ήταν ανενεργές και γενικά κινούνται κατά προϋπάρχουσες επιφάνειες των οποίων οι παράμετροι αντοχής πλησιάζουν τις παραμένουσες ή τελικές τιμές.

Στις ενεργές κατολισθήσεις κατατάσσονται και οι αδρανείς, οι οποίες είναι κατολισθήσεις που έχουν παρουσιάσει κίνηση κατά τον τελευταία εποχικό κύκλο, αλλά δεν κινούνται στο παρόν.

Ανενεργές κατολισθήσεις είναι εκείνες που παραμένουν αδρανείς για περισσότερο από έναν εποχικό κύκλο. Οι κατολισθήσεις αυτού του τύπου μπορούν να διαιρεθούν σε επιμέρους κατηγορίες. Αν τα αίτια μιας ανενεργής κατολίσθησης εξακολουθούν να υφίστανται τότε λέγεται λανθάνουσα κατολίσθηση, ενώ αν τα αίτια έχουν εκλείψει καλείται εγκαταλελειμμένη ή σταθεροποιημένη.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης να αναφερθούν και οι κατολισθήσεις τύπου αρχαίες ή απολιθωμένες, οι οποίες είναι πολύ παλιές ανενεργές κατολισθήσεις που παραμένουν ορατές στο τοπίο για χιλιάδες έτη ως απομεινάρια των κάποτε ενεργών κατολισθήσεων.

Μια τελευταία κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων, αρκετά συνήθης, είναι αυτή που τις κατηγοριοποιεί ανάλογα με τις συνθήκες αποστράγγισης. Έτσι διακρίνονται σε στραγγιζόμενες όπου η πίεση των πόρων στο πρηνές είναι μηδενική, σε μερικώς στραγγιζόμενες όπου υπάρχει μερική ποσότητα νερού στους πόρους του εδάφους, και στις αστραγγιστές όπου τα εδάφη είναι χαμηλής διαπερατότητας και τα πρηνή είναι κορεσμένα.

4.2.2. Παράγοντες που προκαλούν κατολισθήσεις

Γενικά η αστοχία στα πρηνή προκαλείται από διεργασίες της φύσης ή από ανθρώπινες δραστηριότητες, παράγοντες οι οποίοι ταραάζουν την ηρεμία των φυσικών ή τεχνητών πρηνών. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί, είτε να προϋπάρχουν ως αίτια, δημιουργώντας μια προδιάθεση κατολίσθησης του πρηνούς, είτε να αποτελούν την αφορμή για την άμεση πρόκληση των κατολισθήσεων. Αυτός ο διαχωρισμός τους κατατάσσει σε *πρωτογενείς* και *δευτερογενείς παράγοντες* αντίστοιχα. Οι πρωτογενείς παράγοντες αφορούν τη γεωτεκτονική και το κλίμα της περιοχής, ενώ οι δευτερογενείς τις τοπικές και παροδικές συνθήκες, καθώς επίσης και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Μια αστοχία σε ένα πρηνές μπορεί να επέλθει, είτε γιατί κάποιος παράγοντας αποτέλεσε το αίτιο για την αύξηση της διατμητικής τάσης στο πρηνές, είτε γιατί αποτέλεσε το αίτιο για τη μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Τα αίτια αυτά ονομάζονται εξωγενή και ενδογενή αντίστοιχα. Οι *Guidicini & Nieble* (1984) και ο *Varnes* (1978) συνόψισαν τους παράγοντες και τα αίτια αυτά σε πίνακες, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω. (Πίνακας 4.4), (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.4. Μηχανισμοί ενεργοποίησης κατολισθήσεων, (Guidicini & Nieble, 1984)

Παράγοντες			Αίτια		
Πρωτογενείς	Δευτερογενείς		Ενδογενή	Εξωγενή	Ενδιάμεσα
	Πριν	Έναυσμα			
Γεωλογία, Μορφολογία, Κλίμα, Βαρύτητα, Θερμοκρασία, Φυτοκάλυψη,	Βροχόπτωση, Διάβρωση, Παγετός, Αλλαγή θερμοκρασίας, Αλλαγή στάθμης υπόγειων υδάτων, Ανθρώπινη δραστηριότητα	Βροχόπτωση, Χιονόπτωση, Διάβρωση, Σεισμός, Κύματα, Άνεμος, Ανθρώπινη δραστηριότητα	Θερμοκρασιακή αλλαγή, Μείωση διατμητικής αντοχής λόγω αποσάρθρωσης	Αλλαγή γεωμετρίας, δονήσεις	Αύξηση υπόγειων υδάτων, Μείωση αναρρόφησης, Ταχεία αποστράγγιση, Γεώτρηση

Πίνακας 4.5. Μηχανισμοί ενεργοποίησης κατολισθήσεων, (Varnes, 1978)

Αίτια	Παράγοντας	Φαινόμενο
Αύξηση φόρτισης	Αφαίρεση εδάφους	Διάβρωση, Εκσκαφή
	Προσαύξηση	Βροχόπτωση, Πάγος, Χιόνι, Φυσική απόθεση, Φυτοκάλυψη, Κατασκευές κτιρίων, Ανάχωμα
	Σεισμική φόρτιση	Σεισμός, Κύματα, Δονήσεις, Ηφαιστεια, Κυκλοφορία οχημάτων
	Οριζόντια πίεση	Πάγος, Επέκταση εδαφών
Μείωση διατμητικής αντοχής	Υλικά χαρακτηριστικά	Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά, Τάσεις
	Αλλαγή στις μεταβλητές πρηνών	Αποσάρθρωση, Απώλεια διατμητικής αντοχής, Αύξηση ύψους υπόγειων νερών

Μορφολογία και γεωλογία του εδάφους

Τα μορφολογικά και εδαφικά χαρακτηριστικά ενός πρσανούς αποτελούν πρωτογενή αίτια για την αστοχία ενός πρσανούς. Η μορφολογία του εδάφους αφορά τη στρωματοποίηση του και τη γεωμετρία του. Τα πρσανή μπορεί να είναι είτε ομοιογενή, να αποτελούνται από ένα δηλαδή στρώμα εδάφους, είτε να είναι στρωματοποιημένα, να αποτελούνται δηλαδή από πολλά και ετερογενή στρώματα. Η τελευταία περίπτωση είναι και η πλέον συνηθισμένη. Τα στρωματοποιημένα εδάφη είναι γενικότερα πιο επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα, καθώς αποτελούνται από πολλές πιθανές επιφάνειες αστοχίας σε αντίθεση με τα ομογενή. Επίσης σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των πρσανών παίζει η κλίση και το ύψος τους, αφού σε απότομα και ψηλά πρσανή οι δυνάμεις βαρύτητας είναι μεγάλες και είναι αρκετά πιθανό να υπερβούν τη διατμητική αντοχή του εδάφους οδηγώντας το στην αστοχία. Η διατμητική αντοχή του εδάφους, όπως προκύπτει από το κριτήριο αστοχίας *Mohr-Coulomb*, είναι συνάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πρσανούς και πιο συγκεκριμένα της συνοχής και της γωνίας τριβής των εδαφών. Τα εδάφη μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τη συνοχή τους σε τέσσερις κατηγορίες. Επιπλέον μερικά από αυτά είναι περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθήσεις, όπως ο φλύσχης με στοιχεία αργίλου ή τα αργιλικά εδάφη.

- i.* Συνεκτικά εδάφη: Είναι εδάφη που έχουν δυνατούς διαμοριακούς δεσμούς μέσω της ανταλλαγής ιόντων ή της αντικατάστασης και τα σωματίδια τους είναι δεμένα μεταξύ τους. Παράδειγμα συνεκτικού εδάφους αποτελεί η *caliche*, ένα μίγμα αργίλου, άμμου και χαλικιών, δεμένα μεταξύ τους με ανθρακικό ασβέστιο.
- ii.* Μη συνεκτικά εδάφη: Εδάφη που έχουν πολύ αδύναμους διαμοριακούς δεσμούς και τα σωματίδια τους είναι σχεδόν ασύνδετα μεταξύ τους, συσσωρεύονται απλά το ένα πάνω στο άλλο.
- iii.* Ψευδοσυνεκτικά: Σε αυτή την κατηγορία εδαφών ανήκουν κατά κύριο λόγο αργιλικά και ιλυώδη εδάφη ή εδάφη των οποίων το κύριο συνδετικό τους υλικό είναι άργιλος ή ιλύς. Τα εδάφη αυτού του τύπου όταν είναι στεγνά έχουν συνοχή, ενώ όταν είναι βυθισμένα στο νερό μεταπίπτουν σε μη συνεκτικά.
- iv.* Ημισυνεκτικά: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως εδάφη των οποίων το κύριο συνδετικό τους είναι ασβεστόλιθος κακής ποιότητας, όπως οι μολάσσεις.

✓ Υδρολογικές συνθήκες μιας περιοχής

Οι υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή είναι συνδεδεμένες άμεσα με το κλίμα της περιοχής και επηρεάζουν την ευστάθεια των πρσανών. Διάφορες αλλαγές στις ήδη

υπάρχουσες υδρολογικές συνθήκες με μία ξαφνική έντονη βροχόπτωση, μπορεί να προκαλέσουν την αστοχία του πρηνούς. Τα υπόγεια νερά μέσα στα πρηνή αποτελούν μεταβλητή της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Αν με τη διήθηση του νερού της βροχής αυξηθεί το υπόγειο νερό, ανέβει δηλαδή η πιεζομετρική επιφάνεια, τότε στο τμήμα του εδάφους που ήταν στεγνό θα παρουσιαστούν επιπλέον δυνάμεις άνωσης (πίεση πόρων), μειώνοντας κατά συνέπεια την διατμητική αντοχή του εδάφους. Ταυτόχρονα, η παρουσία του νερού επηρεάζει και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του εδάφους, ελαττώνοντας τη συνοχή και τη τριβή του, μέσω της χαλάρωσης των δεσμών των σωματιδίων και της μείωσης των επιφανειακών τάσεων αντίστοιχα. Στη περίπτωση όμως που τα εδάφη βρίσκονται ψηλότερα από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, η προσθήκη νερού με τη βροχή αυξάνει το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους και κατά συνέπεια τις διατμητικές τάσεις, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο την αστοχία.

✓ Διάβρωση

Η συνεχής έκθεση των φυσικών και τεχνητών πρηνών στα στοιχεία της φύσης, νερό και άνεμο προκαλεί την διάβρωση των εδαφών που τα αποτελούν. Η διάβρωση αυτή μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά των πρηνών διαταράσσοντας τις συνθήκες ισορροπίας τους και επιφέροντάς την αστοχία τους. Τα ποτάμια και οι χείμαρροι διαβρώνουν τις πλευρές των πρηνών προκαλώντας είτε αύξηση της κλίσης τους, είτε στην περίπτωση των κοιλάδων εκβάθυνση με συνέπεια την αύξηση του ύψους της μίας πλευράς τους.

✓ Σεισμική δραστηριότητα και ρήγματα

Η σεισμική δραστηριότητα σε μία περιοχή μπορεί να αποτελέσει αρκετές φορές την αφορμή για την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων, είτε προσθέτοντας στην ήδη ασταθή εδαφική μάζα επιπλέον φόρτιση, είτε μειώνοντας τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Σε περιοχές με ρήγματα, ο κίνδυνος κατολίσθησης των πρηνών προϋπάρχει και μία σεισμική δόνηση θα μπορούσε να είναι η αφορμή για την εκδήλωση τέτοιων φαινομένων.

✓ Ανθρώπινη παρέμβαση

Οι κατασκευαστικές δραστηριότητες πολλές φορές είναι η αφορμή για την πρόκληση κατολισθήσεων στα πρηνή. Εκσκαφές στο πόδι του πρηνούς, κατά την διάρκεια των κατασκευών συγκοινωνιακών έργων ή διωρύγων, μπορούν, είτε να αυξήσουν την κλίση των πρηνών, είτε να μειώσουν την πλευρική αντίσταση του εδάφους επιφέροντας την αστοχία. Κατά την κατασκευή επιχωμάτων, η κλίση που πρέπει να δίνεται στα πρηνή πρέπει να είναι αισθητά κατώτερη από τη γωνία ηρεμίας των υλικών ώστε να αποφεύγονται κατολισθήσεις.

Τέλος, μεγάλες κατασκευές συγκοινωνιακών έργων ή αγωγών σε περιοχές με ασταθή πρανή, μπορούν να επιφέρουν την αστοχία εξαιτίας της αύξησης του βάρους από τα επιβαλλόμενα φορτία.

4.2.3. Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών

Οι κατολισθήσεις των πρανών είναι ένα συχνό και πολλές φορές καταστρεπτικό φαινόμενο, για αυτόν τον λόγο έχει δημιουργηθεί η ανάγκη υπολογισμού του βαθμού της ευστάθειας τους, ώστε σε περίπτωση πιθανής αστοχίας τους να παρθούν τα απαραίτητα διορθωτικά ή αποτρεπτικά μέτρα. Επιπλέον, όταν ένα πρανές πρόκειται να κατασκευαστεί και βρίσκεται στο στάδιο του σχεδιασμού, οι αναλύσεις ευστάθειας είναι απαραίτητες για την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας και υλικών.

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλοί μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών. Από αυτούς, οι πιο ευρέως χρησιμοποιημένοι είναι μέθοδοι που βασίζονται στην *ανάλυση οριακής ισορροπίας* και στην *ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων*.

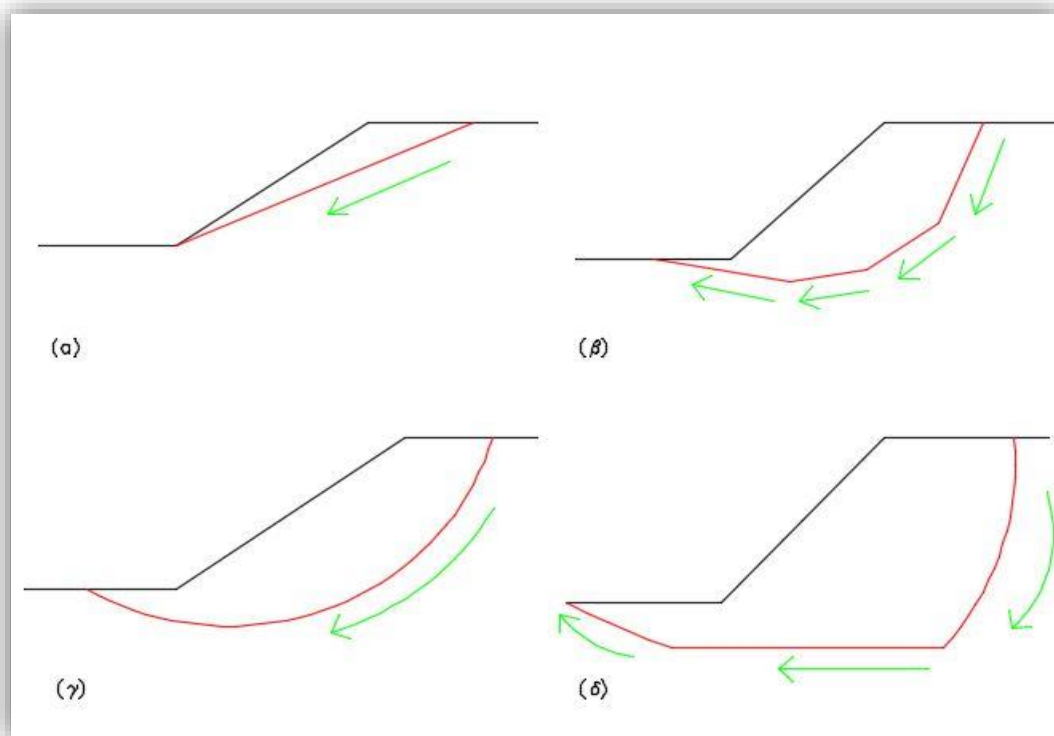
Η βάση της ανάλυσης οριακής ισορροπίας είναι η στατική, ενώ υπάρχουν κάποια ουσιαστικά βήματα που ακολουθεί κάθε μέθοδος οριακής ισορροπίας. Σε πρώτη φάση, η ανάλυση οριακής ισορροπίας απαιτεί τον καθορισμό ενός μηχανισμού αστοχίας. Η επιλογή του ακριβούς μηχανισμού αστοχίας απαιτεί διερεύνηση, και γι' αυτό συνήθως υποτίθεται μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας, η οποία μπορεί να είναι επίπεδη, πολυγωνική, κυκλική, μη κυκλική (Εικόνα 4.9). Σε δεύτερη φάση, καθορίζονται οι δυνάμεις που δρουν στην επιφάνεια αστοχίας του πρανούς. Το έδαφος πάνω από την επιφάνεια αστοχίας υποτίθεται ότι είναι άκαμπτο για αυτό και η διάτμηση, συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια αστοχίας και εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια το κριτήριο Mohr-Coulomb. Οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι οι διατμητικές τάσεις (τ) και ορθές τάσεις (σ) οι οποίες είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος της επιφάνειας αστοχίας, καθώς και η μέγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους λίγο πριν την αστοχία. Τελευταίο βήμα της ανάλυσης οριακής ισορροπίας, αφού έχουν καθοριστεί όλες οι δυνάμεις, είναι η χρήση των εξισώσεων ισορροπίας ($\Sigma F=0$ ή $\Sigma M=0$).

Κάθε μέθοδος που είναι αναπτυγμένη με βάση την ανάλυση οριακής ισορροπίας, δίνει πάντα ως αποτέλεσμα έναν συντελεστή ασφαλείας (*factor of safety*), με τον οποίο καθορίζεται η ευστάθεια του πρανούς και ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του εδάφους (τ_f), προς τις ελάχιστες διατμητικές τάσεις που απαιτούνται για να διατηρηθεί ευστάθεια. Ο τύπος του συντελεστή ασφαλείας είναι :

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \tag{4.1}$$

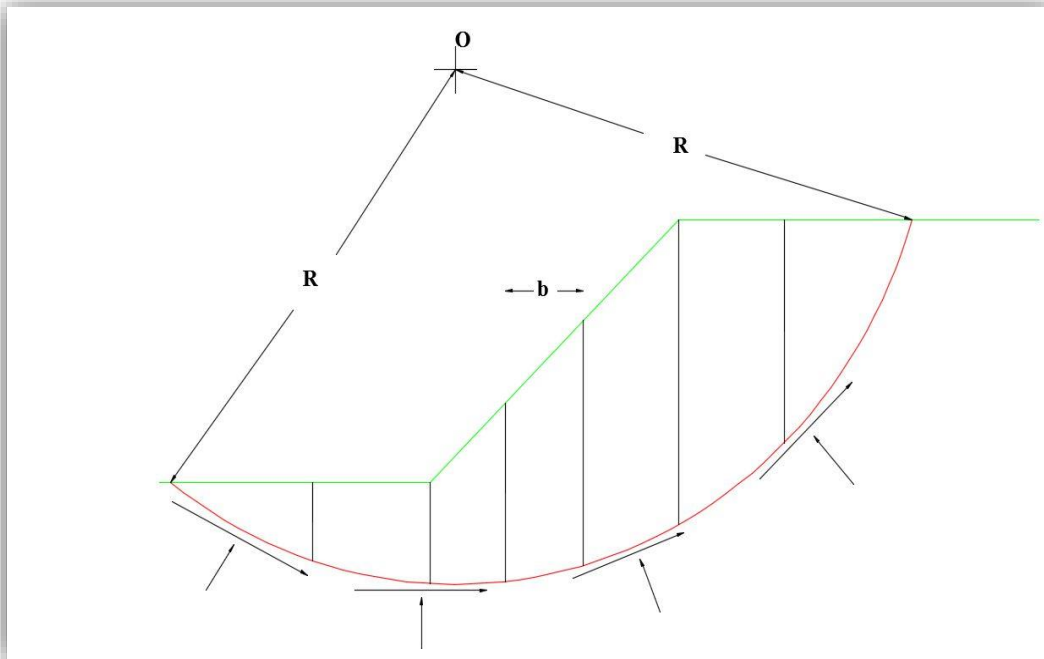
Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό ένα ασταθές πρανές θα έχει $FS \leq 1$, όμως υπάρχει πιθανότητα να υπάρχει αστάθεια στο πρανές και με συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο της μονάδας. Αυτό συμβαίνει λόγω ανακρίβειας στη μέθοδο ανάλυσης και στις παραμέτρους των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν. Για λόγους ασφαλείας, συνήθως ορίζεται ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για τα πρανή $FS \leq 1.4$.

Υπάρχουν δύο τρόποι για τον υπολογισμό του συντελεστή ευστάθειας. Ο πρώτος τρόπος γίνεται με ανάλυση ολικών τάσεων (*TSA*) και εφαρμόζεται κυρίως σε βραχυπρόθεσμες συνθήκες, κορεσμένα εδάφη και σε εδάφη όπου είναι δύσκολη η αποστράγγιση. Ο δεύτερος τρόπος γίνεται με ανάλυση ενεργών τάσεων (*ESA*) και εφαρμόζεται κυρίως σε στραγγιζόμενα εδάφη, σε μακροπρόθεσμες συνθήκες ή βραχυπρόθεσμες κατά τις οποίες είναι γνωστή η πίεση πόρων με μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 4.9. Συνήθεις γεωμετρικές επιφανειών αστοχίας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας, που έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας την ανάλυση οριακής ισορροπίας. Στις μεθόδους που έχει ακολουθηθεί η ανάλυση λωρίδων επισημαίνεται πως η εδαφική μάζα πάνω από την επιφάνεια αστοχίας χωρίζεται σε έναν αριθμό κατακόρυφων λωρίδων, μοναδιαίου πάχους και μεταβλητού ύψους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.10. Η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας αλλάζει ανάλογα με τη μέθοδο.



Εικόνα 4.10. Η Μέθοδος των λωρίδων

✓ Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση

Η μέθοδος αυτή υποθέτει πρηνή που εκτείνονται σε άπειρες αποστάσεις και επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης (Εικόνα 4.11). Επιλύεται θεωρώντας μία λωρίδα για όλο το πρηνές και είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό ευστάθειας πρηνών σε χονδρόκοκκα εδάφη, μη συνεκτικά εδάφη ($c=0$), εδάφη με διαστρωμάτωση ή στρωσιγενή με κλίση παράλληλα στο πρηνές. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους σε βάθος h_w , με σταθερή διήθηση η οποία υποτίθεται παράλληλη προς την επιφάνεια του εδάφους. Αν υποτεθεί ότι το ειδικό βάρος του εδάφους επάνω και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα έχει την ίδια τιμή γ , τότε ο γενικός τύπος υπολογισμού του συντελεστή ευστάθειας για συνθήκες ενεργών τάσεων είναι :

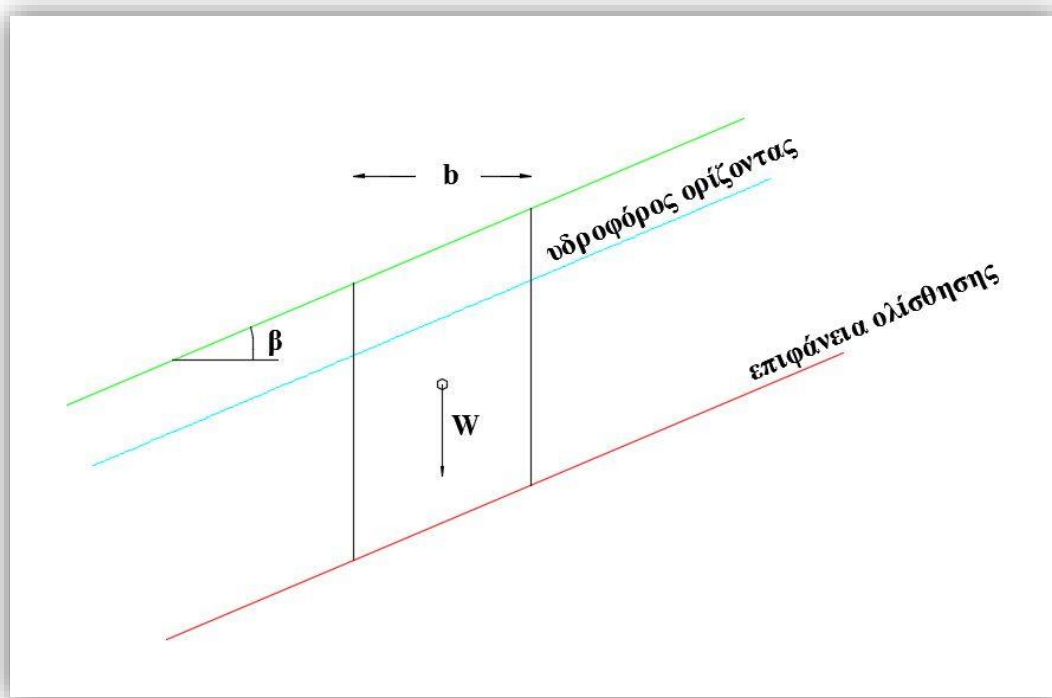
$$FS = \frac{c' + \tan(\varphi') \cos^2 \beta (\gamma z - \gamma_w z + \gamma_w h_w)}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (4.2)$$

Αν θεωρηθεί ξηρό πρανές και χωρίς συνοχή τότε ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον απλό τύπο:

$$FS = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \quad (4.3)$$

Για συνθήκες ολικών τάσεων ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:

$$FS = \frac{2s_u}{\gamma z \sin(2\beta)} \quad (4.4)$$



Εικόνα 4.11. Επίπεδη μεταφορική ολίσθηση

✓ Taylor (1948)

Πρόκειται για μια απλή μέθοδο υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας, η οποία υποθέτει κυκλικό μηχανισμό αστοχίας, ανάλυση ολικών τάσεων, και ομογενή πρανή. Ο συντελεστής

ασφαλείας προκύπτει από διαγράμματα και χρησιμοποιείται συνήθως για έναν γρήγορο προκαταρκτικό υπολογισμό.

✓ Hoek & Bray (1981)

Οι Hoek & Bray υπέθεσαν κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και θεώρησαν την ασταθή μάζα του πρηνούς ως ένα άκαμπτο σώμα. Η παραπάνω είναι μια απλή μέθοδος στη χρήση, όπου ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται μέσω νομογραφημάτων. Παρ'όλα αυτά η μέθοδος περιορίζεται σε ομογενή εδάφη και σε πέντε συγκεκριμένες συνθήκες υπογείου νερού.

✓ Fellenious (1927)

Η μέθοδος *Fellenious*, γνωστή και ως «Σουηδική μέθοδος» υποθέτει κυκλικό μηχανισμό αστοχίας και χρησιμοποιείται κυρίως σε ομογενή πρηνή. Πρόκειται για μία μέθοδο λωρίδων και υποθέτει ότι οι πλευρικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων είναι ίσες και αντίθετες. Ο συντελεστής ασφαλείας σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$FS = \frac{c'L + \tan\varphi' \sum(W\cos\theta - ul)}{\sum W\sin\theta} \quad (4.5)$$

✓ Janbu (1973)

Η μέθοδος *Janbu* πρόκειται για μία μέθοδο λωρίδων η οποία υποθέτει μη κυκλικό μηχανισμό αστοχίας και χρησιμοποιείται κυρίως σε μη ομογενή στρωσιγενή εδάφη. Ο *Janbu* θεώρησε ισορροπία στις οριζόντιες δυνάμεις και υπέθεσε πως οι κατακόρυφες δυνάμεις της λωρίδας εξουδετερώνονται. Ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει με επαναληπτική διαδικασία και δίνεται από τον τύπο:

$$FS = \frac{\sum[c_j b_j + [W_j(1 - r_u)\tan\varphi m_j]}{\sum W_j \tan\theta_j} \quad (4.6)$$

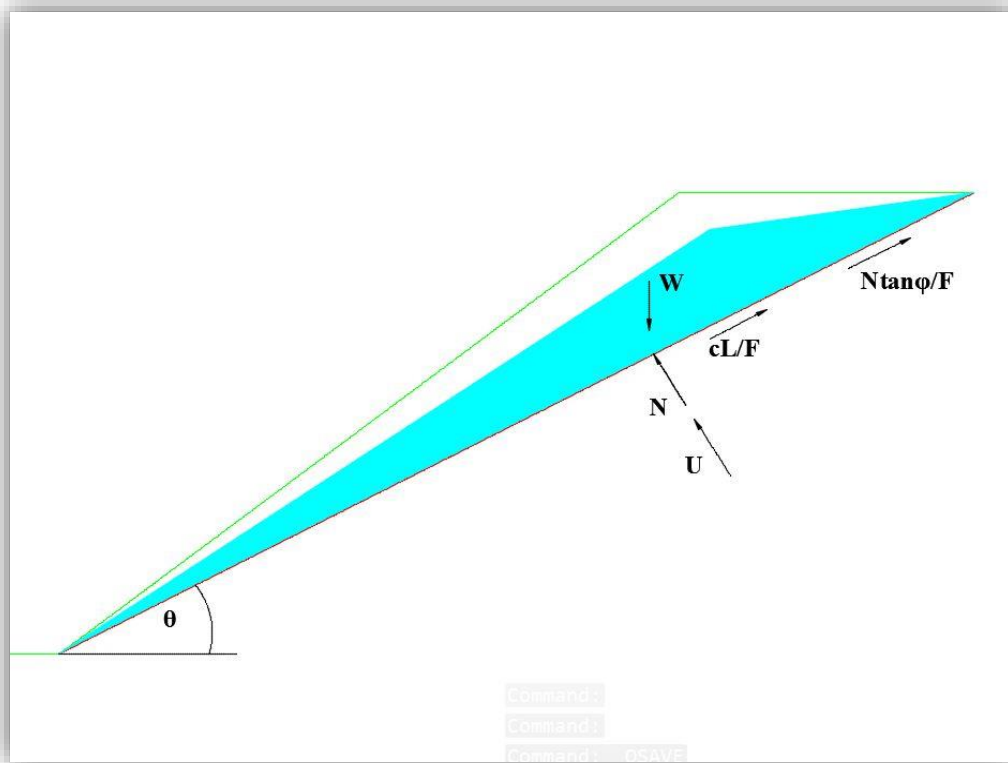
όπου

$$m_j = \frac{1}{\cos\theta_j + \frac{\tan\varphi \sin\theta_j}{FS}} \quad (4.7)$$

✓ Μέθοδος της Σφήνας

Η μέθοδος της σφήνας χρησιμοποιεί την τεχνική διαίρεσης της εδαφικής μάζας πάνω από την επιφάνεια αστοχίας σε σφήνες (Εικόνα 4.12). Είναι κυρίως εφαρμόσιμη σε πρανή με πολυγωνικές επιφάνειες αστοχίας, όπως πρανή επιχωμάτων. Κάθε σφήνα έχει τη δική της κλίση και δυνάμεις που δρουν κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης ενώ ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:

$$FS = \frac{cL + (W\cos\theta - U)\tan\phi}{W\sin\theta} \quad (4.8)$$



Εικόνα 4.12. Μέθοδος της σφήνας

Οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας παρότι είναι σχετικά εύχρηστες και γρήγορες, έχουν κάποιους περιορισμούς και μειονεκτήματα. Καταρχήν, σε όλες τις μεθόδους έχει υποτεθεί άκαμπτο έδαφος πάνω από την επιφάνεια αστοχίας, με αποτέλεσμα να μη λαμβάνονται υπόψη οι παραμορφώσεις του εδάφους, και δεύτερον, η αβεβαιότητα στις παραμέτρους που εισάγονται

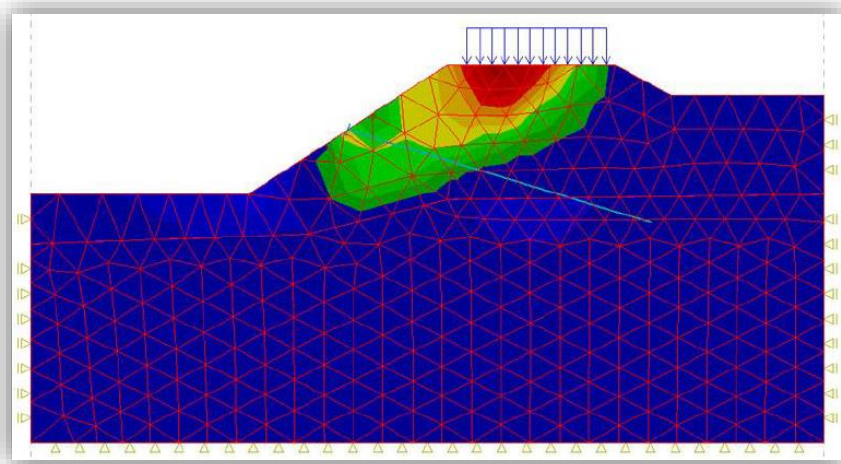
κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ευστάθειας οδηγεί σε αβεβαιότητα του υπολογιζόμενου FS .

Μια διαφορετική προσέγγιση του υπολογισμού της ευστάθειας των πρηνών είναι η «ανάλυση τάσεων – παραμορφώσεων». Η ανάλυση αυτή λαμβάνει υπόψη τις παραμορφώσεις του εδάφους σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Η πιο γνωστή μέθοδος που εφαρμόζει την ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

✓ Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρόκειται για μια αριθμητική μέθοδο που άρχισε να εφαρμόζεται στα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Η εφαρμογή της βασίστηκε στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς δόθηκε η δυνατότητα επίλυσης των πολύπλοκων εξισώσεων που προέκυπταν από αναλύσεις προβλημάτων της μηχανικής.

Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη στη μητρική ανάλυση και έχει ως βασικό χαρακτηριστικό την αναπαράσταση συνεχών μέσων με τη χρήση δισδιάστατων ή τρισδιάστατων στοιχείων.



Εικόνα 4.13. Προσομοίωση πρηνούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

4.2.4. Μέθοδος Bishop

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος *Bishop* η οποία αναπτύχθηκε το 1955. Πρόκειται για μια δημοφιλή μέθοδο που χρησιμοποιεί την ανάλυση οριακής ισορροπίας και απαιτεί λογισμικό για την επίλυση της.

Η μέθοδος *Bishop* υποθέτει μια κυκλική επιφάνεια ολίσθησης πεπερασμένου μεγέθους, ακτίνας R και μοναδιαίου πάχους. Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο των λωρίδων όπου η εδαφική μάζα πάνω από την επιφάνεια ολίσθησης χωρίζεται σε έναν αυθαίρετο αριθμό κατακόρυφων λωρίδων πλάτους b_j και μεταβλητού ύψους h . Ο υπολογισμός του συντελεστή ευστάθειας γίνεται με το άθροισμα των επιμέρους δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται σε κάθε λωρίδα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ομοιογενές πρηνές με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης κέντρου O και ακτίνας R , και φαίνεται η διατμητική αντοχή του εδάφους τ που έχει ενεργοποιηθεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Από τυχαία λωρίδα που έχει επιλεχθεί παρουσιάζεται διάγραμμα ελεύθερου σώματος με τις δυνάμεις που δρουν στη λωρίδα. Ακολουθεί επεξήγηση των δυνάμεων και των μεγεθών της κάθε λωρίδας :

- W_j είναι το συνολικό βάρος της λωρίδας, συμπεριλαμβάνοντας και τις εξωτερικές φορτίσεις
- E_j είναι οι κατακόρυφες δυνάμεις της λωρίδας
- N_j είναι η κάθετη δύναμη κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και υποτίθεται πως εφαρμόζεται στη μέση ($l_j/2$)
- T_j είναι οι ενεργοποιημένες διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης
- X_j είναι οι εφαπτομενικές δυνάμεις της λωρίδας
- U_j είναι η δύναμη από τη πίεση των πόρων
- z_j είναι το ύψος εφαρμογής των E_j
- z_w είναι το ύψος της πίεσης των πόρων
- a_j είναι το σημείο εφαρμογής της κάθετη δύναμης N_j πάνω στην επιφάνεια ολίσθησης
- b_j είναι το πλάτος της λωρίδας

- l_j είναι το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης
- θ_j είναι η κλίση του τμήματος BC της επιφάνειας ολίσθησης με το οριζόντιο επίπεδο
- x_j =είναι η οριζόντια απόσταση από το κέντρο της λωρίδας στο κέντρο του κύκλου

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις οριακής ισορροπίας σε κάθε λωρίδα προκύπτουν 6 άγνωστοι για κάθε λωρίδα. Τα W_j, U_j, b_j, l_j, z_w μπορούν να υπολογιστούν από τη γεωμετρία της κάθε λωρίδας, το ειδικό βάρος του εδάφους και το ύψος του υπόγειου νερού. Εν τούτοις οι εξισώσεις ισορροπίας που εφαρμόζονται είναι τρεις, οπότε προκύπτει πρόβλημα για την εύρεση των αγνώστων.

Για να λύσει αυτό το πρόβλημα ο Bishop υπέθεσε ότι οι κατακόρυφες δυνάμεις σε κάθε λωρίδα E_j και E_{j+1} είναι συγγραμμικές, και πως οι εφαπτομενικές δυνάμεις X_j και X_{j+1} είναι μηδενικές.

Οι κάθετες δυνάμεις είναι:

$$N_j \cos \theta_j + T_j \sin \theta_j - W_j - X_j + X_{j+1} = 0 \quad (4.9)$$

Ο Bishop θεώρησε μόνο την εξίσωση ισότητας των ροπών

$$\sum W_j x_j = \sum T_j R \quad (4.10)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από :

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{(T_f)_j}{T_j} = \frac{cl + N \tan \varphi}{T_j} \quad (4.11)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$FS = \frac{\sum [W_j(1 - r_u) + (X_j - X_{j+1}) \tan \varphi_j] m_j}{\sum W_j \sin \theta_j} \quad (4.12)$$

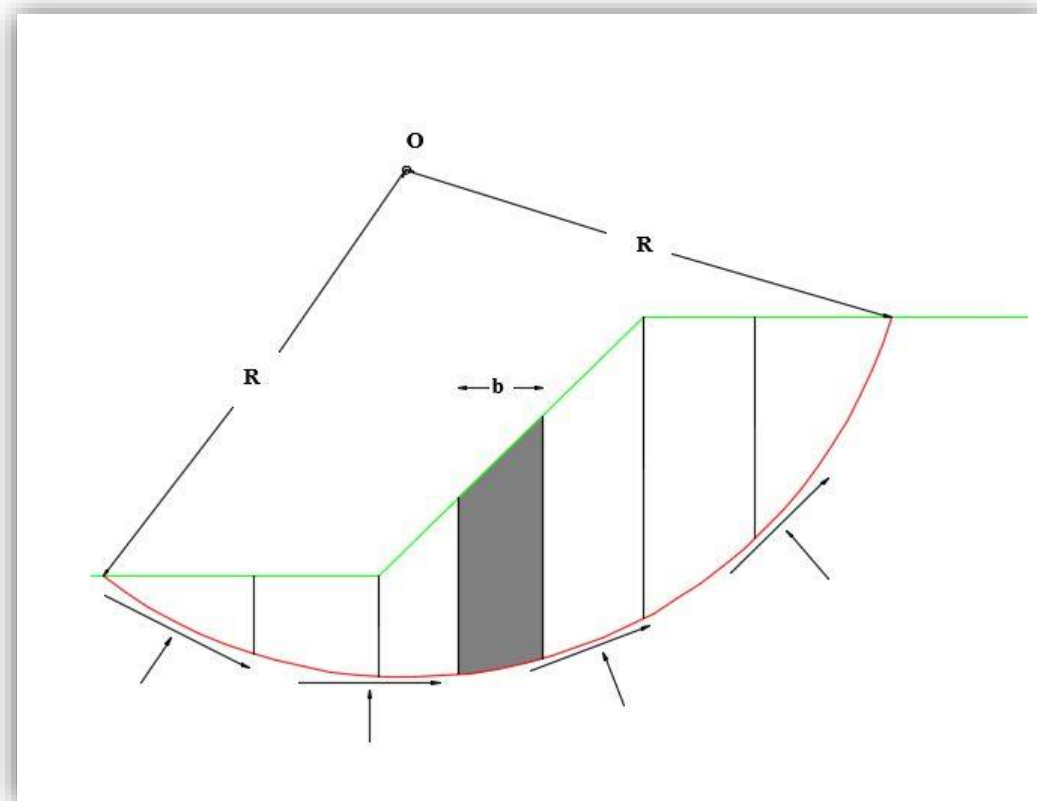
Όπου

$$m_j = \frac{1}{\cos \theta_j + \frac{\tan \varphi \sin \theta_j}{FS}} \quad (4.13)$$

Για μεγαλύτερη ευκολία στις πράξεις, η πιο συνήθης εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η απλοποιημένη μέθοδος Bishop στην οποία δε λαμβάνονται υπόψη οι εφαπτομενικές δυνάμεις X_j και X_{j+1} .

Οπότε

$$FS = \frac{\sum [W_j(1 - r_u) + \tan\phi_j]m_j}{\sum W_j \sin\theta_j} \quad (4.14)$$



Εικόνα 4.14. Μέθοδο λωρίδων Bishop,

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται μια πιθανή επιφάνεια αστοχίας. Σε αυτό το σημείο αναφέρεται πως η μέθοδος *Bishop*, είναι μια επαναληπτική μέθοδος. Δοκιμάζονται πολλές επιφάνειες αστοχίας, δίνοντας κάθε φορά έναν τυχαίο συντελεστή ασφαλείας, και κάθε φορά

4.3. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων που τείνουν να προκαλέσουν την αστοχία ενός πρανούς και της διατμητικής αντοχής του εδάφους, είναι υπεύθυνη για την ευστάθεια του. Διάφοροι παράγοντες όμως πρωτογενής ή δευτερογενής φύσης τείνουν να διαταράσσουν αυτή την ισορροπία, επιφέροντας την κατολίσθηση του πρανούς. Ένας ιδιαίτερος παράγοντας ως προς τη φύση του, υπεύθυνος για έναν μεγάλο αριθμό κατολισθήσεων, είναι ο σεισμός.

Η σεισμική δόνηση και οι δυναμικές τάσεις που προκαλεί ο σεισμός αποτελούν πολλές φορές την αφορμή κατολισθήσεων σε πρανή που υπό στατικές συνθήκες είναι σταθερά. Οι δυναμικές συνθήκες που δημιουργεί ο σεισμός σε ένα πρανές, είναι αυτές που το καθιστούν ιδιαίτερο φαινόμενο και αποτελούν ταυτόχρονα και τη δυσκολία του υπολογισμού της σεισμικής ευστάθειας των πρανών. Πριν αναλυθούν οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της ευστάθειας των πρανών υπό δυναμικές συνθήκες, θα παρουσιαστούν τα κύρια χαρακτηριστικά ενός σεισμού και οι πιο κοινοί τύποι κατολισθήσεων που ενεργοποιούνται από έναν σεισμό.

4.3.1. Τύποι σεισμικών κατολισθήσεων

Ο σεισμός είναι η εδαφική δόνηση που γεννιέται από την παροδική διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων σε ρηγματογενείς ζώνες και η δόνηση αυτή είναι αποτέλεσμα των σεισμικών κυμάτων που παράγονται στο ρήγμα (εστία σεισμού). Το σημείο προβολής της εστίας πάνω στη φυσική γήινη επιφάνεια αποτελεί το επίκεντρο του σεισμού. Το μέγεθος του σεισμού υπολογίζεται με βάση την ενέργεια που εκλύουν τα σεισμικά κύματα και έχει καθιερωθεί να μετράται σε κλίμακα *Richter* (M_L).

Όταν συμβεί ένας σεισμός, οι πιθανότητες ενεργοποίησης μιας κατολίσθησης σε μία περιοχή δεν εξαρτάται από έναν και μόνο παράγοντα αλλά από έναν συνδυασμό παραγόντων. Το μέγεθος του σεισμού, η εστιακή απόσταση καθώς και οι εδαφολογικές συνθήκες της περιοχής είναι αυτοί οι παράγοντες που καθορίζουν την ύπαρξη ή όχι της κατολίσθησης καθώς και τον τύπο της.

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι πιο κοινοί τύποι κατολισθήσεων που προκαλούνται από έναν σεισμό, όπως τις κατηγοριοποίησε ο *Keefer* το 1984 ύστερα από μελέτη 40 σεισμικών γεγονότων. Οι κύριοι τύποι των κατολισθήσεων υποδιαιρούνται σε μικρότερα είδη σύμφωνα

με το εδαφικό υλικό αστοχίας, την ελάχιστη κλίση του πρανούς τη στιγμή της αστοχίας, και το μέγεθος του σεισμού στην κλίμακα *Richter*. Σε εδαφικά πρανή, όπως φαίνεται από τον πίνακα, οι πτώσεις, οι ολισθήσεις, οι ροές και οι πλευρικές εξαπλώσεις είναι τα κύρια είδη κατολισθητικών φαινομένων που ενεργοποιούνται από έναν σεισμό.

Πίνακας 4.5. Τύποι σεισμικών κατολισθήσεων, (Keefner, 1984)

Κύριος τύπος κατολίσησης	Είδη	Υλικό αστοχίας	Ελάχιστη κλίση πρανούς	Μέγεθος σεισμού ML
Πτώσεις	Εδαφικές πτώσεις	Κοκκώδη εδάφη ελαφρώς συνεκτικά	40° (1.2:1)	4.0
Ολισθήσεις	Εδάφη με μορφή χιονοστιβάδας	Χαλαρά, Μη κορεσμένη άμμος	25° (2.1:1)	6.5
	Ολισθήσεις διαταραγμένων εδαφών	Χαλαρά, Μη κορεσμένη άμμος	15° (3.7:1)	4.0
	Εδαφικές βουτιές	Χαλαρά, μερικώς ή πλήρως κορεσμένη άμμος ή ιλύς, ελαφρώς συμπαγής άμμος, ιλύς ή άργιλος	10° (5.7:1)	4.5
	Ολισθήσεις εδάφους σε μπλοκ	Χαλαρά, μερικώς ή πλήρως κορεσμένη άμμος ή ιλύς, ελαφρώς συμπαγής άμμος, ιλύς ή άργιλος	5° (11:1)	4.5
Ροές και πλευρικές εξαπλώσεις	Αργή ροή χώματος	δύσκαμπος, μερικώς ή πλήρης κορεσμένη άργιλος	10° (5.7:1)	5.0
	Ολίσθηση ροής	Κορεσμένη, μη συμπαγής ή ελαφρώς συμπαγής άμμος ή αμμώδης άργιλος χαλαρά κορεσμένα κοκκώδη εδάφη	2.3° (25:1)	5.0
	Υποβρύχια ροή	Χαλαρά κορεσμένα κοκκώδη εδάφη	0.5° (110:1)	5.0
	Πλευρική εξάπλωση	Χαλαρή μερικώς ή πλήρως κορεσμένη ιλύς ή άμμος	0.3° (190:1)	5.0

4.3.2. Πραγματικά σεισμικά κατολισθητικά φαινόμενα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν κάποια σημαντικά σεισμικά κατολισθητικά φαινόμενα που έχουν καταγραφεί στην πρόσφατη ιστορία. Η *Las Colinas* κατολίσθηση ήταν μία από τις χιλιάδες κατολισθήσεις που ενεργοποιήθηκαν από σεισμό που έγινε στο *El Salvador* τον Ιανουάριο του 2001. Το μέγεθος του σεισμού ήταν $M = 7.6$ και η κατολίσθηση προκάλεσε τεράστιες καταστροφές. Καταγράφηκαν 585 θάνατοι όταν πέρασε από την πόλη *Santa Tecla* η οποία αποτελεί ένα προάστιο του *El Salvador*. Η σεισμική δόνηση που προκλήθηκε από το μεγάλο μέγεθος του σεισμού, προκάλεσε τη ροή κορρημάτων στο κορεσμένο έδαφος της περιοχής. (Εικόνα 4.16)



Εικόνα 4.16. Κατολίσθηση *Las Colinas*, 2001

Η κατολίσθηση *Nikawa* είναι μία από τις πολλές κατολισθήσεις που ενεργοποιήθηκαν από τον μεγάλο σεισμό που έγινε στην πόλη *Kobe* της Ιαπωνίας το 1995. Η κατολίσθηση αυτή προκάλεσε τεράστιες καταστροφές σε κτίρια και ανθρώπινες ζωές. Η σεισμική δόνηση αύξησε την πίεση των πόρων στο πρανές οδηγώντας το στην αστοχία. (Εικόνα 4.17)



Εικόνα 4.17 Κατολίσθηση *Nikawa*, Ιαπωνία, 1995

4.3.3. Μέθοδοι ευστάθειας πρανών υπό δυναμικές συνθήκες

Σε σεισμογενείς περιοχές, όπως είναι η Ελλάδα, δεν αρκεί απλά η γνώση της ευστάθειας των πρανών υπό στατικές συνθήκες, αφού πολλές φορές πρανή που είναι σταθερά υπό στατικές συνθήκες, κατά τη διάρκεια ή μετά από ένα σεισμικό γεγονός, μπορεί να κατολισθήσουν με την έναρξη ενός σεισμού. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ευστάθειας των πρανών και υπό δυναμικές συνθήκες.

Η πολυπλοκότητα του σεισμού ως δυναμικό φαινόμενο καθιστά την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών υπό σεισμικές συνθήκες δύσκολη. Η σεισμική αστοχία μπορεί να επέλθει με δύο τρόπους. Πρώτον ένας σεισμός μπορεί να προσθέσει δυναμική αδρανειακή φόρτιση στις ήδη υπάρχουσες βαρυτικές δυνάμεις και δεύτερον η σεισμική δόνηση μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του εδάφους. Με βάση τις δύο αυτές διαφορετικές επιρροές που μπορεί να έχει ένας σεισμός σε ένα πρανές έχουν αναπτυχθεί δύο κατηγορίες αναλύσεων σεισμικής ευστάθειας πρανών.

1. Στην αδρανειακή ανάλυση ευστάθειας πρανών η διατμητική αντοχή του εδάφους παραμένει σχετικά σταθερή, αλλά η προσωρινή υπέρβαση της διατμητικής αντοχής του εδάφους εξαιτίας των πρόσθετων δυναμικών τάσεων, προκαλεί παραμορφώσεις στο

πρανές και οδηγεί στην αστοχία. Πιο συγκεκριμένα, οι οριζόντιες και κάθετες δυναμικές τάσεις που γεννιούνται από τον σεισμό προστίθενται στις ήδη υπάρχουσες διατμητικές τάσεις του βάρους, υπερβαίνοντας τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί μέθοδοι αδρανειακής ανάλυσης αλλά οι δύο πιο γνωστές είναι η ψευδοστατική μέθοδος και η μέθοδος *Newmark*.

2. Στη συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας πρανών η σεισμική δόνηση αποδυναμώνει την αντοχή του εδάφους, το οποίο δε μπορεί να αντέξει τις επιπλέον τάσεις που προκαλούνται από τον σεισμό και καταρρέει. Η αποδυνάμωση αυτή μπορεί να επέλθει, είτε γιατί η σεισμική δόνηση προκάλεσε αύξηση στην πίεση των πόρων, δημιουργώντας αστράγγιστες συνθήκες ακόμη και στα χονδρόκοκκα εδάφη, είτε δημιούργησε φαινόμενα ρευστοποίησης.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκε η πρώτη περίπτωση.

✓ Ψευδοστατική μέθοδος

Η πιο γνωστή μέθοδος αδρανειακής ανάλυσης είναι η ψευδοστατική μέθοδος. Πρόκειται για μια εύκολη προς κατανόηση μέθοδο και εφαρμόζεται εξίσου εύκολα στις αναλύσεις ενεργών τάσεων και στις αναλύσεις ολικών τάσεων. Η πρώτη εφαρμογή της ψευδοστατικής ανάλυσης έγινε από τον *Terzaghi* το 1950.

Στην ψευδοστατική μέθοδο υπολογίζεται ένας συντελεστής ασφαλείας των πρανών (*factor of safety*) με τον ίδιο τρόπο όπως στις αναλύσεις οριακής ισορροπίας. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι πως αγνοεί τη δυναμική φύση της σεισμικής αδρανειακής δύναμης και την εφαρμόζει ως μία επιπλέον στατική φόρτιση στο πρανές, η οποία δρα στο κέντρο της επιφάνειας αστοχίας.

Η σεισμική αυτή δύναμη, αναλύεται σε οριζόντια (F_h) και κάθετη (F_v) συνιστώσα και θεωρείται αποτέλεσμα της οριζόντιας (a_h) και κάθετης (a_v) σεισμικής επιτάχυνσης. Το μέγεθος των συνιστωσών αυτών υπολογίζεται ως ακολούθως:

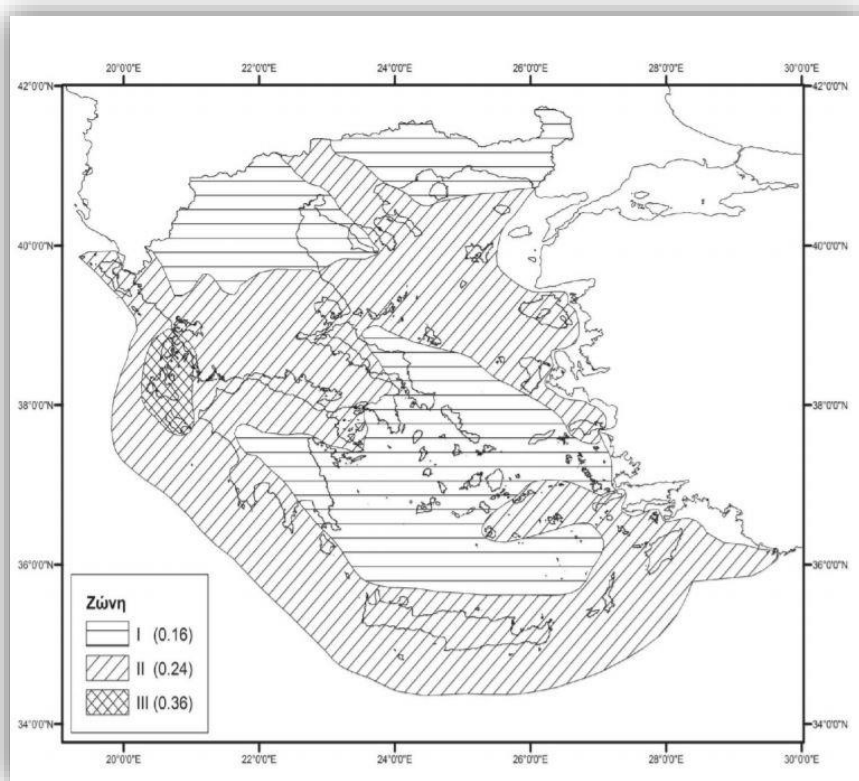
$$F_h = mA_h = \frac{W A_h}{g} = a_h W \quad (4.15)$$

$$F_v = mA_v = \frac{W A_v}{g} = a_v W \quad (4.16)$$

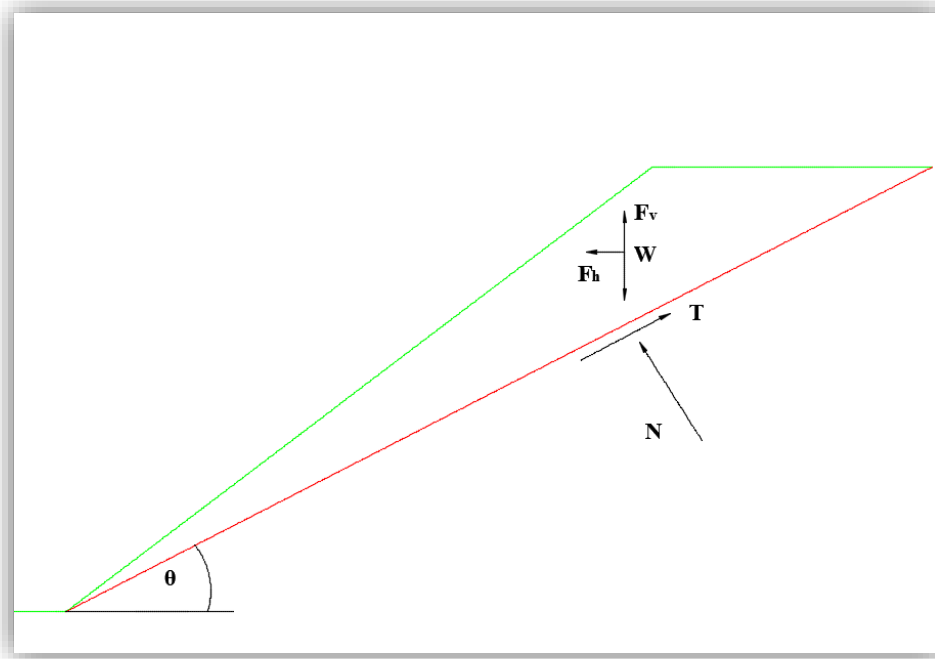
όπου a_h και a_v οριζόντιος και κάθετος συντελεστής επιτάχυνσης αντίστοιχα.

Η επιλογή της κατάλληλης τιμής για τον συντελεστή επιτάχυνσης είναι πολύ κρίσιμη καθώς επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της ψευδοστατικής ανάλυσης. Ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης διαφέρει ανάλογα με την περιοχή και τη σεισμική επικινδυνότητα της. Ο *Terzaghi* πρότεινε, ανάλογα με την ένταση και τις καταστρεπτικές συνέπειες του σεισμού, ως τιμές για τον συντελεστή επιτάχυνσης, $\alpha_h = 0.1$ για ισχυρούς σεισμούς, $\alpha_h = 0,2$ για βίαιους σεισμούς και $\alpha_h = 0,5$ για καταστροφικούς σεισμούς.

Η Ελλάδα υποδιαιρείται σε 3 ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας με διαφορετικές τιμές επιτάχυνσης σχεδιασμού στο βραχώδες υπόβαθρο. Η επιτάχυνση που τελικά θα αναπτυχθεί στο πρηνές αποτελεί συνάρτηση της επιτάχυνσης σχεδιασμού και των τοπικών εδαφικών και τοπογραφικών συνθηκών. (Εικόνα 4.18)



Εικόνα 4.18. Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδας, Ζώνη I : $\alpha_h = 0,16g$, Ζώνη II : $\alpha_h = 0,24g$, Ζώνη III : $\alpha_h = 0,36g$,



Εικόνα 4.19. Δυνάμεις που δρουν σε ένα τριγωνικό πρίσμα εδάφους, πάνω από την επιφάνεια αστοχίας

Κάθε σεισμός υποβάλλει την εδαφική μάζα του πρανούς σε οριζόντια και κάθετη σεισμική δύναμη. Παρόλ' αυτά στην ψευδοστατική ανάλυση η κάθετη συνιστώσα συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς έχει πολύ μικρή επιρροή στον υπολογιζόμενο συντελεστή ασφαλείας, αφού αυξάνει (ή μειώνει ανάλογα με την κατεύθυνση) τις δυνάμεις που οδηγούν στην αστοχία και τις δυνάμεις που αντιστέκονται. Η οριζόντια σεισμική δύναμη μειώνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους, και τον συντελεστή ασφαλείας αντίστοιχα.

$$FS = \frac{cL + [(W - F_v)\cos\theta - F_h s \sin\theta]\tan\phi}{(W - F_v)\sin\theta + F_h \cos\theta} \quad (4.17)$$

Η ψευδοστατική μέθοδος εφαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο και στις μεθόδους των λωρίδων. Ακολουθεί ανάπτυξη της ψευδοστατικής μεθόδου με τη μέθοδο *Bishop*.

4.3.4. Μέθοδος Bishop με δυναμική φόρτιση

Η μέθοδος Bishop όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, αφορά σε μια μέθοδο λωρίδων. Η ανάλυση γίνεται με την οριακή ισορροπία και ο συντελεστής ασφαλείας υπό στατικές συνθήκες εξίσωση 4.18. Εφαρμόζοντας την ψευδοστατική ανάλυση στη μέθοδο Bishop, προστίθενται σε κάθε λωρίδα οι ψευδοστατικές φορτίσεις του σεισμού F_h , F_v . Οπότε ακολουθώντας τα βήματα της ανάλυσης οριακής ισορροπίας και υιοθετώντας τις παραδοχές του Bishop προκύπτει ο σεισμικός συντελεστής ασφάλειας.

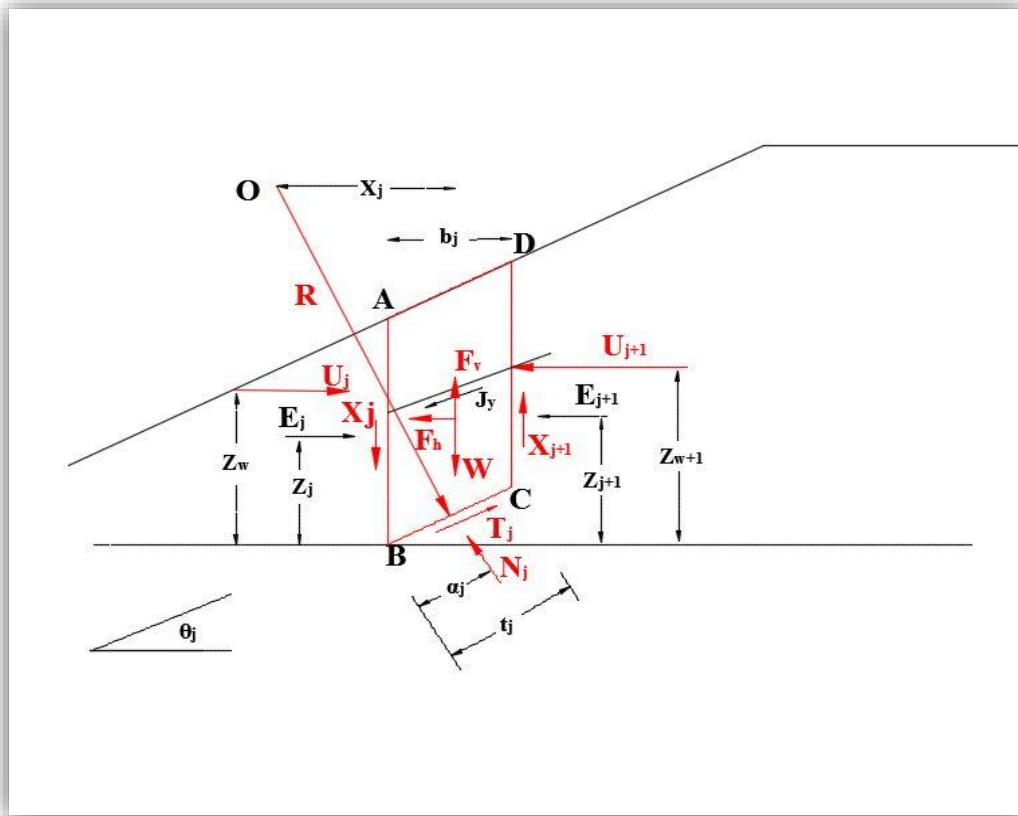
Επισημαίνεται πως δεν ελήφθει υπόψη η κάθετη συνιστώσα του σεισμού για τους λόγους που ήδη έχουν αναφερθεί. Οπότε οι κάθετες δυνάμεις στη λωρίδα είναι :

$$N_j \cos \theta_j + T_j \sin \theta_j - W_j = 0 \quad (4.18)$$

Εφαρμόζοντας την ισότητα των ροπών :

$$\sum W_j x_j + \sum (F_h)_j y_j = \sum T_j R \quad (4.19)$$

Όπου y_j η κάθετη απόσταση ανάμεσα στο κέντρο βάρους της κάθε λωρίδας και κέντρο περιστροφής της επιφάνειας ολίσθησης.



Εικόνα 4.20. Στατικές και ψευδοστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στη λωρίδα σύμφωνα με τη μέθοδο Bishop

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από :

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{(T_f)_j}{T_j} = \frac{cl + N \tan \varphi}{T_j} \quad (4.20)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$FS = \frac{\sum [cb_j + W_j(1 - r_u) + \tan \varphi_j] m_j}{\sum W_j \sin \theta_j + \sum (F_h)_j \frac{y_j}{R}} \quad (4.21)$$

όπου

$$m_j = \frac{1}{\cos \theta_j + \frac{\tan \varphi \sin \theta_j}{FS}} \quad (4.22)$$

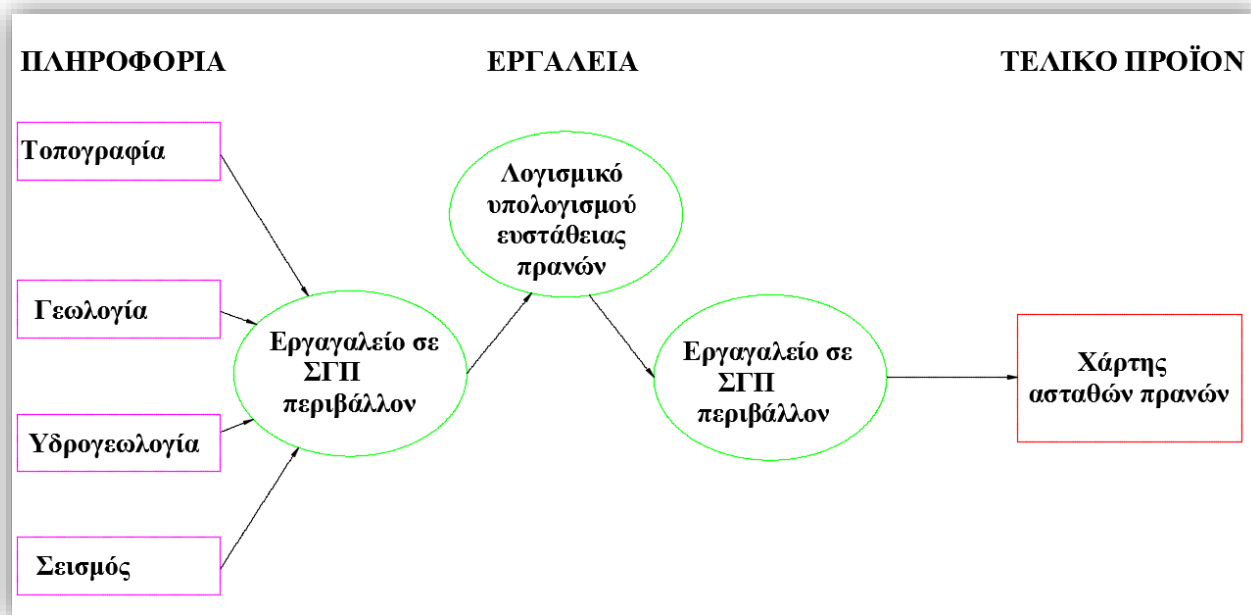
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΤΟ Σ.Γ.Π

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το ημιαυτόματο εργαλείο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον *GIS* στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την παραγωγή χαρτών ασταθών πρανών, με σκοπό τη χρήση του κατά τις μελέτες χάραξης διαδρομής αγωγών. Το περιβάλλον *GIS* που επιλέχθηκε για τη δημιουργία του εργαλείου είναι το λογισμικό *ArcGIS 10.2.2*.

Ο υπολογισμός της ευστάθειας των εδαφικών πρανών, δε πραγματοποιείται στο περιβάλλον *GIS* αλλά σε λογισμικό που αναπτύχθηκε σε γλώσσα *C++* για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής, το οποίο ονομάστηκε *slope.exe*, με σκοπό την καλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Το διάγραμμα ροής των εργασιών μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος, του χάρτη δηλαδή που υποδεικνύει τα ασταθή πρανή, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1. Η λογική λειτουργίας του εργαλείου είναι η εισαγωγή των απαραίτητων επιπέδων πληροφορίας από τον χρήστη στο εργαλείο *ArcGIS*, τα οποία αφού υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία τροφοδοτούν το λογισμικό *slope.exe* που υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας όλων των πρανών της περιοχής και τέλος, οι υπολογισμένοι συντελεστές ασφαλείας εισάγονται στο *ArcGIS* για την τελική παραγωγή του χάρτη.



Εικόνα 5.1. Διάγραμμα ροής εργασιών, που υποδεικνύει την λειτουργία του εργαλείου.

5.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SLOPE.EXE

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε αρχικά το λογισμικό *slope.exe*, το οποίο υπολογίζει την ευστάθεια των πρανών υπό στατικές και υπό δυναμικές συνθήκες. Το *slope.exe* δέχεται στοιχεία του πρανού που αφορούν τη γεωμετρία του, τις εδαφολογικές και υδρολογικές συνθήκες του και στοιχεία που αφορούν τη σεισμολογία της περιοχής. Έπειτα υπολογίζει τον συντελεστή ευστάθειας του πρανού και τον εμφανίζει στην οθόνη.

5.2.1. Προδιαγραφές και δυνατότητες του λογισμικού

Το *slope.exe* είναι ένα πρόγραμμα ανεπτυγμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++, που έχει σαν βασική λειτουργία του τον υπολογισμό της ευστάθειας ενός πρανού, μέσω ενός συντελεστή ασφαλείας (*Factor of Safety*). Η μέθοδος υπολογισμού του *FS* πάνω στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη του προγράμματος είναι η μέθοδος *Bishop (1955)* στην απλοποιημένη της μορφή για συνθήκες ενεργών τάσεων. (Εξίσωση 4.21).

Στις δυνατότητες του λογισμικού συγκαταλέγονται, ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού υπό Στατικές και υπό Δυναμικές συνθήκες, με τη παρουσία ή όχι υπόγειου

υδροφόρου ορίζοντα. Ο συντελεστής ασφαλείας που δίνεται ως αποτέλεσμα είναι ο ελάχιστος που προκύπτει από τη δοκιμή πολλών επιφανειών ολίσθησης.

Στους περιορισμούς του λογισμικού αξίζει να αναφερθεί ότι μπορούν να εξεταστούν ως προς την ευστάθεια τους μόνο ομοιογενή πρηνή. Δεν μπορεί να αναλύσει πρηνή που αποτελούνται από περισσότερα του ενός στρώματα εδάφους.

Η λειτουργία του λογισμικού βασίζεται στην άμεση επικοινωνία του με τον χρήστη. Μέσω της οθόνης του υπολογιστή ζητά δεδομένα που χρειάζεται για τη λειτουργία του, τα οποία ο χρήστης τα εισάγει μέσω του πληκτρολογίου, και τέλος το *slope.exe* παρουσιάζει στην οθόνη το τελικό αποτέλεσμα. Τέλος αναφέρεται πως το πρόγραμμα *slope.exe* μπορεί να τρέξει σε οποιοδήποτε Η/Υ χωρίς εγκατάσταση, απλώς χρησιμοποιώντας το εκτελέσιμο αρχείο (*exe*).

5.2.2. Απαιτήσεις λογισμικού

Για την εξαγωγή του συντελεστή ασφαλείας (*factor of safety*), το λογισμικό *slope.exe* πρέπει να τροφοδοτηθεί με δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τα κύρια χαρακτηριστικά των πρηνών και τους παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια τους σύμφωνα με τη μέθοδο Bishop.

Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να υπολογιστεί υπό στατικές FS_{st} και υπό δυναμικές συνθήκες FS_d και τα απαιτούμενα δεδομένα αφορούν πληροφορίες για τη γεωμετρία του πρηνούς, τα γεωτεχνικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του, καθώς και τη σεισμικότητα της περιοχής αν είναι επιθυμητή η δυναμική ανάλυση. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα δεδομένα που ζητούνται από το πρόγραμμα ανάλογα με την κατηγορία της πληροφορίας που ανήκουν, καθώς και η μορφή ή οι μονάδες στην οποία είναι αναγνωρίσιμα από το πρόγραμμα.

Πίνακας 5.1 Δεδομένα εισόδου στο slope.exe

Χαρακτηριστικά	Δεδομένα Εισόδου	
Γεωμετρικά	Κλίση (H:V)	-
	Ύψος (Height)	M
Γεωτεχνικά	Γωνία τριβής (ϕ)	°
	Συνοχή (c)	kN/m ²
	Ειδικό Βάρος (γ)	kN/m ³
Υδρογεωλογικά	Βάθος Υδροφόρου Οριζοντα (wl)	M
Σεισμικά	Συντελεστής Οριζόντιας Σεισμικής Επιτάχυνσης (ah)	-

Στο σημείο αυτό αναφέρεται πως, ενώ για τη τροφοδότηση του εργαλείου στο GIS απαιτείται μόνο ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς, το πρόγραμμα αναπτύχθηκε δίνοντας τη δυνατότητα εξαγωγής επιπλέον δεδομένων που αφορούν τη γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας. Με τα δεδομένα αυτά δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει το πρανές και την επιφάνεια αστοχίας αν είναι επιθυμητό. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, η δυνατότητα αυτή του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε και με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα σχήματα που παρουσιάζονται στις εφαρμογές των ενότητων 5.2.5 και 5.2.6. Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας όπου παρουσιάζονται τα στοιχεία που εξάγει το λογισμικό *slope.exe*.

Εικόνα 5.2. Δεδομένα εξόδου του slope.exe

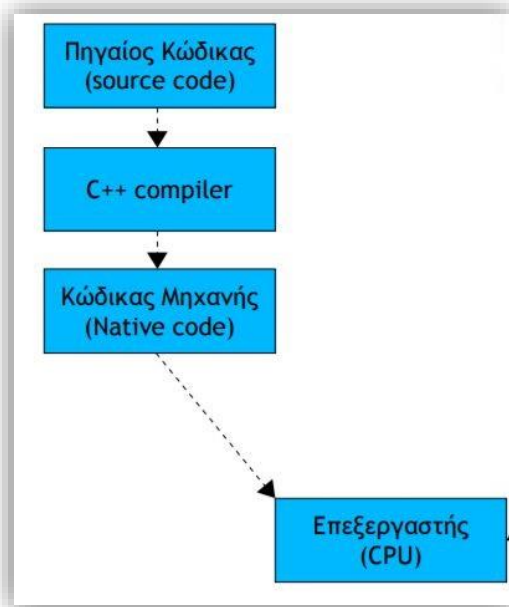
Χαρακτηριστικά	Δεδομένα Εξόδου	
Γεωμετρία Επιφάνειας αστοχίας	Συντεταγμένες βάσης	(Xb,Yb)
	Συντεταγμένες κορυφής	(Xc,Yc)
	Συντεταγμένες κέντρου περιστροφής	(Xo,Yo)
	Ακτίνα επιφάνειας αστοχίας	R
Ευστάθεια πρανούς	Συντελεστής Ασφάλειας	FS

5.2.3. Τεχνολογία

Για την ανάπτυξη του κώδικα του προγράμματος επιλέχθηκε η γλώσσα προγραμματισμού C++, η οποία είναι μια γενικού σκοπού γλώσσα προγραμματισμού Η/Υ. Πρόκειται για μια στατική αντικειμενοστραφή γλώσσα και θεωρείται μέσου επιπέδου, καθώς περιλαμβάνει έναν συνδυασμό χαρακτηριστικών από γλώσσες υψηλού και χαμηλού επιπέδου.

Στην Υποενότητα 3.9.5 αναφέρθηκαν οι δύο τρόποι με τους οποίους ο πηγαίος κώδικας μετατρέπεται σε κώδικα μηχανής. Η C++ ανήκει στην πρώτη κατηγορία γλωσσών προγραμματισμού, όπου ο κώδικας ενός προγράμματος τους απαιτεί μετάφραση σε γλώσσα μηχανής για να λειτουργήσει. Το σύνολο των εντολών της γλώσσας προγραμματισμού, που αποκωδικοποιεί τις εντολές του επεξεργαστή κειμένου και τις μετατρέπει σε γλώσσα μηχανής λέγεται μεταφραστής (*compiler*).

Η C++ είναι λοιπόν μια μεταγλωττιζόμενη γλώσσα προγραμματισμού και απαιτεί έναν *compiler* για την αποκωδικοποίηση των εντολών της. Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται σε διάγραμμα ο τρόπος με τον οποίο μεταγλωττίζεται ο κώδικας γραμμένος σε C++ σε γλώσσα μηχανής ώστε να μπορέσει να εκτελεστεί από τον επεξεργαστή του Η/Υ. Για την ανάπτυξη του *slope.exe* χρησιμοποιήθηκε ο *Dev C++ compiler*.



Εικόνα 5.2. Λειτουργία Compiler της C++, (www.ebooks4greeks.gr)

Έχουν ήδη αναφερθεί αρκετά χαρακτηριστικά της γλώσσας, μερικά από τα οποία όμως αξίζει να επισημανθούν και να αναλυθούν σε μεγαλύτερο βάθος. Ως μια αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού, η C++ δίνει έμφαση στα δεδομένα παρά στον κώδικα. Τα προγράμματα αναπτύσσονται γύρω από τα δεδομένα (*data-centric*) τα οποία ορίζουν από μόνα τους τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να τα διαχειριστούμε.

Στη C++ ο κώδικας αποτελείται από τμήματα που ονομάζονται κλάσεις και συναρτήσεις και είναι επαναχρησιμοποιούμενα σε όλο τη δομή του. Οι κλάσεις δημιουργούν αντικείμενα και περιέχουν τις ιδιότητες και τις μεθόδους που τα περιγράφουν, και αφορούν το κομμάτι του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού της γλώσσας. Η C++ διαθέτει τυπική βιβλιοθήκη με πλούσια συλλογή σε κλάσεις και συναρτήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον προγραμματιστή.

5.2.4. Παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας της εφαρμογής

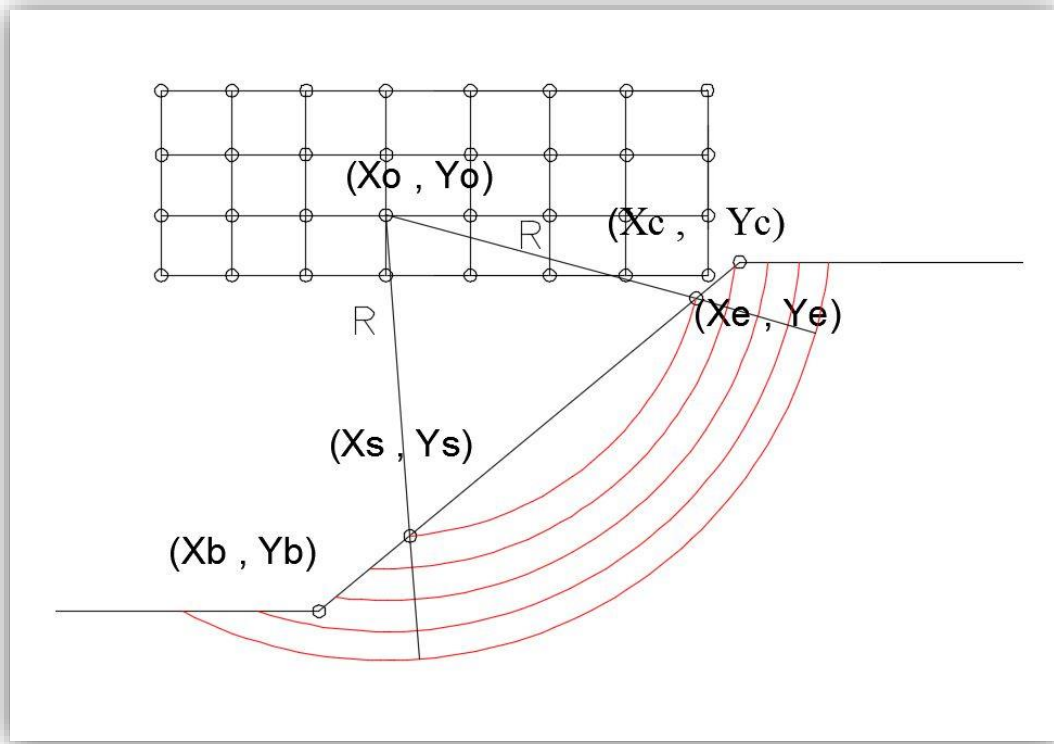
Στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού *slope.exe*, δηλαδή η αλληλουχία των εργασιών που εκτελούνται μέχρι την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος, καθώς και οι διάφορες υποθέσεις που έγιναν κατά την ανάπτυξη του κώδικα.

✓ Υποθέσεις που έγιναν

Κατά τη διάρκεια της συγγραφής του κώδικα χρειάστηκε να γίνουν κάποιες παραδοχές εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Η μέθοδος Bishop, πάνω στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη του λογισμικού, ακόμα και στην απλοποιημένη της μορφή, είναι αρκετά απαιτητική και επιβάλλει κάποιες παραδοχές.

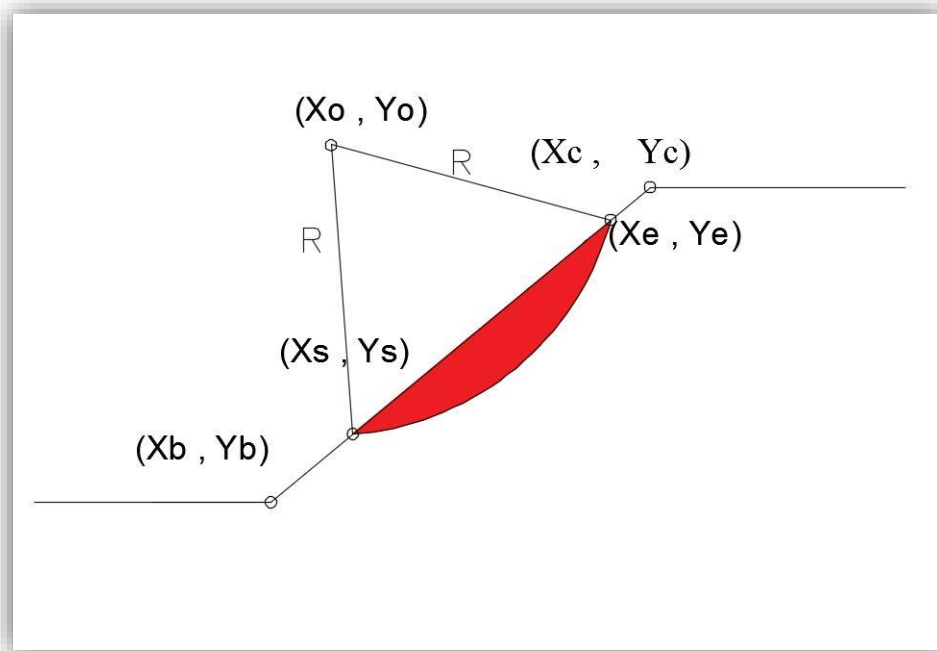
Καταρχήν, επιλέχθηκε οι αναλύσεις να γίνονται για πρηνή που αποτελούνται από ένα μόνο εδαφικό στρώμα, καθώς η μέθοδος *Bishop* είναι καλύτερα εφαρμόσιμη σε ομοιογενή πρηνή και επίσης απλοποιούνται αρκετά οι αναλύσεις. Ομοιογένεια στην προκειμένη περίπτωση σημαίνει πως θα χρειαστεί να εισαχθούν γεωτεχνικά στοιχεία μόνο για ένα εδαφικό υλικό διευκολύνοντας αρκετά την συγγραφή του κώδικα.

Δεύτερη παραδοχή συνυφασμένη με τη μέθοδο, είναι η υπόθεση κυκλικής επιφάνειας αστοχίας. Η μέθοδος *Bishop* για τον καθορισμό του συντελεστή ευστάθειας εξετάζει όλες τις πιθανές επιφάνειες αστοχίας, το οποίο σημαίνει πως η γεωμετρία του σχήματος αλλάζει συνεχώς. Υποτέθηκε κάρναβος πιθανών σημείων τα οποία αντιπροσωπεύουν κέντρα πιθανών κυκλικών επιφανειών αστοχίας και για κάθε σημείο εξετάστηκαν μέχρι ένα βάθος πιθανοί κύκλοι αστοχίας. (Εικόνα 5.3)

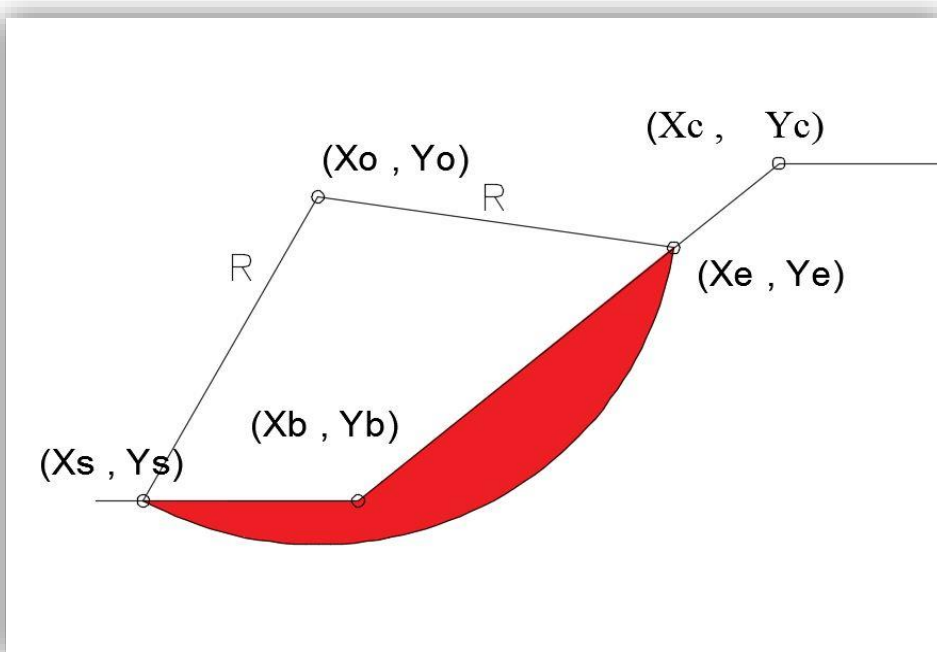


Εικόνα 5.3. Μεταβαλλόμενη γεωμετρία του σχήματος εξαιτίας της εξέτασης όλων των πιθανών επιφανειών αστοχίας

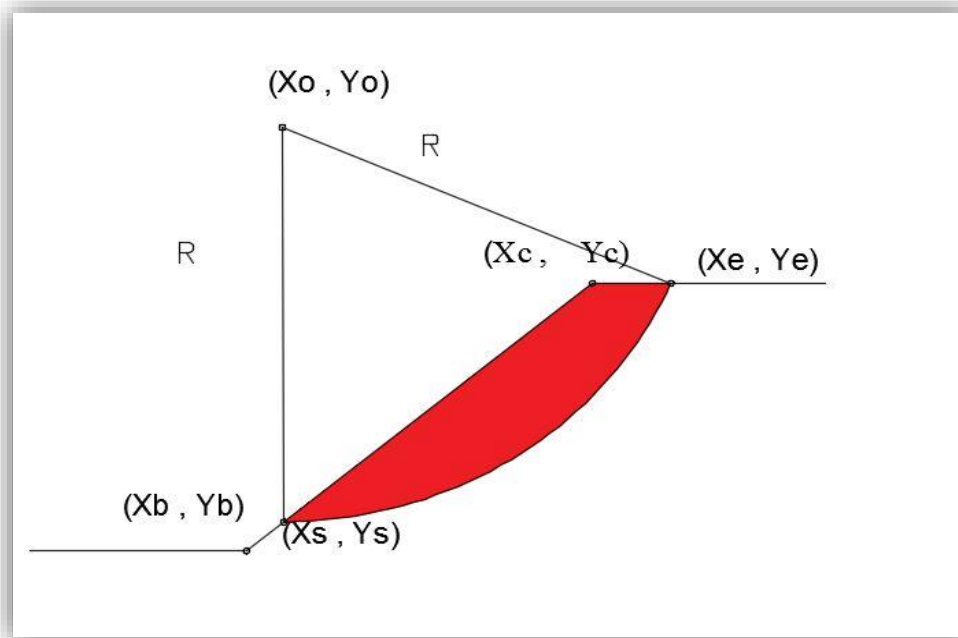
Οπότε, το πρόγραμμα εξετάζει όλες τις πιθανές επιφάνειες αστοχίας σε όλα τα σημεία του καννάβου. Κατά την ανάπτυξη του προγράμματος υποτέθηκαν τέσσερις πιθανές περιπτώσεις επιφάνειας αστοχίας που μπορεί να χρειαστεί να εξεταστούν. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι τέσσερις περιπτώσεις γεωμετρίας που εξετάζονται. Οι συντεταγμένες (X_b, Y_b) και (X_c, Y_c) αντιπροσωπεύουν τις συντεταγμένες των σημείων της βάσης και της κορυφής του πρανούς, και οι (X_s, Y_s) και (X_e, Y_e) , τις συντεταγμένες των σημείων όπου τέμνει η κυκλική επιφάνεια αστοχίας το πρανός. Με την αλλαγή της επιφάνειας αστοχίας οι (X_s, Y_s) και (X_e, Y_e) , είναι αυτές που αλλάζουν ενώ οι (X_b, Y_b) και (X_c, Y_c) παραμένουν πάντα σταθερές.



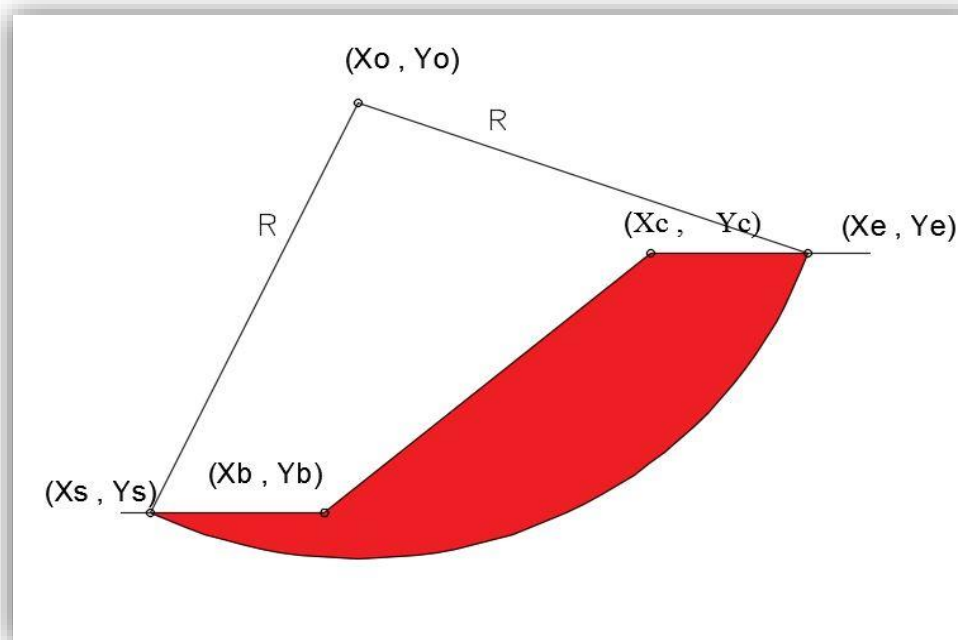
Εικόνα 5.4. Περίπτωση 1 : η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται μέσα στο πρηνές



Εικόνα 5.5. Περίπτωση 2. Η επιφάνεια ολίσθησης ξεκινά μέσα από το πρηνές και καταλήγει στη βάση.



Εικόνα 5.6. Περίπτωση 3. Η επιφάνεια ολίσθησης ξεκινά από την κορυφή και καταλήγει μέσα στο πτανές

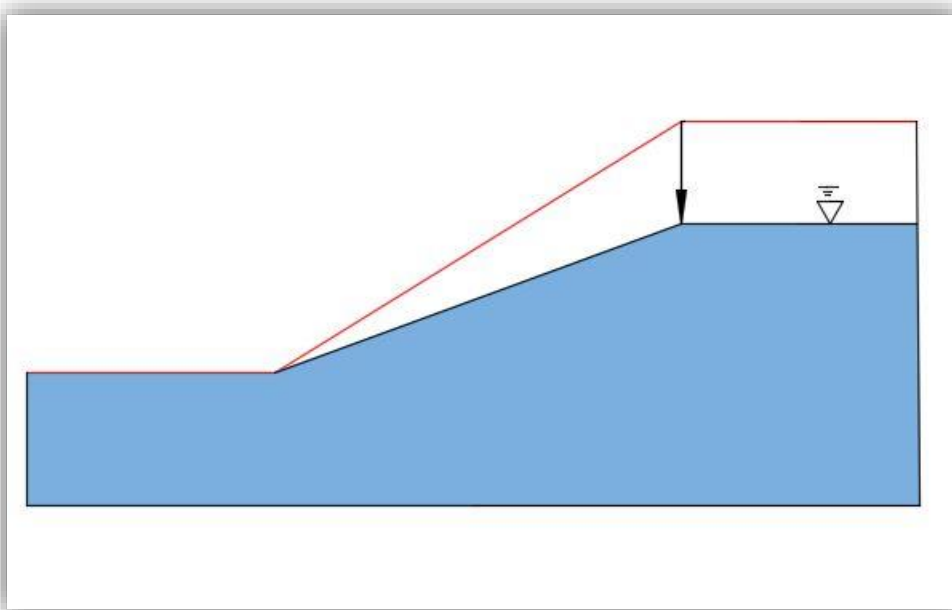


Εικόνα 5.7. Περίπτωση 4. Η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται σε όλο το πτανές

Η επόμενη παραδοχή αφορά τον αριθμό των λωρίδων. Όπως έχει ήδη ειπωθεί η μέθοδος *Bishop* πρόκειται για μία μέθοδο που χωρίζει το πρηνές σε λωρίδες για να το αναλύσει. Για να υπάρχει ορθότητα στα αποτελέσματα πρέπει ο αριθμός των λωρίδων που υποτίθενται να είναι πάντα μεγαλύτερος του πέντε. Στο λογισμικό *slope.exe* υποτέθηκε ότι η επιφάνεια ολίσθησης θα χωρίζεται κάθε φορά σε 20 λωρίδες, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την ιδιαιτερότητα της γλώσσα C++ ως μίας γλώσσας αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, δημιουργήθηκε μια κλάση για τη λωρίδα. Κάθε λωρίδα αντιμετωπίζεται ως ένα αντικείμενο με ιδιότητες, όλα τα χαρακτηριστικά (γεωμετρικά, γεωτεχνικά, υδρολογικά) που την χαρακτηρίζουν και μεθόδους που υπολογίζουν τις δυνάμεις της.

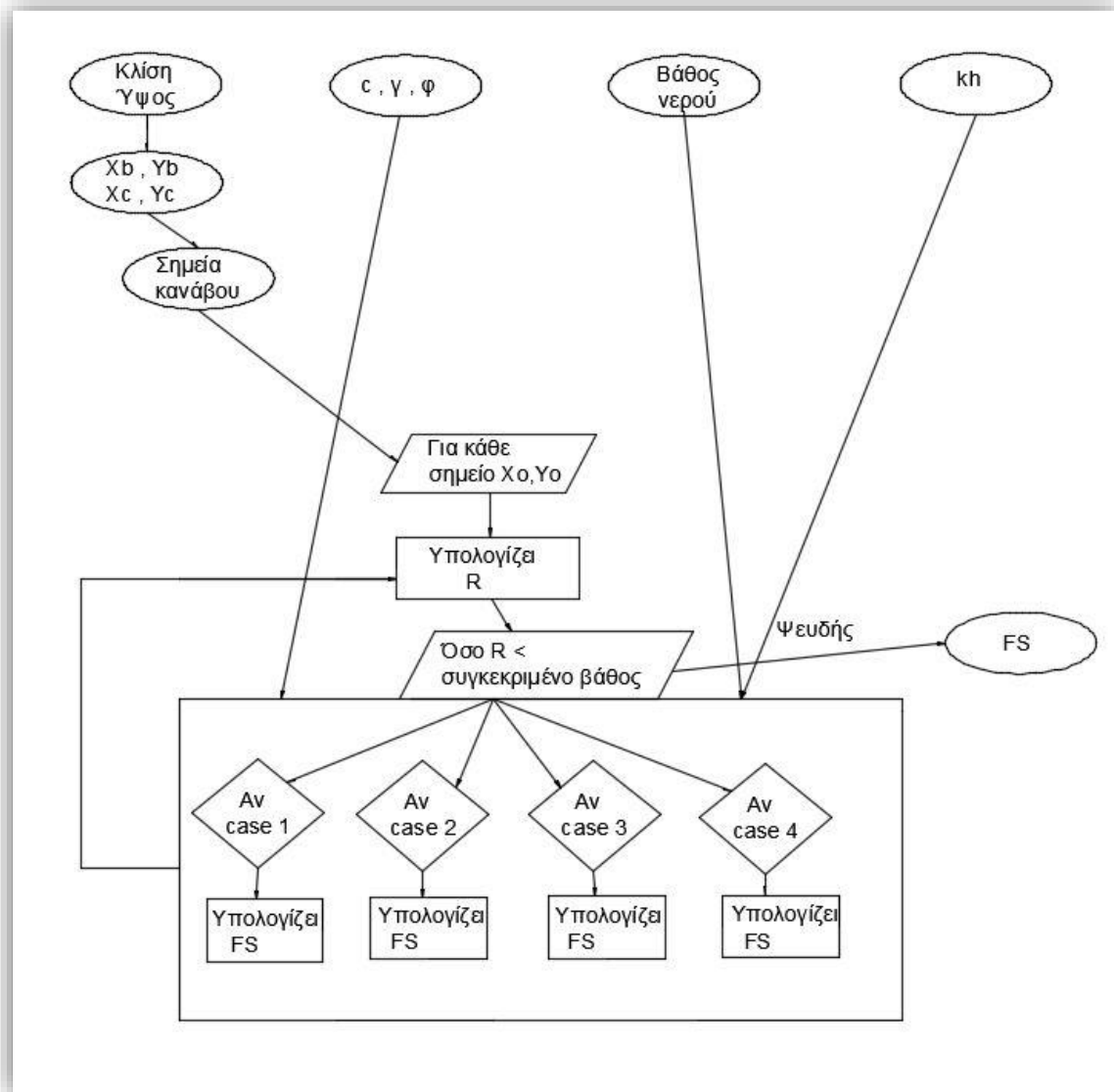
Τέλος, όσον αφορά τα υπόγεια νερά του πρηνούς, οι πιέσεις των πόρων αντιπροσωπεύονται από μια σταθερή κατάσταση με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στη στάθμη του πόδα, πέρα από αυτόν και κεκλιμένο στο πρηνές υπό διάφορες γωνίες, οι οποίες δίνονται συναρτήσει του βάθους από τη στάθμη της κορυφής. (Εικόνα 5.8.)



Εικόνα 5.8. Υπόθεση υδροφόρου ορίζοντα

✓ Διάγραμμα ροής προγράμματος

Για την παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας του λογισμικού, σχεδιάστηκε ένα διάγραμμα ροής το οποίο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Η διαγραμματική αυτή παρουσίαση αναπαριστά τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, σε μια γενική του μορφή. Τα οβάλ σχήματα υποδεικνύουν τα δεδομένα, τα βέλη υποδεικνύουν την ροή των δεδομένων, ενώ τα ορθογώνια, οι ρόμβοι και τα παραλληλόγραμμα αντιστοιχούν σε ακολουθίες, αποφάσεις, και επαναλήψεις.



Εικόνα 5.9. Διάγραμμα ροής δεδομένων του αλγορίθμου του *slope.exe*

5.2.5. Επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του λογισμικού

Για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων του λογισμικού *slope.exe*, εκτελέστηκαν τρεις εφαρμογές με γνωστό συντελεστή ασφαλείας και γεωμετρία επιφάνειας αστοχίας, από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι εφαρμογές αυτές παρουσιάζονται παρακάτω, όπου για κάθε εφαρμογή δίνονται τα στοιχεία του πρσανούς, τα αποτελέσματα του *slope.exe* όπως παρουσιάζονται στην οθόνη, και σχέδιο με την επιφάνεια αστοχίας.

✓ Εφαρμογή 1^η : (Παράδειγμα 12.5, Εδαφομηχανική, G.E.Barnes)

```

SLOPE.EXE

CALCULATE SLOPE STABILITY
*****
Simplified Bishop (1955)

*****
*****
*****

^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^
insert Horizontal:Vertical      :  2 1
insert Heigh of the slope (m)  :  10

^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^
insert friction angle of soil (degrees) : 30
insert cohesion of soil (KN/m^2)       :  5
insert unit weigh of soil (KN/m^3)     : 20

^^ WATER CONDITIONS ^^
insert water level under the crest (m) :  5

^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^
insert horizontal seismic coiffecient  :  0
*****
***** RESULTS *****
*****

^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^
Point of Base      (xb,yb) : (100),(100)

Point of Crest     (xc,yc) : (120),(110)

Point of Rotation  (0i,0j) : (104.286),(117.857)

Radius of Circle   : 19.0553

Factor of Safety Static : 1.39803

```

Στην εφαρμογή αυτή δίνεται πρανές με κλίση 2:1 (οριζόντια : κατακόρυφα), ύψους 10m κατασκευασμένο σε δύσκαμπτη άργιλο. Οι παράμετροι του εδάφους είναι:

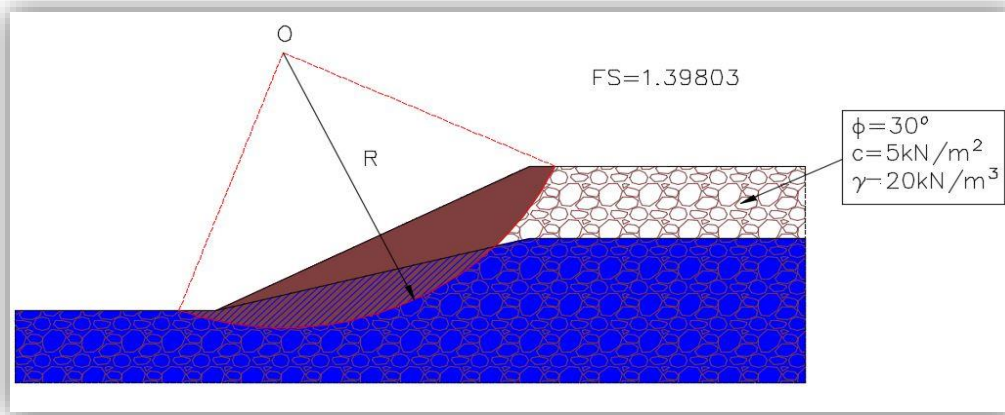
Συνοχή ($c = 5\text{kN/m}^2$), Γωνία τριβής ($\varphi=30^\circ$), Ειδικό βάρος ($\gamma = 20\text{kN/m}^3$)

Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι 5,0m κάτω από την κορυφή του πρσανούς.

Το *slope.exe* υπολόγισε $FS = 1,39$, αποτέλεσμα που σχεδόν ταυτίζεται με αυτό του παραδείγματος.

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σχεδιασμένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα του *slope.exe*.

Εικόνα 5.10. Εφαρμογή 1^η , (*slope.exe*)



Εικόνα 5.11 . Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 1

✓ Εφαρμογή 2^η : (Παράδειγμα 12.9 Εδαφομηχανική, G.E.Barnes)

```

SLOPE.EXE
CALCULATE SLOPE STABILITY
*****
Simplified Bishop (1955)
*****
*****
*****
^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^
insert Horizontal:Vertical      : 3 1
insert Height of the slope (m) : 9

^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^
insert friction angle of soil (degrees) : 26
insert cohesion of soil (KN/m^2)       : 3
insert unit weigh of soil (KN/m^3)     : 22.2

^^ WATER CONDITIONS ^^
insert water level under the crest (m) : 2.7

^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^
insert horizontal seismic coiffecient  : 0
*****
**** RESULTS ****
*****

^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^
Point of Base      (xb,yb) : (100),(100)
Point of Crest     (xc,yc) : (127),(109)
Point of Rotation  (Oi,Oj) : (107.714),(122.5)
Radius of Circle   : 24.3059
Factor of Safety Static : 1.37231
    
```

Στην εφαρμογή αυτή δίνεται πρανές με κλίση 3:1 (οριζόντια : κατακόρυφα), ύψους 9m κατασκευασμένο σε δύσκαμπτη άργιλο. Οι παράμετροι του εδάφους είναι:

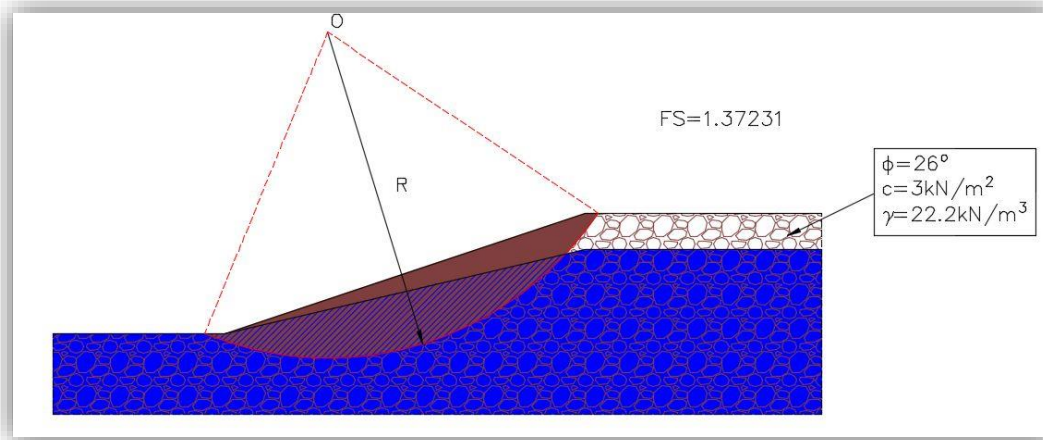
Συνοχή ($c = 3\text{kN/m}^2$), Γωνία τριβής ($\phi = 26^\circ$), Ειδικό βάρος ($\gamma = 22.2\text{kN/m}^3$)

Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι 5,0m κάτω από την κορυφή του πρανούς.

Το *slope.exe* υπολόγισε $FS = 1,37$, αποτέλεσμα που σχεδόν ταυτίζεται με αυτό του παραδείγματος.

Στην Εικόνα 5.13 παρουσιάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σχεδιασμένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα του *slope.exe*.

Εικόνα 5.12. Εφαρμογή 2^η , (*slope.exe*)



Εικόνα 5.13. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 2

✓ Εφαρμογή 3^η : Παράδειγμα 9.2.7 (Geotechnical Engineering Handbook, Robert Day)

```

SLOPE.EXE
CALCULATE SLOPE STABILITY
*****
Simplified Bishop (1955)
*****
*****
*****
^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^
insert Horizontal:Vertical      : 2 1
insert Heigh of the slope (m) : 7.62

^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^
insert friction angle of soil (degrees) : 37
insert cohesion of soil (KN/m^2)       : 0
insert unit weigh of soil (KN/m^3)     : 19.64

^^ WATER CONDITIONS ^^
insert water level under the crest (m) : 9

^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^
insert horizontal seismic coifficient  : 0.4
*****
***** RESULTS *****
*****

^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^
Point of Base      (xb,yb) : (100),(100)
Point of Crest     (xc,yc) : (115.24),(107.62)
Point of Rotation  (Oi,Oj) : (100),(119.05)
Radius of Circle   : 17.8008
Factor of Safety Dynamic : 0.713118
    
```

Στην εφαρμογή αυτή δίνεται πρανές με κλίση 2:1 (οριζόντια : κατακόρυφα), ύψους 7.62m κατασκευασμένο σε συμπαγές έδαφος. Οι παράμετροι του εδάφους είναι:

Συνοχή ($c = 0 \text{ kN/m}^2$), Γωνία τριβής ($\phi = 37^\circ$), Ειδικό βάρος ($\gamma = 19,64 \text{ kN/m}^3$)

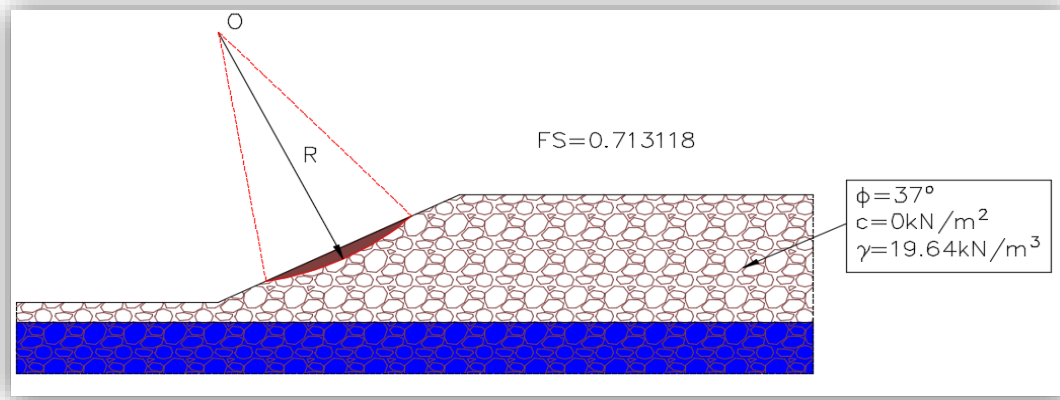
Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι 9,0m κάτω από την κορυφή του πρανούς.

Ο συντελεστής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης της περιοχής είναι ($k_h = 0.40$)

Το *slope.exe* υπολόγισε $FS = 0.71$ αποτέλεσμα που σχεδόν ταυτίζεται με αυτό του παραδείγματος.

Στην Εικόνα 5.15 παρουσιάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σχεδιασμένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα του *slope.exe*.

Εικόνα 5.14. Εφαρμογή 3^η, (*slope.exe*)



Εικόνα 5.15. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 3

5.2.6. Εφαρμογές για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Στην υποενότητα αυτή της διπλωματικής θα παρουσιαστούν εφαρμογές, από τα αποτελέσματα των οποίων θα ερμηνευτεί η επίδραση του υπόγειου νερού και κυρίως του σεισμού στον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς. Επιλέχθηκε η εφαρμογή 1^η της προηγούμενης υποενότητας, στην οποία υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας σε συνθήκες πίεσης πόρων του πρανούς. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο πρανές υποτέθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην 1^η και στη 2^η περίπτωση αφαιρέθηκε εντελώς το νερό και υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας για στατικές και δυναμικές συνθήκες, και στη 3^η περίπτωση έγιναν υπολογισμοί υποθέτοντας παρουσία νερού και σεισμού.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που ακολουθούν φαίνεται καθαρά η επίδραση του υπόγειου νερού και του σεισμού στον συντελεστή ασφαλείας. Ιδιαίτερα στην 3^η περίπτωση ο συντελεστής ασφαλείας μειώθηκε αισθητά, όπου ο συντελεστής ασφαλείας έφτασε να είναι κάτω από τη μονάδα ($FS < 1$). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.3. Σύγκριση συντελεστή ευστάθειας σε διαφορετικές συνθήκες, (slope.exe)

FS	ΧΩΡΙΣ ΝΕΡΟ	ΜΕ ΝΕΡΟ
ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	1.61	1.39
ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	1.15	0.98

✓ Εφαρμογή 1^η : (Παράδειγμα 12.5 Barnes) χωρίς υπόγειο νερό, στατικές συνθήκες

```

SLOPE.EXE

CALCULATE SLOPE STABILITY
*****
Simplified Bishop (1955)

*****
*****

^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^
insert Horizontal:Vertical      : 2 1
insert Heigh of the slope (m)  : 10

^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^
insert friction angle of soil (degrees) : 30
insert cohesion of soil (KN/m^2)       : 5
insert unit weigh of soil (KN/m^3)     : 20

^^ WATER CONDITIONS ^^
insert water level under the crest (m) : 0

^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^
insert horizontal seismic coifficient  : 0
*****
**** RESULTS ****
*****

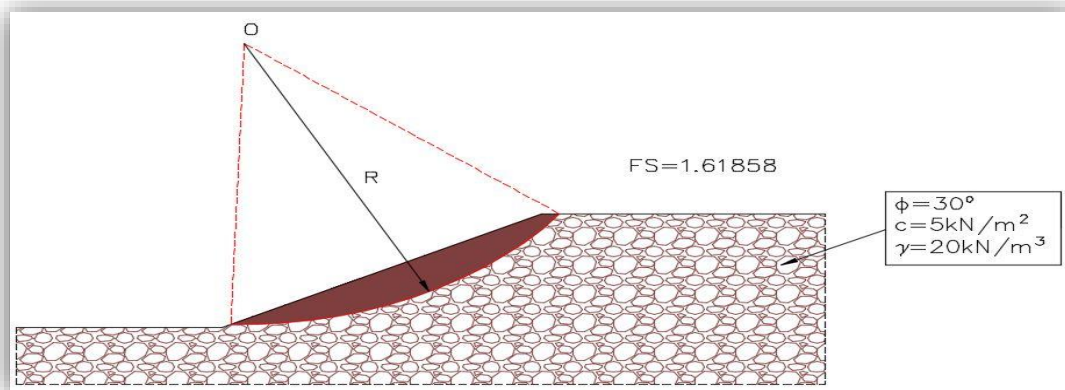
^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^
Point of Base   (xb,yb) : (100),(100)
Point of Crest  (xc,yc) : (120),(110)
Point of Rotation (Oi,Oj) : (101.429),(125)
Radius of Circle      : 24.7218
Factor of Safety Static : 1.61858
    
```

Στην εφαρμογή αυτή δίνεται πρανές με κλίση 2:1 (οριζόντια : κατακόρυφα), ύψους 10m κατασκευασμένο σε δύσκαμπτη άργιλο. Οι παράμετροι του εδάφους είναι: Συνοχή ($c = 5\text{kN/m}^2$), Γωνία τριβής ($\phi=30^\circ$), Ειδικό βάρος ($\gamma = 20\text{kN/m}^3$)

Το *slope.exe* υπολόγισε $FS = 1,62$.

Στην Εικόνα 5.17 παρουσιάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σχεδιασμένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα του *slope.exe*.

Εικόνα 5.16. Εφαρμογή 1^η , (*slope.exe*)



Εικόνα 5.17. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 1

Εφαρμογή 2^η : (Παράδειγμα 12.5 Barnes) χωρίς υπόγειο νερό, δυναμικές συνθήκες

```

SLOPE.EXE
CALCULATE SLOPE STABILITY
*****
Simplified Bishop (1955)
*****
*****
*****

^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^
insert Horizontal:Vertical      : 2 1
insert Heigh of the slope (m) : 10

^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^
insert friction angle of soil (degrees) : 30
insert cohesion of soil (KN/m^2)       : 5
insert unit weigh of soil (KN/m^3)     : 20

^^ WATER CONDITIONS ^^
insert water level under the crest (m) : 0

^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^
insert horizontal seismic coifficient  : 0.16
*****
***** RESULTS *****
*****

^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^
Point of Base   (xb,yb) : (100),(100)
Point of Crest  (xc,yc) : (120),(110)
Point of Rotation (Oi,Oj) : (101.429),(125)
Radius of Circle      : 24.7218
Factor of Safety Dynamic : 1.15725
    
```

Στην εφαρμογή αυτή δίνεται πρανές με κλίση 2:1 (οριζόντια : κατακόρυφα), ύψους 10m κατασκευασμένο σε δύσκαμπτη άργιλο. Οι παράμετροι του εδάφους είναι:

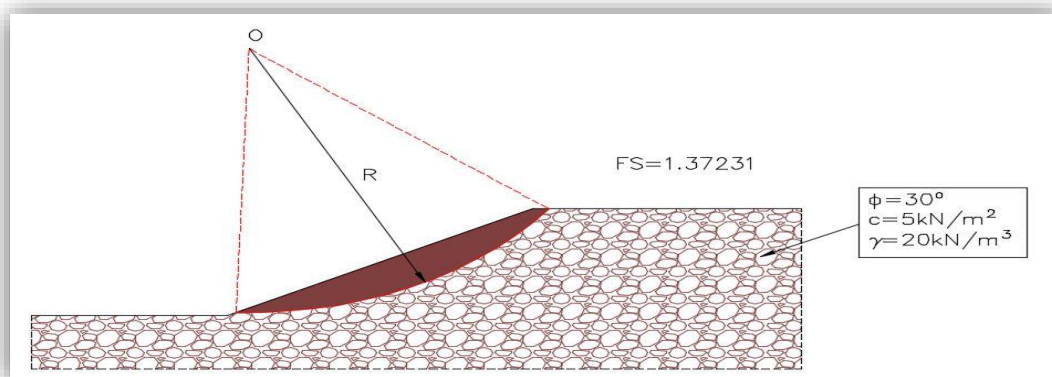
Συνοχή ($c = 5\text{kN/m}^2$), Γωνία τριβής ($\phi=30^\circ$), Ειδικό βάρος ($\gamma = 20\text{kN/m}^3$)

Ο συντελεστής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης της περιοχής υποτέθηκε ($ah=0.16$).

Το *slope.exe* υπολόγισε $FS = 1,15$.

Στην Εικόνα 5.19 παρουσιάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σχεδιασμένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα του *slope.exe*.

Εικόνα 5.18. Εφαρμογή 2^η , (*slope.exe*)



Εικόνα 5.19. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 2

Εφαρμογή 3^η : (Παράδειγμα 12.5 Barnes) με υπόγειο νερό, δυναμικές συνθήκες

```

SLOPE.EXE

CALCULATE SLOPE STABILITY
*****
Simplified Bishop (1955)

*****
*****

^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^

insert Horizontal:Vertical      : 2 1
insert Heigh of the slope (m)  : 10

^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^

insert friction angle of soil (degrees) : 30
insert cohesion of soil (KN/m^2)       : 5
insert unit weigh of soil (KN/m^3)     : 20

^^ WATER CONDITIONS ^^
insert water level under the crest (m) : 5

^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^
insert horizontal seismic coifficient  : 0.16
*****
**** RESULTS ****
*****

^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^
Point of Base (xb,yb) : (100),(100)
Point of Crest (xc,yc) : (120),(110)
Point of Rotation (Oi,Oj) : (102.857),(120.714)
Radius of Circle      : 22.2497
Factor of Safety Dynamic : 0.984673
    
```

Στην εφαρμογή αυτή δίνεται πρανές με κλίση 2:1 (οριζόντια : κατακόρυφα), ύψους 10m κατασκευασμένο σε δύσκαμπτη άργιλο. Οι παράμετροι του εδάφους είναι:

Συνοχή ($c = 5\text{kN/m}^2$), Γωνία τριβής ($\phi=30^\circ$), Ειδικό βάρος ($\gamma = 20\text{kN/m}^3$)

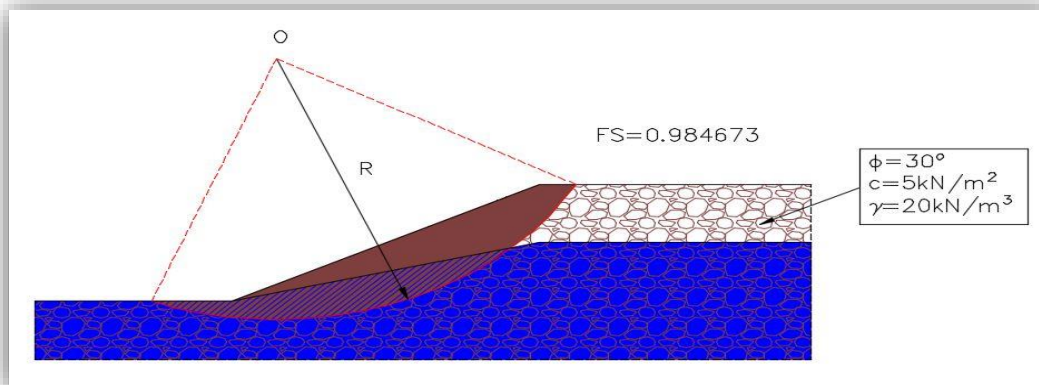
Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι 5,0m κάτω από την κορυφή του πρανούς.

Ο συντελεστής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης της περιοχής υποτέθηκε ($ah=0.16$)

Το *slope.exe* υπολόγισε $FS = 0,98$.

Στην Εικόνα 5.21 παρουσιάζεται η επιφάνεια ολίσθησης σχεδιασμένη σύμφωνα με τα αποτελέσματα του *slope.exe*.

Εικόνα 5.20. Εφαρμογή 3^η , (*slope.exe*)



Εικόνα 5.21. Σχέδιο της επιφάνειας αστοχίας για το πρανές της εφαρμογής 3

5.2.7. Τροποποίηση λογισμικού

Ο σκοπός για τον οποίο αναπτύχθηκε το λογισμικό *slope.exe* είναι την τροφοδότηση του ημιαυτόματου εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων στο GIS με τον συντελεστή ασφαλείας όλων των πρηνών του χάρτη μιας περιοχής. Καθώς τα δεδομένα που θα δέχεται το *slope.exe* αφορούν μεγάλο αριθμό πρηνών και δεδομένης της επιθυμίας αυτοματοποίησης της συνολικής διαδικασίας, ο τρόπος επικοινωνίας *slope.exe* με τον χρήστη μέσω της οθόνης του Η/Υ και του πληκτρολογίου έπρεπε να τροποποιηθεί. Το *slope.exe* προσαρμόστηκε στο να δέχεται και να εξάγει δεδομένα μέσω *txt* αρχείων και μετονομάστηκε σε *FactorOfSafety.exe*

5.3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας αναπτύχθηκε εργαλείο σε γλώσσα προγραμματισμού *Python* στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών *ArcGIS Desktop* για την παραγωγή χαρτών ευστάθειας πρηνών υπό στατικές ή υπό σεισμικές συνθήκες. Το εργαλείο δεν είναι τελείως αυτοματοποιημένο καθώς ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας πραγματοποιείται εκτός του *ArcGIS Desktop*, με τη χρήση του λογισμικού *FactorOfSafety.exe*.

Για τη παραγωγή του τελικού χάρτη, μέσα στο GIS περιβάλλον οι εργασίες χωρίζονται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση εισάγονται τα απαραίτητα επίπεδα γεωγραφικής και περιγραφικής πληροφορίας τα οποία επεξεργάζονται και εξάγονται σε μορφή πινάκων ώστε να εισαχθούν στο εξωτερικό λογισμικό από τον χρήστη και στην δεύτερη φάση τα αποτελέσματα του συντελεστή ασφαλείας εισάγονται στο GIS περιβάλλον για την απόδοση τους στον χάρτη.

Πιο συγκεκριμένα για την πραγματοποίηση των εργασιών των δύο φάσεων στο ArcGIS δημιουργήθηκε *Python Toolbox* (εργαλειοθήκη) με όνομα *SlopeStabilityAnalysis.pyt* στην οποία ενσωματώθηκαν δύο εργαλεία. Το πρώτο εργαλείο, *ExportSoilDataToTABLE*, πραγματοποιεί τις εργασίες της πρώτης φάσης εξάγοντας σε μορφή πίνακα τα χαρακτηριστικά όλων των πρηνών της περιοχής και το δεύτερο εργαλείο, *SlopeStabilityMap*, πραγματοποιεί τις εργασίες της δεύτερης φάσης, αποδίδοντας σε χάρτη τα ασταθή πρηνή της περιοχής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία κάθε εργαλείου ξεχωριστά καθώς και τα διαγράμματα ροής των εργασιών τους. Ο κώδικας ανάπτυξης του εργαλείου παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

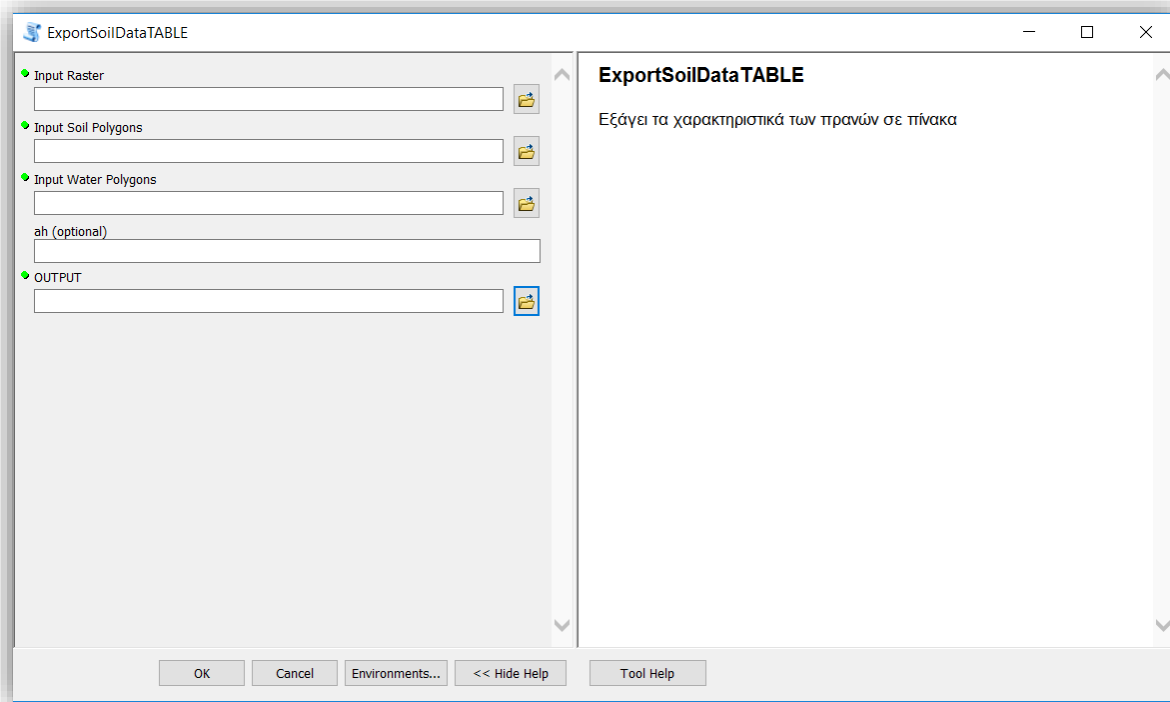
5.3.1. Πρώτη φάση (*ExportSoilDataTABLE*)

Στην πρώτη φάση των εργασιών, για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών των πρηνών σε πίνακα, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τα απαραίτητα επίπεδα πληροφορίας στο εργαλείο *ExportSoilDataTABLE*. Η πληροφορία αυτή αφορά την υψομετρία της περιοχής, τα εδαφολογικά και υδρολογικά στοιχεία της, και αν είναι επιθυμητή η εξαγωγή χαρτών σεισμικής αστάθειας πρηνών, η οριζόντια σεισμική επιτάχυνση της περιοχής. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα επίπεδα αυτά, καθώς και τα δεδομένα που τα αντιπροσωπεύουν με τους κατάλληλου τύπους αρχείων που δέχεται το πρόγραμμα.

Πίνακας 5.4. Δεδομένα εισόδου σε *ExportSoilDataTable*,

Επίπεδο Πληροφορίας	Δεδομένα	Τύπος αρχείου
Υψομετρία περιοχής	Υψομετρικό μοντέλο εδάφους	DEM, TIF, Raster
Γεωλογία περιοχής	Χάρτης Εδαφολογικός	Polygon
Υδρογεωλογία περιοχής	Χάρτης Υδρολογίας	Polygon
Σεισμικά	Οριζόντιος σεισμικός συντελεστής	Double

Στην Εικόνα 5.22 παρουσιάζεται το παράθυρο που ανοίγει με την ενεργοποίηση του *ExportSoilDataTABLE* όπου φαίνονται τα τέσσερα πεδία που πρέπει να εισαχθούν τα δεδομένα. Αφού ο χρήστης εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα και πατήσει OK, το εργαλείο τρέχει. Μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζεται στα έγγραφα πίνακας *excel*, όπου κάθε γραμμή αποτελεί ένα πρηνές. Η κωδικοποίηση της πρώτης στήλης αποτελεί την ταυτότητα του αντικείμενου του πρηνούς και είναι απαραίτητη για τη σύνδεση του με τον χάρτη. Επιπλέον στο περιβάλλον του ArcMAP εμφανίζεται χάρτης με τα πρηνή της περιοχής σε πολυγωνική μορφή.



Εικόνα 5.22. Παράθυρο εργαλείου *ExportSoilDataTABLE*, (ArcGIS 10.2.2 , 2017)

1	OBJECTID	water_level	γ	c	φ	MEAN_slope	Shape_Length	ah
2	1	0	20	5	30	8.845425868	38.84165945	0.24
3	2	0	20	5	30	8.845425868	61.10708725	0.24
4	3	0	20	5	30	8.845425868	39.61901015	0.24
5	4	0	20	5	30	8.845425868	277.9860375	0.24
6	5	0	20	5	30	8.845425868	40.00000001	0.24
7	6	0	20	5	30	8.845425868	37.89015776	0.24
8	7	0	20	5	30	8.845425868	40.1857548	0.24
9	8	0	20	5	30	8.845425868	32.36168531	0.24
10	9	0	20	5	30	8.845425868	40.65199835	0.24
11	10	0	20	5	30	8.845425868	54.33127086	0.24
12	11	0	20	5	30	8.845425868	76.49217626	0.24
13	12	0	20	5	30	8.845425868	63.92297558	0.24
14	13	0	20	5	30	8.845425868	39.88824887	0.24
15	14	0	20	5	30	8.845425868	99.9893092	0.24
16	15	0	20	5	30	8.845425868	26.25524468	0.24
17	16	0	20	5	30	8.845425868	1117.464118	0.24
18	17	0	20	5	30	8.845425868	488.604334	0.24
19	18	0	20	5	30	8.845425868	119.7872588	0.24
20	19	0	20	5	30	8.845425868	40	0.24
21	20	0	20	5	30	8.845425868	118.029214	0.24
22	21	0	20	5	30	8.845425868	27.63963309	0.24
23	22	0	20	5	30	8.845425868	102.3096965	0.24
24	23	0	20	5	30	8.845425868	29.88743628	0.24
25	24	0	20	5	30	8.845425868	124.3257541	0.24
26	25	0	20	5	30	8.845425868	26.11638078	0.24
27	26	0	20	5	30	8.845425868	29.88743628	0.24
28	27	0	20	5	30	8.845425868	106.824238	0.24

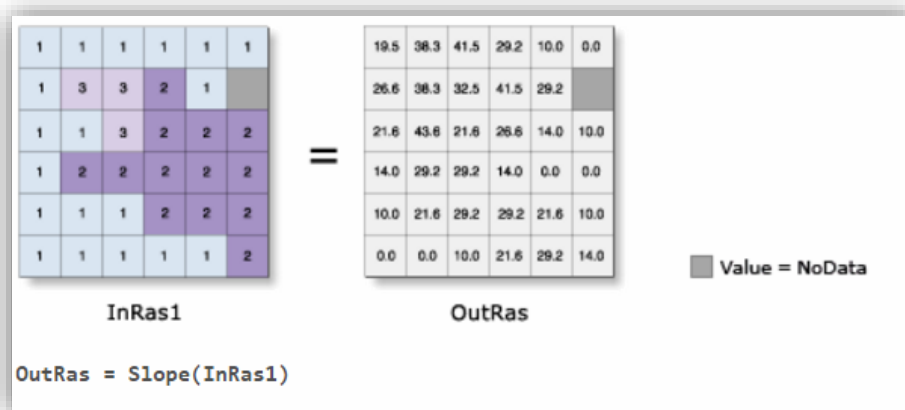
Εικόνα 5.23. Μορφή πίνακα excel όπως προκύπτει μετά το τρέξιμο του *ExportSoilDataToTABLE*,

✓ Τεχνικά χαρακτηριστικά του ExportSoilDataToTABLE

Το εργαλείο αυτό, όπως ήδη έχει αναφερθεί, αναπτύχθηκε σε γλώσσα *Python*. Με την εισαγωγή του πακέτου *arcpy*, έγινε δυνατή η χρήση εργαλείων της εργαλειοθήκης *ArcToolbox*, ως συναρτήσεις και αντικειμένων των επιμέρους εργαλειοθηκών της.

Σε γενικές γραμμές, το διάγραμμα ροής του εργαλείου θα μπορούσε να παρουσιαστεί ως μια αλληλουχία των διάφορων εργαλείων του *ArcToolbox* που χρησιμοποιήθηκαν, παραλείποντας κάποια μικρά κομμάτια του κώδικα που γράφτηκαν για την υλοποίησή του. Παρ' όλα αυτά, επιλέγεται το διάγραμμα ροής να παρουσιαστεί μόνο με τα εργαλεία για να δοθεί έμφαση σε αυτά. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στην λειτουργία κάθε εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά. Τα εργαλεία παρουσιάζονται με τη σειρά χρήσης τους.

- *Slope (Spatial Analyst)*: Υπολογίζει την κλίση (Σε μοίρες ή ποσοστιαία επί τοις εκατό %) κάθε κελιού μιας ψηφιδωτής (*raster*) επιφάνειας. Η κλίση κάθε εικονοστοιχείου (*pixel*) ενός ψηφιδωτού (*raster*) χάρτη υπολογίζεται από τις τιμές *Z* των οκτώ γειτονικών εικονοστοιχείων (*pixel*) με βάση την τεχνική της μέγιστης μέσης τιμής. (Οι επεκτάσεις του *ArcGIS*, Α. Ζήσου, 2010)

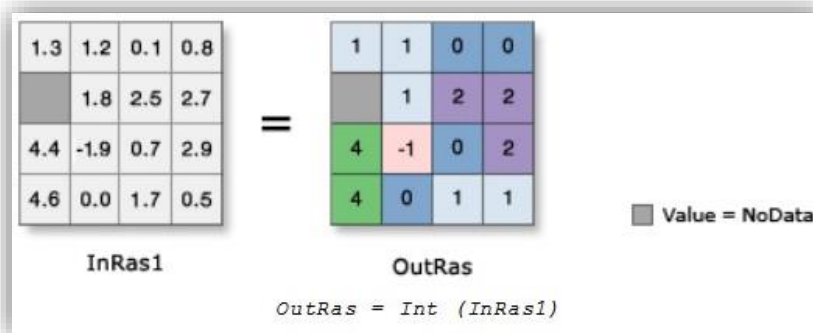


Εικόνα 5.24. Παράδειγμα υπολογισμού κλίσης από το εργαλείο *Slope (Spatial Analyst)*, (*Help, ArcGIS 10.2.2*)

- *Reclassify(Spatial Analyst)* : Επαναταξινομεί ή αλλάζει τις τιμές ενός ψηφιδωτού (*raster*) αρχείου. Το εργαλείο, βασιζόμενο στις στατιστικές πληροφορίες του αρχείου, ταξινομεί ή επαναταξινομεί σε κλάσεις την πληροφορία που περιέχεται σε αυτή και την εκχωρεί έπειτα σε κάθε κελί, ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο ταξινόμησης. Οι διαθέσιμες μέθοδοι στο περιβάλλον *ArcGIS* είναι πολλές. Στην ανάπτυξη όμως αυτού

το εργαλείου, η χρήση της επαναταξινομήσης έγινε λαμβάνοντας τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του ψηφιδωτού (raster) κλίσεων. Και έχοντας σταθερά πάντα τη δημιουργία 9 κλάσεων, υπολογιζόταν το βήμα κάθε κλάσης. (Παράρτημα)

- *Int (Spatial Analyst)*: Το εργαλείο αυτό μετατρέπει την τιμή κάθε κελιού ενός ψηφιδωτού (raster) αρχείου σε ακέραια με στρογγυλοποίηση. (*Help, ArcGIS 10.2.2*)



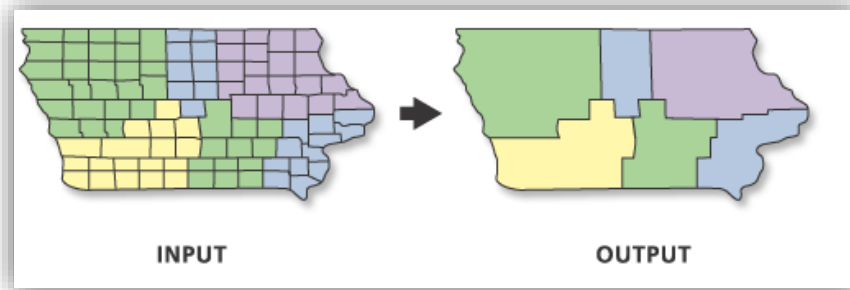
Εικόνα 5.25. Παράδειγμα χρήσης του εργαλείου *Int (Spatial Analyst)* , (*Help, ArcGIS 10.2.2*)

- *Raster to polygon (Conversion)*: Μετατρέπει τα ψηφιδωτά (raster) αρχεία σε πολυγωνικές οντότητες.
- *Intersect (Analysis)* : Υπολογίζει μια γεωμετρική τομή των εισαγόμενων οντοτήτων. Οι οντότητες ή τμήματα αυτών που επικαλύπτονται σε όλα τα επίπεδα και/ή στις ομάδες οντοτήτων εμφανίζονται ως η τελική ομάδα οντοτήτων. Οι τιμές των χαρακτηριστικών των εισαγόμενων οντοτήτων, αντιγράφονται στη νέα ομάδα οντοτήτων. Οι εισαγόμενες οντότητες πρέπει να είναι απλές : Σημεία, γραμμές, πολύγωνα. (*Help, ArcGIS 10.2.2*) Στη διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκε για την τομή των διάφορων επιπέδων πληροφοριών που εισάγονται.



Εικόνα 5.26. Παράδειγμα χρήσης του εργαλείου *Intersect(Analysis)*, (*Help,ArcGIS 10.2.2*)

- *Dissolve (Data Management)* : Το εργαλείο αυτό συγκεντρώνει γειτονικές οντότητες με βάση κοινή τιμή ενός χαρακτηριστικού τους, δίνοντας τη δυνατότητα δημιουργίας μεγαλύτερων οντοτήτων. Στη διπλωματική αυτή για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πολυγώνων πρηνών, από μικρότερα πολύγωνα με κοινές ιδιότητες.



Εικόνα 5.27. Παράδειγμα χρήσης του εργαλείου *Dissolve (Data Management)*, (*Help, ArcGIS 10.2.2*)

- *Add Field (Data Management)*: Το εργαλείο αυτό προσθέτει ένα πεδίο σε έναν πίνακα ή στον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών μιας ομάδας οντοτήτων ή ενός raster.
- *Calculate Field (Data Management)*: Το εργαλείο αυτό δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των τιμών ενός πεδίου. Οι υπολογισμοί κατά την ανάπτυξη του εργαλείου έγιναν μέσω τη *Python*.
- *Table to Table (Conversion)*: Το εργαλείο αυτό μετατρέπει έναν πίνακα σε αρχείο *Microsoft excel*. Στην ανάπτυξη του εργαλείου αποτελεί το τελικό στάδιο, όπου ο πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών των πολυγωνικών πρηνών εξάγεται σε *excel* αρχείο.

Στην Εικόνα 5.28 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των εργαλείων του χρησιμοποιήθηκαν. Η σχεδίαση του διαγράμματος έγινε στην εφαρμογή *ModelBuilder*.

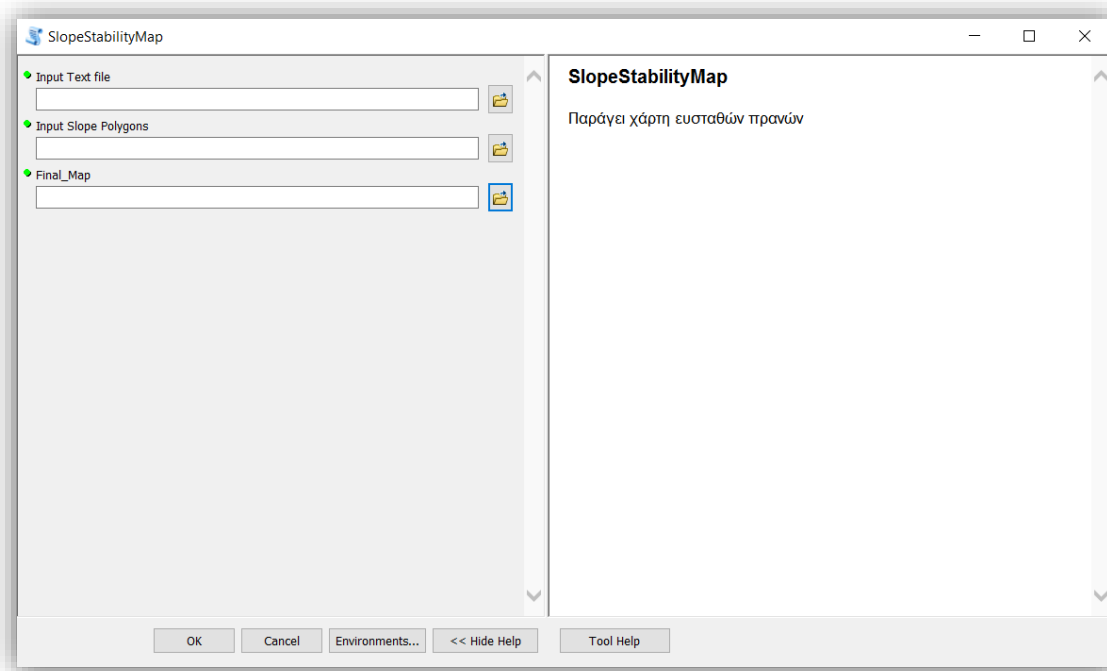
5.3.2. Δεύτερη φάση (*SlopeStabilityMap*)

Στη δεύτερη φάση των εργασιών, για την απόδοση του χάρτη ευστάθειας πρανών ενεργοποιείται το εργαλείο *SlopeStabilityMap*. Στο εργαλείο αυτό ο χρήστης πρέπει να εισάγει σε δύο υποχρεωτικά πεδία το *txt* αρχείο που περιέχει τον συντελεστή ασφαλείας κάθε πρανούς, όπως αυτό έχει υπολογιστεί από το εξωτερικό εργαλείο *FactorOfSafetyStatic.exe* ή το *FactorOfSafetySeismic.exe*, και τον χάρτη των πρανών σε πολυγωνική μορφή όπως είχε προκύψει από το εργαλείο *ExportSoilDataToTABLE*. (Πίνακας 5.5)

Πίνακας 5.5. Δεδομένα εισαγωγής για το *SlopeStabilityMap*,

Επίπεδο Πληροφορίας	Δεδομένα	Τύπος αρχείου
Ευστάθεια πρανών	Συντελεστής ασφαλείας	text
Πρανή	Πολύγωνα πρανών	Polygon

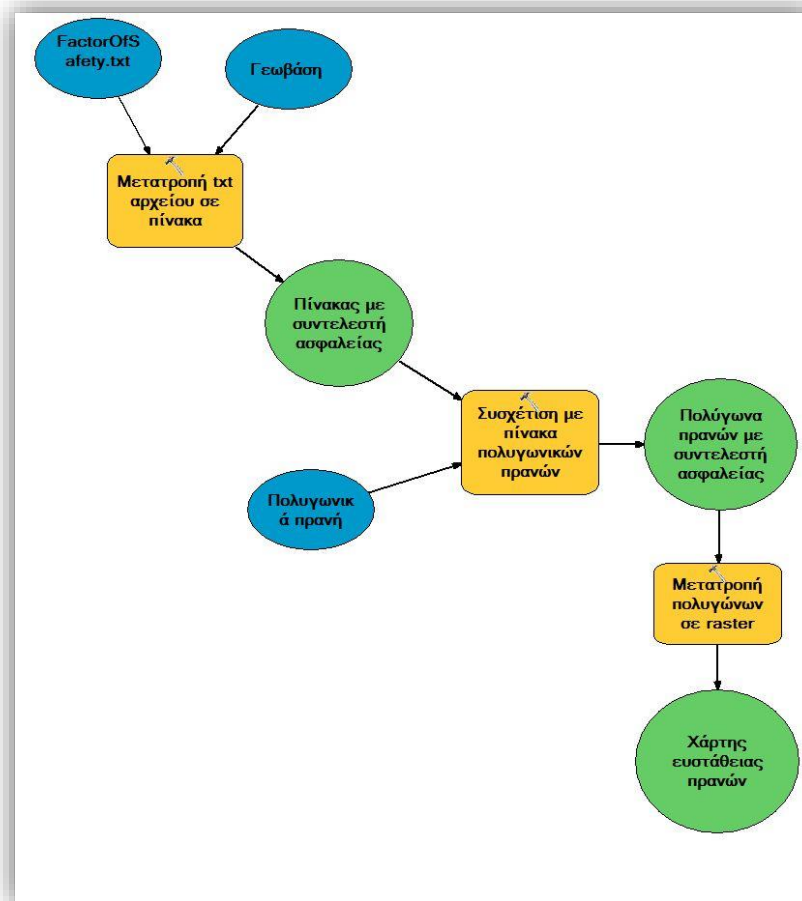
Στην Εικόνα 5.29 παρουσιάζεται το παράθυρο που ανοίγει με την ενεργοποίηση του (*SlopeStabilityMap*) όπου φαίνονται τα δύο πεδία που πρέπει να εισαχθούν τα δεδομένα. Αφού ο χρήστης εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα και πατήσει OK, το εργαλείο τρέχει. Μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζεται στο περιβάλλον του *ArcMAP* χάρτης ο οποίος παρουσιάζει την ευστάθεια των πρανών με χρωματική διαβάθμιση.



Εικόνα 5.29. Παράθυρο εργαλείου *SlopeStabilityMap*, (ArcGIS 10.2.2 , 2017)

✓ Διάγραμμα ροής του *SlopeStabilityMap*

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του *SlopeStabilityMap* είναι ίδια με του *ExportSoilDataTABLE* . Όμοια και με τον προηγούμενο εργαλείο, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν. (Εικόνα 5.30).



Εικόνα 5.30. Διάγραμμα ροής εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη του εργαλείου *SlopeStabilityMap*

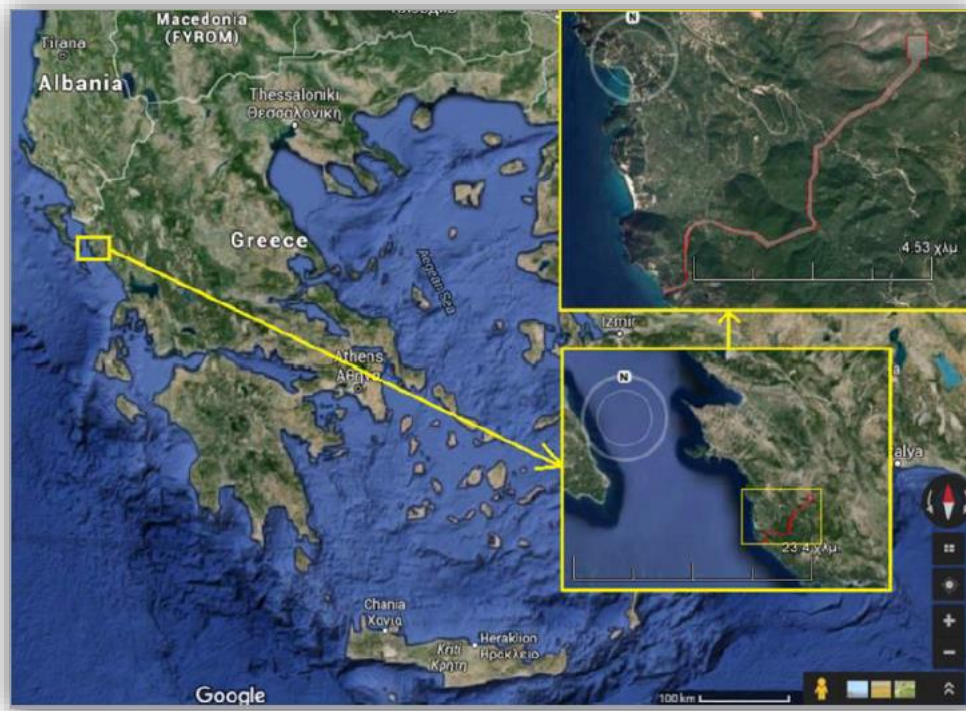
5.3.3. Εφαρμογή του εργαλείου στη περιοχή της Θεσπρωτίας

Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του εργαλείου, καθώς και της σημασίας της χρήσης του ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων κατά τη χάραξη αγωγών, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή στην περιοχή της Θεσπρωτίας.

Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής έγινε λόγω της διαθεσιμότητας των απαραίτητων δεδομένων για την τροφοδότηση του εργαλείου.

✓ Περιοχή μελέτης

Ο νομός ή η περιφερειακή ενότητα Θεσπρωτίας βρίσκεται στο βόρειο – δυτικό τμήμα της Ελλάδας και εντάσσεται στο Γεωγραφικό διαμέρισμα της Ηπείρου. Για τη θεώρηση χάραξης διαδρομής αγωγού ορίστηκε μια πολυγωνική περιοχή στο νότιο – δυτικό τμήμα του νομού, καθώς η περιοχή αυτή δίνει τη δυνατότητα μελέτης του προβλήματος της ευστάθειας των πρηνών σε έδαφος που παρουσιάζει μεγάλο εύρος κλίσεων από ήπιες έως πολύ απότομες.



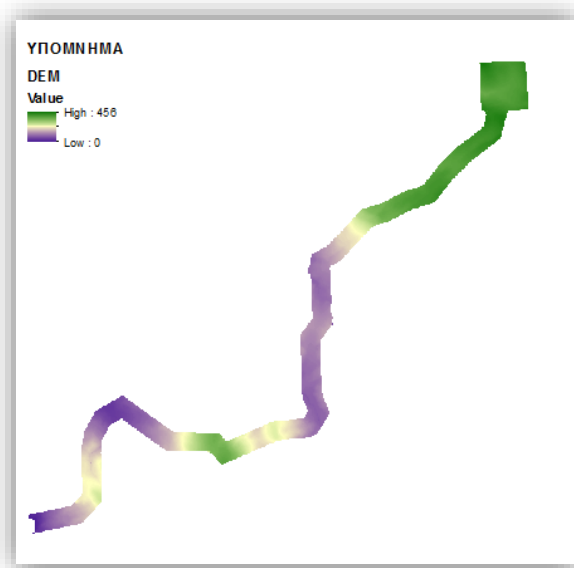
Εικόνα 5.31. Περιοχή εφαρμογής στη Θεσπρωτία, (Google Maps)

✓ Συλλογή και διαχείριση δεδομένων

Στο στάδιο αυτό, αφού πραγματοποιήθηκε ο καθορισμός της περιοχής μελέτης, έγινε συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την τροφοδότηση του εργαλείου *ExportSoilDataTABLE* (Υποενότητα 5.3.1).

Η μορφή των δεδομένων δεν ήταν η κατάλληλη για την εισαγωγή τους στο εργαλείο. Για αυτό το λόγο, χρειάστηκε να υποστούν επεξεργασία στο λογισμικό *Autocad* και στο περιβάλλον του *ArcMAP*. Πιο συγκεκριμένα η απαραίτητη υψομετρική πληροφορία υπήρχε σε μορφή ισοϋψών καμπύλων και υψομετρικών σημείων από διαθέσιμο τοπογραφικό της περιοχής. Για την μετατροπή του σε κανονικοποιημένη δομή (*raster*), εισήχθει σε *Autocad* λογισμικό, όπου

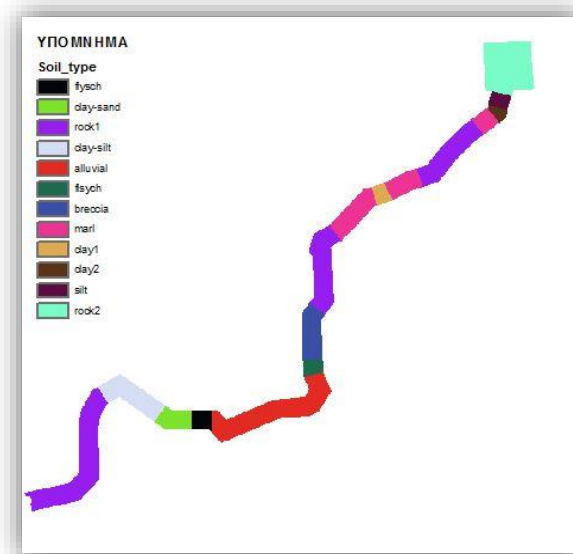
δημιουργήθηκε δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (*TIN*) *Triangular Irregular Network* και μετατράπηκε στη συνέχεια σε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους μορφής (*TIFF*). (Εικόνα 5.32)



Εικόνα 5.32. Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους περιοχής, (*ArcGIS 10.2.2*)

Η πληροφορία που αφορούσε τα εδάφη ήταν σε μορφή πινάκων με δοσμένες χιλιομετρικές θέσεις. Από τοπογραφικό της περιοχής δημιουργήθηκαν πολύγωνα εδαφικά ανάλογα με τη χιλιομετρική θέση τους και εισήχθησαν στο *ArcGIS* όπου μετατράπηκαν σε *Shapefile* αρχεία πολυγωνικά. (Εικόνα 5.33)

Για την υδρογεωλογία της περιοχής δεν υπήρχε καμία διαθέσιμη πληροφορία, για αυτό υποτέθηκε πως ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε πολύ μεγάλο βάθος και δεν επηρεάζει τα πρανή.



Εικόνα 5.33. Εδαφολογικά πολύγωνα της περιοχής, (ArcGIS 10.2.2)

Τέλος για την εξέταση της σεισμικής αστάθειας των πρανών, επιλέχθηκε ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης να είναι ίσος με 0,24 καθώς η περιοχή ανήκει στη 2^η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή δε ελήφθη υπόψη η αύξηση της επιτάχυνσης εδαφικών και τοπογραφικών συνθηκών, για λόγους χάρη απλότητας.

Ακολουθεί σχετικός πίνακας με σύντομη περιγραφή των διαθέσιμων δεδομένων για κάθε απαραίτητο επίπεδο πληροφορίας και η επεξεργασία που υπέστη.

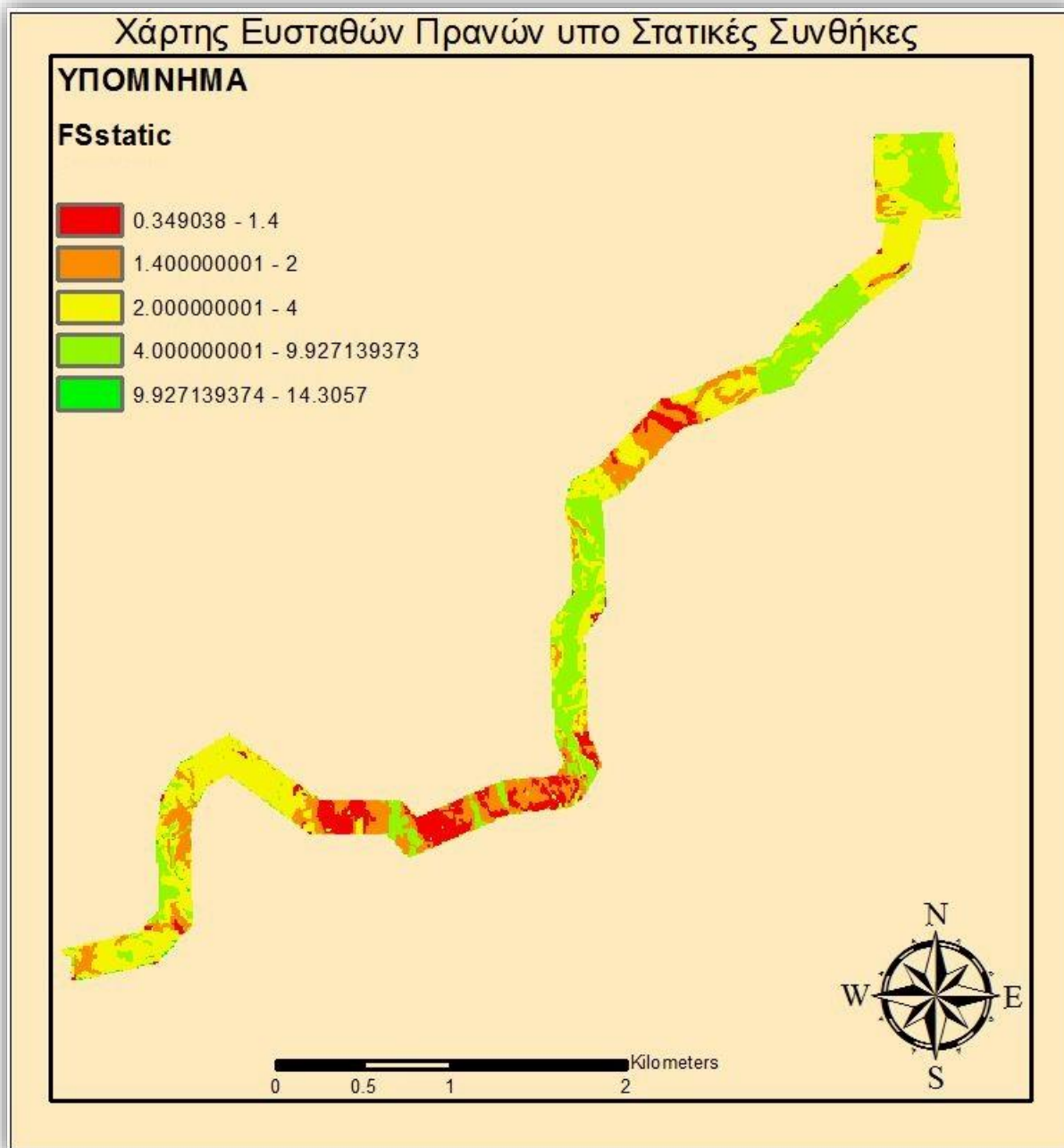
Πίνακας 5.6 Διαθέσιμα δεδομένα στην περιοχή της Θεσπρωτίας

Επίπεδο Πληροφορίας	Διαθέσιμα δεδομένα	Επεξεργασία	Τελική μορφή
Υψομετρία περιοχής	Τοπογραφικό της περιοχής	Δημιούργηθηκαν TIN στο Autocad και μετατράπηκαν σε TIFF	TIFF(raster)
Γεωλογία περιοχής	Πίνακας με εδάφη ανά χιλιομετρική θέση	Δημιούργηθηκαν πολύγωνα εδαφικά στο Autocad και μετατράπηκαν σε polygon μορφή στο ArcGIS	polygon
Υδρογεωλογία περιοχής	Δεν υπήρχε πληροφορία, θεωρήθηκε μηδενική στάθμη	-	polygon
Σεισμός	Η περιοχή ανήκει στη ζώνη 2 σεισμικότητας		0.24

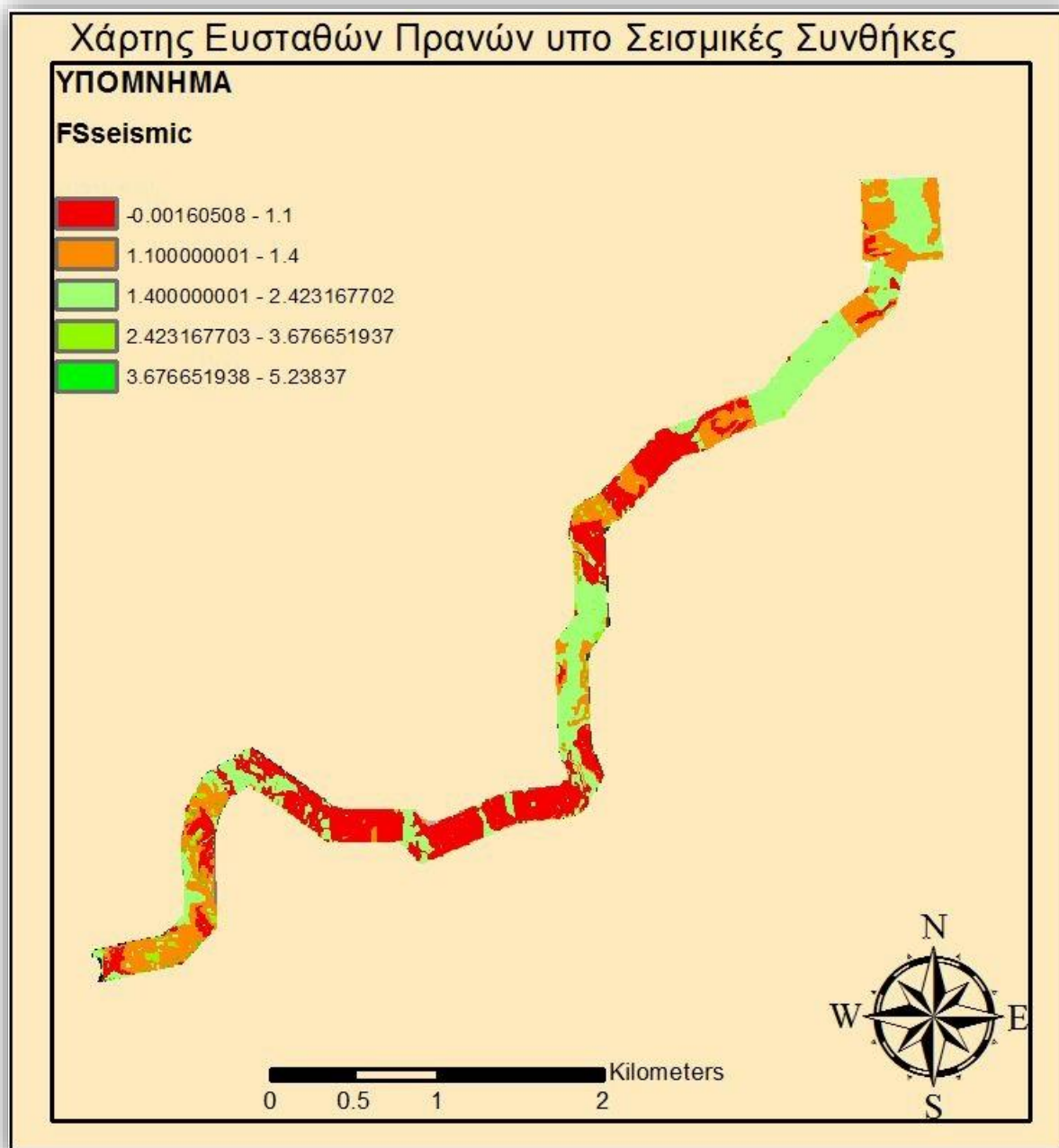
Αφού τα δεδομένα πλέον ήταν στη σωστή μορφή, εισήχθησαν στο εργαλείο *ExportSoilDataTable* και ο πίνακας που είχε ως αποτέλεσμα τροφοδότησε το λογισμικό *FactorOfSafety.exe* για την εξαγωγή στατικού συντελεστή ασφάλειας των πρανών τη πρώτη φορά, και του σεισμικού συντελεστή ασφάλειας τη δεύτερη φορά. Τα αποτελέσματα από τα λογισμικά και τις δύο φορές εισήχθησαν στο εργαλείο *SlopeStabilityMap* και παρουσιάστηκαν στο ArcGIS περιβάλλον σε μορφή χαρτών.

Στην Εικόνα 5.34 παρουσιάζεται ο χάρτης ευστάθειας πρανών υπό στατικές συνθήκες της περιοχής της Θεσπρωτίας και στην Εικόνα 5.35, ο χάρτης ευστάθειας πρανών υπό σεισμικές συνθήκες.

Με κόκκινο παρουσιάζονται οι ασταθείς περιοχές, επιρρεπείς σε κατολισθητικά φαινόμενα. Παρατηρείται πως αν ληφθεί υπόψη η πιθανή εκδήλωση σεισμού στην περιοχή, πρανή που υπό στατικές συνθήκες θεωρούνταν σταθερά, πλέον παρουσιάζουν αστάθεια και είναι πολύ πιθανό να κατολισθήσουν.



Εικόνα 5.34. Χάρτης Ευστάθειας Πρανών υπό Στατικές Συνθήκες στην περιοχή της Θεσπρωτίας, όπως υπολογίστηκε από το ημιαυτόματο εργαλείο



Εικόνα 5.35. . Χάρτης Ευστάθειας Πρανών υπό Σεισμικές Συνθήκες στην περιοχή της Θεσπρωτίας, όπως υπολογίστηκε από το ημιαυτόματο εργαλείο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής παρουσιάστηκε και μελετήθηκε το πρόβλημα των κατολισθήσεων εδαφικών πρανών (υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες), ως γεωκίνδυνος κατά την χάραξη και λειτουργία αγωγών μεγάλου μήκους.

Για τη συστηματική μελέτη των κατολισθήσεων αναπτύχθηκαν τα εξής:

A. Λογισμικό *slope.exe* που υπολογίζει την ευστάθεια των πρανών υπό στατικές και υπό σεισμικές συνθήκες με τη μέθοδο *Bishop*, σε γλώσσα προγραμματισμού *C++*.

B. Ημιαυτόματο εργαλείο με την ονομασία *SlopeStabilityAnalysis*, σε γλώσσα προγραμματισμού *Python*, στο περιβάλλον *ArcGIS 10.2.2* που παρουσιάζει χάρτες ευστάθειας πρανών αξιοποιώντας το προηγούμενο λογισμικό, καθώς συνδέεται ημιαυτόματα με το *slope.exe* για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε χάρτες.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε επιβεβαιώθηκε μέσω συγκεκριμένων εφαρμογών της διεθνούς βιβλιογραφίας, και η σύνδεση του εργαλείου και του λογισμικού ήταν επιτυχής, καθώς τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν και επιβεβαιώθηκαν μέσω συγκεκριμένης εφαρμογής από πραγματικό περιστατικό. Ο βασικός στόχος οπότε της εργασίας επετεύχθη, δημιουργήθηκε δηλαδή εργαλείο το οποίο βοηθάει στη λήψη αποφάσεων υποδεικνύοντας τα επικίνδυνα πρανή τόσο υπό στατικές όσο και υπό σεισμικές συνθήκες, σε περιοχές όπου μελετάται η κατασκευή αγωγών μεγάλου μήκους. Σημειώνεται ότι μερικοί έμπειροι γεωεπιστήμονες (γεωλόγοι και γεωτεχνικοί μηχανικοί) έχουν την ικανότητα να εκτιμήσουν ποιοτικά την ευστάθεια ενός εδαφικού πρανούς υπό στατικές συνθήκες, αλλά είναι σχεδόν αδύνατο να εκτιμήσουν το ρόλο του σεισμού στην μείωση του συντελεστή ασφαλείας και κατά επέκταση στην ευστάθεια του πρανούς. Με αυτό το δεδομένο το συγκεκριμένο εργαλείο έχει τεράστια αξία καθώς δίνει τη δυνατότητα ποσοτικής εκτίμησης της ευστάθειας και στις δύο περιπτώσεις και ιδιαίτερα στη δεύτερη, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν επαρκή και αξιόπιστα δεδομένα.

Η προαναφερθείσα εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Θεσπρωτίας, στην οποία υποτέθηκε ότι πρόκειται να πραγματοποιηθεί μελέτη για τη χάραξη αγωγού, αποδείχθηκε η αξία του ως εργαλείο λήψεων αποφάσεων, καθώς υπέδειξε όλα τα ασταθή πρηνή και τη σημασία του σεισμού σε έναν χώρο όπως η Ελλάδα.

Παρότι το εργαλείο λειτουργεί σωστά και είναι έτοιμο για χρήση σε μελλοντικές μελέτες χάραξης αγωγών, η έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων για τα πληροφοριακά επίπεδα που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του, είναι μεγάλη. Είναι προφανές ότι ακρίβεια στα δεδομένα εισαγωγής του εργαλείου σημαίνει και ακρίβεια στα αποτελέσματα του.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών απαιτούν τη χρήση ψηφιακών δεδομένων και στην Ελλάδα υπάρχει μεγάλη έλλειψη ψηφιακών χαρτών. Οι γεωλογικοί και υδρογεωλογικοί ψηφιακοί χάρτες είναι ελάχιστοι και δύσκολοι προσβάσιμοι τουλάχιστον προς το παρόν.

6.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η κατασκευή των αγωγών σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από γεωκινδύνους, κάνει αναγκαία την ανάπτυξη τέτοιων καινοτόμων εργαλείων, για τη βοήθεια και τη διευκόλυνση των μηχανικών κατά τη λήψη αποφάσεων.

Αν έμπειροι μηχανικοί εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες που παρέχουν τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στη διαχείριση πολυεπίπεδων πληροφοριών, τότε μπορούν να αναπτυχθούν τέτοια εργαλεία λήψης αποφάσεων για κάθε πιθανό γεωκίνδυνο.

Επειδή πολλές φορές οι επικίνδυνες περιοχές από άποψη γεωκινδύνων και εδαφικών ασταθειών δε μπορούν να αποφευχθούν, καθώς υπάρχουν πολλοί φορείς που εμπλέκονται στην απόφαση μιας τελικής χάραξης αγωγού, κρίνεται αναγκαία η παρακολούθηση τους κατά τη λειτουργία του αγωγού.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών μπορούν να δώσουν λύσεις και στο στάδιο της λειτουργίας του αγωγού. Η τροφοδότηση τους συνέχεια με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, από δορυφόρους ή από αεροσκάφη, καθιστά δυνατή τη δημιουργία εργαλείων παρακολούθησης των γεωκινδύνων.

Το *SlopeStabilityAnalysis* έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η τροποποίηση του για περιοδική τροφοδότηση δεδομένων, και κατά συνέπεια την περιοδική παρουσίαση χαρτών ασταθών πρηνών.

Αν λοιπόν στο στάδιο της λειτουργίας του αγωγού, δρομολογηθούν συνεχείς εναέριες ή δορυφορικές παρακολουθήσεις κατά μήκος του, και τα δεδομένα αυτά τροφοδοτούσαν το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών στο οποίο είναι ενσωματωμένο το *SlopeStabilityAnalysis*, τότε θα μπορούσαν μηχανικοί που το παρακολουθούν να επέμβουν αμέσως στη περίπτωση που κάποιος χάρτης εντοπίσει πιθανή αστοχία.

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι η αστάθεια ενός πρηνούς δεν συνεπάγεται αυτόματα και θραύση του αγωγού καθώς οι αγωγοί είναι κατασκευές οι οποίες μπορούν να αντέξουν σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις. Κατά συνέπεια το εργαλείο αυτό θα μπορούσε να επεκταθεί και άλλο λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση εδάφους και κατασκευής, ώστε να κρίνεται η κρισιμότητα μιας περιοχής, όχι με βάση τις μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις, αλλά με βάση τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό.

ΕΝΤΥΠΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Nyman, D. , et al. (2008), *“Mitigating Geohazards for International Pipeline Projects : Challenges and Lessons Learned”*, Proceedings of 7th International Pipeline Conference 2008, September 29 – October 3 2008, Calgary, Alberta, Canada
2. Chong Xu , Xiwei Xu, J. Bruce H. Shyub (2015), *“Database and spatial distribution of landslides triggered by the Lushan, China Mw 6.6 earthquake of 20 April 2013”*
3. Psarropoulos, P. , et al. (2012), *“Designing Pipelines in Areas with Moderate or High Seismic Risk: Geohazard Assessment beyond EC8 Provisions”*, Proceedings of 7th Pipeline Technology Conference, 28 – 30 April 2012, Hannover Congress Centrum, Hannover, Germany
4. Τσουγκράνης, Σ., Καπής, Μ., Ψαρρόπουλος, Π. Ν. (2015), *“Ανάπτυξη εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων για την αποφυγή γεωκινδύνων κατά την χάραξη αγωγών μεγάλου μήκους”*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Barnes, G. (2005), *Εδαφομηχανική : Αρχές και Εφαρμογές*, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος
6. Burrough, P. (1986), *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment*, Oxford: Oxford University Press
7. Forouzan, B. και Mosharraf, F. (2010), *Εισαγωγή στην Επιστήμη των υπολογιστών*, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος

8. Kramer, S. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Upper Saddle River: Prentice Hall
9. Moness, R. (2008), *Pipeline Geo – Environmental Design and Geohazard Management*, New York: ASME
10. Budhu, M. (2011), *Soil Mechanics and Foundations*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
11. Ortigao, J., et al. (2004), *Handbook of Slope Stabilization*, New York: Springer – Verlag Berlin Heidelberg GmbH
12. Pimpler, E., (2013), *Programming ArcGIS 10.1 with Python Cookbook*, Birmingham: Packt Publishing Ltd
13. Αργιαλάς, Δ. (1998), *Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση*, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
14. Κάβουρας, Μ. (2007), *Αρχές Γεωπληροφορικής και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών*, Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
15. Σακελλαρίου, Μ. (2008), *Γεωτεχνική Μηχανική*, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
16. Ζήσου, Α. (2010), *Οι επεκτάσεις του ArcGIS*, Σταμούλης Α.Ε
17. Κουτσόπουλος, Κ και Ανδρουλακάκης, Ν, (2005), *Εφαρμογές λογισμικού ArcGIS 9x με απλά λόγια*, Παπασωτηρίου
18. Jamsa, Κ (1995), *Εισαγωγή στη C++*, Κλειδάριθμος
19. Deitel, P and Deitel, P, (2010), *C++ Προγραμματισμός*, Εκδόσεις Γκιούρδας

20. <http://www.geography.hunter.cuny.edu>
21. <http://help.arcgis.com>
22. <http://wiki.iploca.com>
23. <http://resources.arcgis.com>
24. <http://www.marathondata.gr>
25. <http://www.seos-project.eu>
26. <http://www.pipeline-journal.net>
27. <http://wiki.gis.com>
28. <https://el.wikipedia.org>
29. <http://www.preventionweb.net>
30. <http://www.bgs.ac.uk>
31. <http://www.idahogeology.org>
32. <https://www.geocaching.com>
33. <https://www.ottawagatineaugeoheritage.ca>
34. <http://scholarsmine.mst.edu>
35. <https://python.swaroopch.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται αρχικά ο κώδικας του λογισμικού `slope.exe` σε γλώσσα C++ και στη συνέχεια ο κώδικας ανάπτυξης του εργαλείου `SlopeStabilityAnalysis.py` σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

```

// slope.cpp
// Programmer:Ioanna Michal
// Πρόγραμμα για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας
// των πρανών. Η επίλυση γίνεται με τη μέθοδο του Bishop(1955) για κυκλική
// ολίσθηση (ESA)
#include <iostream>
#include <cmath>
using namespace std;
// *****
//***** ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ *****
//*****
// *****
//αριθμός π
const double pi = atan(1.)*4;
//συναρτήσεις υπολογισμού συντεταγμένων σημείων
//XYcaseA
double XcaseA(double xn, double yn, double yb, double R){
    double x = xn-sqrt(R*R-(yb-yn)*(yb-yn));
    return (x);
}
double YcaseA(double yb){
    double y=yb;
    return (y);
}
//XYcaseB
double XcaseB(double xn, double yn, double yc, double R){
    double x = xn+sqrt(R*R-(yc-yn)*(yc-yn));
    return(x);
}
double YcaseB(double yc){
    double y=yc;
    return(y);
}
//XYcaseC
double XcaseC(double xn, double yn, double xc, double yc, double R, double a){
    double A=1+a*a;
    double B=-2*xn-2*a*a*xc+2*yc*a-2*yn*a;
    double C=xn*xn+yc*yc+a*a*xc*xc-2*yc*a*xc+yn*yn-2*yn*yc+2*yn*a*xc-R*R;
    double D=(B*B-4*A*C);
    double x=(-B+sqrt(D))/(2*A);
    return (x);
}
double YcaseC(double x, double xc, double yc, double a){
    double y = yc+a*(x-xc);
    return(y);
}
//XYcaseD
double XcaseD(double xn, double yn, double xb, double yb, double R, double a){
    double A=1+a*a;
    double B=-2*xn-2*a*a*xb+2*yb*a-2*yn*a;
    double C=xn*xn+yb*yb+a*a*xb*xb-2*yb*a*xb+yn*yn-2*yn*yb+2*yn*a*xb-R*R;
    double D=(B*B-4*A*C);
    double x=(-B-sqrt(D))/(2*A);
    return (x);
}
double YcaseD(double x, double xb, double yb, double a){
    double y = yb+a*(x-xb);
    return(y);
}

```

```

//XYcaseE
double XcaseE(double xn, double yn, double xb, double yb, double R, double a){
    double A=1+a*a;
    double B=-2*xn-2*a*a*xb+2*yb*a-2*yn*a;
    double x=(-B)/(2*A);
    return (x);
}
double YcaseE(double x, double xb, double yb, double a){
    double y=yb+a*(x-xb);
    return(y);
}
// συνάρτηση για μετατροπή γωνίας από μοίρες σε rad
double degrees2rad(double w){
    w = (w*pi)/180;
    return (w);
}
//συνάρτηση για μετατροπή γωνίας από rad σε μοίρες
double rad2degrees(double w){
    w = (w*180)/pi;

    return (w);

}
// *****
//*****
//***** ΚΛΑΣΗ *****
//*****
// *****
class strip{
private:
    //ιδιωτικά μέλη
    double x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4;
    double f; // f= φ γωνία τριθής
    double g; //ειδικό βάρος εδάφους
    double c; // συνοχή
    double b; //πλάτος λωρίδας B[j]
    double Fs_repeat;//το FS μέσα στο mj
    double xn,yn;
    double R;
    double z; //ύψος λωρίδας
    double l; //κάτω μήκος λωρίδας
    double thita;//θ
    double W; // βάρος
    double yw1,yw2;//y water
    int M; //μεταβλητή για έλεγχο τριγώνου
    double zw;//ύψος νερού σε κάθε λωρίδα
    double ru;//πίεση πόρων
    double ah;//συντελεστές σεισμικής ευστάθειας
    double dj;//κάθετη απόσταση από κέντρο θάρους με κέντρο κύκλο
    //ιδιωτικές μέθοδοι
    void calc_z();
    void calc_l();
    void calc_xy();
    void calc_thita();
    void calc_W();//όσον αφορά το βάρος επέλεξα να το υπολογίζω με το ειδικό βάρος
    που θα δίνεται //γ*b*z
    void calc_dj();
    void calc_zw();//το ύψος του νερού χρησιμοποιείται μόνο στην ru
    void calc_ru();

```

```

public:
    //μέθοδος υπολογισμού του FS part
    double calc_FSup();
    double calc_FSdown();
    double calc_FSupwater();
    double calc_FSdownwater();
    //constructor1 για περίπτωση πίεσης πόρων
    strip(double xleft, double yleft, double xright, double yright, double B,
double G, double C,
    double ftriv, double FS, double r, double X, double Y, int m, double ywleft,
double ywright, double Ah);
    //constructor2 για περίπτωση απλή
    strip(double xleft, double yleft, double xright, double yright, double B,
double G, double C, double ftriv, double FS, double r, double X, double Y, int m,
double Ah);
}; //τέλος κλάσης
//ανάπτυξη μεθόδων εκτός κλάσης
void strip::calc_z(){//ΥΨΟΣ ΛΩΡΙΔΑΣ z
    double xmup= (x2+x1)/2; //δε χρειάζεται τελεία εδώ καθώς διαιρώ δεκαδικό με
ακέραιο
    double xmdown=(x3+x4)/2;
    double ymdown=(y3+y4)/2;
    double ymup =(y2+y1)/2; // αν ήταν ακέραιος με ακέραιο θα είχα πρόβλημα μόνο
z=ymup-ymdown;
}
void strip::calc_l(){//ΜΗΚΟΣ L
    l=(sqrt((x3-x4)*(x3-x4)+(y3-y4)*(y3-y4)));
}
void strip::calc_thita(){//ΓΩΝΙΑ θ
    if (x2<=xn){//ορίζω πως οι λωρίδες αριστερά από το κέντρο του κύκλου θα έχουν
αρνητική θ
        thita=-(acos(b/l));
    }
    else{
        thita=(acos(b/l));
    }
}
}
}
void strip::calc_w(){//ΒΑΡΟΣ w
    W=g*b*z;
}
}
void strip::calc_xy(){//ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΛΩΡΙΔΑΣ
    if(M==2){//για τις τετράγωνες λωρίδες
        x3=x2;
        y3=(yn-sqrt(R*R-(x3-xn)*(x3-xn)));
        x4=x1;
        y4=(yn-sqrt(R*R-(x4-xn)*(x4-xn)));
    }
    else if(M==1){//για την πρώτη τριγωνη λωρίδα
        x3=x2;
        y3=(yn-sqrt(R*R-(x3-xn)*(x3-xn)));
        x4=x1;
        y4=y1;
    }
    else if (M==3){//για την τελευταία τριγωνη λωρίδα
        x3=x2;
        y3=y2;
        x4=x1;
        y4=(yn-sqrt(R*R-(x4-xn)*(x4-xn)));
    }
}
}

```



```

}
void strip::calc_zw(){//ΥΨΟΣ ΝΕΡΟΥ
    double ymup=(yw1+yw2)/2;
    double ymdown=(y3+y4)/2;
    //zw = ymup-ymdown
    if((ymup-ymdown)<=0){//με αυτόν τον τρόπο καλύπτω και την περίπτωση που δε περνά
    νερό από αυτή τη λωρίδα
        zw=0;
    }
    else{
        zw=ymup-ymdown;
    }
}
void strip::calc_ru(){//ΠΙΕΣΗ ΠΟΡΩΝ
    double gw=9.81;
    ru=(gw*zw*b)/W;
}
void strip::calc_dj(){// ΑΠΟΣΤΑΣΗ dj
    double ycw; //y για του κέντρου θάρους
    if (M==2){//τετράγωνη λωρίδα
        ycw=(y1+y2+y3+y4)/4;
    }
    else if (M==1){
        ycw=(y1+y2+y3)/3;
    }
    else if (M==3){
        ycw=(y1+y2+y4)/3;
    }
    dj=yn-ycw;
}
double strip::calc_FSupwater(){//ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΠΟΡΩΝ
    double mj= 1/(cos(thita)+(tan(f)*sin(thita))/(Fs_repeat));
    double FSup=(c*b+W*(1-ru)*tan(f))*mj;
    return(FSup);
}
double strip::calc_FSdownwater(){
    double FSdown = W*sin(thita)+ah*W*dj/R;
    return(FSdown);
}
double strip::calc_FSup(){
    double mj= 1/(cos(thita)+(tan(f)*sin(thita))/(Fs_repeat));
    double FSup=(c*b+W*tan(f))*mj;//χωρίς πίεση πόρων
    return(FSup);
}
double strip::calc_FSdown(){
    double FSdown = W*sin(thita)+ah*W*dj/R;
    return(FSdown);
}
//Δομητής με νερό
strip::strip(double xleft, double yleft, double xright, double yright, double B,
double G, double C, double ftriv, double FS, double r, double X, double Y,int m,double
ywleft,double ywright,double Ah){
    x1=xleft;
    y1=yleft;
    x2=xright;
    y2=yright;
    M=m;
    b=B;
    ah=Ah;
    c=C;
}

```

```

f=ftriv;
Fs_repeat=FS;
R=r;
xn=X;
yn=Y;
yw1=ywleft;
yw2=ywright;
g=G;
calc_xy();
calc_z();
calc_l();
calc_thita();
calc_W();
calc_zw();
calc_ru();
calc_dj();
}
//Δομητής χωρίς νερό
strip::strip(double xleft, double yleft, double xright, double yright, double B,
double G, double C, double ftriv, double FS, double r, double X, double Y,int m,double
Ah){
x1=xleft;
y1=yleft;
x2=xright;
y2=yright;
M=m;
b=B;
g=G;
c=C;
f=ftriv;
Fs_repeat=FS;
R=r;
xn=X;
yn=Y;
ah=Ah;
calc_xy();
calc_z();
calc_l();
calc_thita();
calc_W();
calc_dj();
}
int main(){
//γεωμετρικό κομμάτι του προγράμματος
double V,Vertical;//V=vertical vertical meaning heigh
double H,Horizontal; //H=horizontal
// H V
//Horizontal Vertical
cout<<"SLOPE.EXE ";
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<" CALCULATE SLOPE STABILITY ";
cout<<endl;
cout<<" ***** ";
cout<<endl;
cout<<" Simplified Bishop (1955) ";
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<" ***** ";

```

```

cout<<endl;
cout<<" ***** ";
cout<<endl;
cout<<" ***** ";
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<" ^^ GEOMETRY OF THE SLOPE ^^ ";
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<"insert Horizontal:Vertical : ";
cin>>H>>V;
cout<<"insert Heigh of the slope (m) : ";
cin>>Vertical;
cout<<endl;
Horizontal=(H*Vertical)/V;
double xb=100;//έδωσα συντεταγμένες σταθερές για τα xb,yb του πρανούς μου
double yb=100; //συντεταγμένες σημείου βάσης
double xc,yc; //συντεταγμένες σημείου κορυφής
xc=xb+Horizontal;
yc=yb+Vertical;
cout<<endl;
double a =V/H; // συντελεστής διεύθυνσης ευθείας
double x0,y0;//οι αρχικές συντεταγμένες του κανάβου των σημείων κέντρων κύκλου
double dx;//το βήμα του κανάβου των συντεταγμένων σε x και y
double gon=atan(a);// γωνία κλίσης πρανούς
x0 = xb;//θεώρησα την αρχή των x του κανάβου αριστερά του xb κατά -(xc-xb)/2
y0 = yc+1.5*(yc-yb);//θεώρησα την αρχή των y του κανάβου πάνω από το yc κατά +(xc-xb)
dx = (xc-xb)/14;//θεώρησα το βήμα ως αναλογία 1/14 του (xc-xb) (autocad και ώστε να
//υπάρχει διαφορά από σημείο σε σημείο)
//τετραγωνικός κανάβος σημείων οπότε dy=dx
int xcouter = 0;// xcouter ο μετρητής των σημείων στο μήκος του κανάβου,
// τον θέτω ίσο με 1 γιατί υπάρχει ήδη το σημείο x0 που έχει υπολογιστεί
//προηγουμένως
double xmax,ymin; // δηλώνω τελευταία xmax,ymih για να κάνω τον υπολογισμό μου των
//σημείων
//το όριο το βάζω όσο xc + (xc-xb)/2 για το τελευταίο ζευγάρι
//συντεταγμένων στο μήκος του κανάβου
xmax = x0;
while (xmax<=xc){
    xmax= xmax+dx;
    xcouter = xcouter +1;
}
int ycounter = 0; // ycounter ο μετρητής των σημείων στον πλάτος του κανάβου
ymin = y0;
while (ymin>=1.0005*yc){//για αρχή θα βάλω το yc και μετά βλέπω
ymin = ymin -dx;
ycounter =ycounter +1;// στο y αφαιρώ καθώς κατεβαίνω στον κανάβο
}
// αφού γνωρίζω πλέον πόσα σημεία έχει στο μήκος και στο πλάτος τα πολλαπλασιάζω
int n = xcouter*ycounter; //όπου n ο αριθμός των σημείων του τετραγωνικού μου
//κανάβου
//άρα οι διαστάσεις του πίνακα θα είναι 2*n όπου 2 για τις συντεταγμένες x και y
//και n ο αριθμός των σημείων
double XY[2][n]; //δήλωσα οπότε τον πίνακα στον οποίο θα αποθηκευτούν τα σημεία του
//κανάβου με τις συντεταγμένες τους
//γέμισμα πίνακα σημείων κανάβου
int i,j,z,k,v,u;
k=0;//
i=1;
u=0;

```

```

for(z=0;z<ycounter;z++){//επανάληψη μοτίβου όσο και το ycounter
    v=0;
    for(j=k;j<i*xcounter;j++){//από 0 έχω xcounter και πολλαπλάσια του
        XY[0][j]=x0+v*dx;
        XY[1][j]=y0-u*dx;
        v=v+1;
    }
    u=u+1;
    k=k+xcounter;
    i=i+1;
} //υπολογιστικό κομμάτι του προγράμματος
double xE,yE;//τα x,y της δεύτερης τομής της R με το έδαφος
double xS,yS;//τα x,y της πρώτης τομής της R με το έδαφος
int nstrips=20;//αριθμός λωρίδων 20 για χάρην απλότητας

double R;// η ακτίνα
double dR=(1./20)*(xc-xb); //βήμα ακτίνας
// όριο για βάθος υπολογισμού επιφανειών ολίσθησης
double B[nstrips];//πίνακας αποθήκευσης των πλατών των λωρίδων
double g;//ειδικά βάρη εδάφους
double f;//γωνία τριβής, δίνεται σε μοίρες
double c;//συνοχή
double ah;// οι σεισμικοί συντελεστές
double wl;//μεταβλητή για την αποθήκευση του βάθους του νερού μέσα στο πρανές από
την κορυφή
double XtopYtop[2][nstrips+1];//θέλω να είναι ένα παραπάνω από τον αριθμό των
λωρίδων
double FS;// αυτό που υπολογίζεται σε κάθε R
double FS0;//αυτό που μπαίνει μέσα στον τύπο υπολογισμού
//****
double FSmin=1000000000;//η μεταβλητή που θα αποθηκευτεί ο ελάχιστος FS ,
αρχικοποιήθηκε :P
//****
double FSup, FSdown;// FSup το σύνολο του αριθμητή και FSdown του παρανομαστή
double dif;//θα το χρησιμοποιήσω για τον υπολογισμό του FS
double Oi,Oj,Rslide;// θα αποθηκεύονται το κέντρο του κύκλου ολίσθησης για την
προβολή στον χρήστη
int casestudy;
int showcase;
//ζητάω από τον χρήστη φ, c
//**** να ρωτάω αν θα εξετάζεται με σεισμό ή όχι
cout<<" ^^ GEOLOGY OF THE SLOPE ^^";
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<"insert friction angle of soil (degrees) : ";
cin>>f;
cout<<"insert cohesion of soil (KN/m^2) : ";
cin>>c;
cout<<"insert unit weigh of soil (KN/m^3) : ";
cin>>g;
cout<<endl;
cout<<" ^^ WATER CONDITIONS ^^ ";
cout<<endl;
cout<<"insert water level under the crest (m) : ";
cin>>wl;
cout<<endl;
cout<<" ^^ SEISMIC CHARACTERISTICS ^^";
cout<<endl;
cout<<"insert horizontal seismic coiffecient : ";
cin>>ah;

```

```

//οι υπολογισμοί της δύναμης θα γίνονται μέσα στην τάξη καθώς μέσα
//στην τάξη υπολογίζεται το βάρος
//καλώ τη συνάρτηση για μετατροπή σε rad
f=degrees2rad(f);
// water calculation
//WATER CALC
    double xw1,yw1,xw2,yw2;
double aw;
//για τις w2 πάντα
if(w1!=0){
    xw2=xc;
yw2=yc-w1;//
    //για τις w1 ανάλογα με το ύψος του νερού μέσα στο πρανές
if (yw2>=yb){
    xw1=xb;
    yw1=yb;
}
else if(yw2<yb){
    xw1=xb;
    yw1=yw2;
}
aw=(yw2-yw1)/(xw2-xw1);
}
double XYw[2][nstrips+1]; // 2*21
//***** αρχή υπολογισμού του FS
//για κάθε xh,yh θα υπολογίζονται τα εξής :
for(j=0;j<n;j++){//το j θα το χρησιμοποιήσω μόνο εδώ
    //xh-xb yh -yb
    double length1=sqrt((XY[0][j]-xb)*(XY[0][j]-xb)+(XY[1][j]-yb)*(XY[1][j]-
yb)); //απόσταση xh,yh από xb,yb
    double length2=sqrt((XY[0][j]-xc)*(XY[0][j]-xc)+(XY[1][j]-yc)*(XY[1][j]-
yc)); //απόσταση xh,yh από xc,yc
    double Ref=(abs(a*XY[0][j]-XY[1][j]+yb-a*xb))/(sqrt(a*a+1)); //εφαπτομενική R για το
συγκεκριμένο xh,yh
    double xef=XcaseE(XY[0][j],XY[1][j],xb,yb,Ref,a);
    double yef=YcaseE(xef,xb,yb,a);
    if(xef<xc){
        R=Ref;
    }
    else if(xef>=xc){
        R=length2;
    }
    do{
        FS0=1; // το έβαλα εδώ με την σκεπτική κάθε φορά που θα κάνει αύξηση του R και θα
ξεκινάει τη
        // διαδικασία από την αρχή να παίρνει το FS0 την τιμή 1
        R=R+dR;
        //διερεύνηση της σωστής case
        //με σύγκριση της ακτίνας με τα length1,length2
        // CASE 1 !!!!!!!!!!!
        if ((R<=length1)&&(R<=length2)){
            casestudy =1;
            //υπολογισμός των σημείων των Start και End Point
            xS=XcaseD(XY[0][j],XY[1][j],xb,yb,R,a);
            yS=YcaseD(xS,xb,yb,a);
            xE=XcaseC(XY[0][j],XY[1][j],xc,yc,R,a);
            yE=YcaseC(xE,xc,yc,a);
            //υπολογισμός των bj
            for (i=0;i<nstrips;i++){
                B[i]=(xE-xS)/nstrips;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    //υπολογισμός των Xtop,Ytop
    XtopYtop[0][0]=xS;
    XtopYtop[1][0]=yS;
    XtopYtop[0][nstrips]=xE;
    XtopYtop[1][nstrips]=yE;
    for(k=1;k<nstrips;k++){
        XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
        XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1]+a*(XtopYtop[0][k]-XtopYtop[0][k-1]);//το α
        το χρειάζομαι σε rad εδώ μέσα
    }
    //WATER CALC
    //υπολογισμός των XYw[0][i] and XYw[1][i]
    //αν υπάρχει νερό μόνο
    if(wl!=0){
        if(yw2<=yb){// βάθος κάτω από βάση
            for(i=0;i<=nstrips;i++){
                XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                XYw[1][i]=yw2;
            }
        }
        else { //
            for(i=0;i<=nstrips;i++){
                if(XtopYtop[0][i]<=xb){
                    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                    XYw[1][i]=yw1;
                }
                else if ((XtopYtop[0][i]>xb)&&(XtopYtop[0][i]<xc)){
                    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                    XYw[1][i]=yw1+aw*(XYw[0][i]-xw1);// προσοχή το υπολόγισα διαφορετικά
                    από τα XtopYtop[1][i]
                }
                else if (XtopYtop[0][i]>=xc){
                    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                    XYw[1][i]=yw2;
                }
            }
        }
    }
    //FS finally με νερό
    do{//do while για να έχω σύγκλιση του FS
        strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
        g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,XYw[1][0],XYw[1][1],ah);//πρώτη τριγωνική
        strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
        B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,XYw[1][19],XYw[1][20],ah);
        FSup=S0.calc_FSupwater()+S19.calc_FSupwater();
        FSdown=S0.calc_FSdownwater()+S19.calc_FSdownwater();
        for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
            strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],
            XtopYtop[1][i+1],B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,XYw[1][i],XYw[1][i+1],ah);
            FSup=FSup+S.calc_FSupwater();
            FSdown=FSdown+S.calc_FSdownwater();
        }
        FS=FSup/FSdown;
        dif=abs(FS0-FS);
        FS0=FS;
    }while(dif>=0.001)
} //NOOO WATER
else if (wl==0){
    //FS finally χωρίς νερό
    do{//do while για να έχω σύγκλιση του FS

```



```

        }while((SB+BE)<nstrips);//τέλος while! έβαλα while γιατί με την if δεν έλεγχε
την περίπτωση που είχαμε 20}
XtopYtop[0][0]=xS;
XtopYtop[1][0]=yS;
XtopYtop[0][SB]=xb;
XtopYtop[1][SB]=yb;
XtopYtop[0][nstrips]=xE;
XtopYtop[1][nstrips]=yE;
    for(i=0;i<SB;i++){
        B[i]=(xb-xS)/SB;
    }
    if (SB>1){
        for(k=1;k<SB;k++){
            XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
            XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1];        }}
//base to End
    for(i=SB;i<nstrips;i++){
        B[i]=(xE-xb)/BE;
    }
    for(k=(SB+1);k<nstrips;k++){
        XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
        XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1]+a*(XtopYtop[0][k]-XtopYtop[0][k-1]);
    }

    // WATER CALC
//υπολογισμός των XYw[0][i] and XYw[1][i]
    if(w1!=0){
        if(yw2<=yb){// βάθος κάτω από βάση
            for(i=0;i<=nstrips;i++){
                XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                XYw[1][i]=yw2;
            }
        }
        else { // κανονική διήθηση
            for(i=0;i<=nstrips;i++){
                if(XtopYtop[0][i]<=xb){
                    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                    XYw[1][i]=yw1;
                }
                else if ((XtopYtop[0][i]>xb)&&(XtopYtop[0][i]<xc)){
                    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                    XYw[1][i]=yw1+aw*(XYw[0][i]-xw1);// προσοχή το υπολόγισα διαφορετικά
από τα XtopYtop[1][i]
                }
                else if (XtopYtop[0][i]>=xc){
                    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
                    XYw[1][i]=yw2;        }    }
            //FS water finally
            do{//do while για να έχω σύγκλιση του FS
                strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,XYw[1][0],XYw[1][1],ah);//πρώτη τριγωνική
                strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,XYw[1][19],XYw[1][20],ah);
                FSup=S0.calc_FSupwater() + S19.calc_FSupwater();
                FSDown=S0.calc_FSDownwater()+S19.calc_FSDownwater();

                for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
                    strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],
XtopYtop[1][i+1],B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,XYw[1][i],XYw[1][i+1],ah);

                    FSup=FSup+S.calc_FSupwater();
                    FSDown=FSDown+S.calc_FSDownwater();        }

```



```

        FS=FSup/FSdown;
        dif=abs(FS0-FS);
        FS0=FS;
    }while(dif>=0.001);
}
//NOOOO WATER
else if (wl==0){
//FS finally
do{//do while για σύγκλιση του FS
    strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,ah);
    strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,ah);
    FSup=S0.calc_FSup() + S19.calc_FSup();
    FSdown=S0.calc_FSdown()+S19.calc_FSdown());

    for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
        strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],XtopYtop[1][i+1],
B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,ah);
        FSup=FSup+S.calc_FSup();
        FSdown=FSdown+S.calc_FSdown();
        FS=FSup/FSdown;
        dif=abs(FS0-FS);
        FS0=FS;
    }while(dif>=0.001);//το σωστό είναι while(dif>=0.001)
} }//τέλος if case2
// CASE 3 !!!!!!!!!!!!!
else if ((R<=length1)&&(R>length2)){
    casestudy=3;
    //υπολογισμός των σημείων των Start and End Point
    xS=XcaseD(XY[0][j],XY[1][j],xb,yb,R,a);
    yS=YcaseD(xS,xb,yb,a);
    xE=XcaseB(XY[0][j],XY[1][j],yc,R);
    yE=YcaseB(yc);
    //////////υπολογισμός των λωρίδων σε κάθε κομμάτι
    double bstable = (xE-xS)/nstrips; //σταθερό θήμα
    double sc = (xc-xS)/bstable;//xc-xS
    int SC = (xc-xS)/bstable;
    double ce= (xE-xc)/bstable;//xE-xc
    int CE= (xE-xc)/bstable;
    if(CE<1){
        CE=1;
    }
    ////////// σε περίπτωση που δε βγαίνουν οι λωρίδες nstrips αλλά 19

    if((SC+CE)>nstrips) {
    do{
        if((sc-SC)<0.5){//πρώτα ελέγχει για xc-xS
            SC=SC-1;
        }
        else if ((ce-CE)<0.5){//δεύτερον ελέγχει για xE-xc
            CE=CE-1;
        }
        else{//και σε περίπτωση που είναι μικρότερες από 2θ οι λωρίδες αλλά δεν είναι
κάποιο από τα παραπάνω
            //μεγαλύτερο του 0,5 θα βάζει μία επιπλέον λωρίδα στο xE-xc
            CE=CE-1;
        }
    }while((SC+CE)>nstrips);//τέλος while!
}
else if((SC+CE)<nstrips) {
do{
    if((sc-SC)>=0.5){//πρώτα ελέγχει για xc-xS

```

```

    SC=SC+1;
}
else if ((ce-CE)>=0.5){//δεύτερον ελέγχει για xE-xc
    CE=CE+1;
}
else{//και σε περίπτωση που είναι μικρότερες από 2θ οι λωρίδες αλλά δεν είναι
κάποιο από τα παραπάνω //μεγαλύτερο του 0,5 θα βάζει μία επιπλέον λωρίδα στο
xE-xc
    CE=CE+1;
}
}while((SC+CE)<nstrips);//τέλος while!
}

//υπολογισμός των bj και των Xtop,Ytop
XtopYtop[0][0]=xS;
XtopYtop[1][0]=yS;
XtopYtop[0][SC]=xc;
XtopYtop[1][SC]=yc;
XtopYtop[0][nstrips]=xE;
XtopYtop[1][nstrips]=yE;
//Start to crest
for(i=0;i<SC;i++){
    B[i]=(xc-xS)/SC;}
for(k=1;k<SC;k++){
    XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
    XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1]+a*(XtopYtop[0][k]-XtopYtop[0][k-1]);//το α
το χρειάζομαι σε rad εδώ μέσα
} //crest to End
for(i=SC;i<nstrips;i++){
    B[i]=(xE-xc)/CE;
}
if (CE>1){
    for(k=(SC+1);k<nstrips;k++){
        XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
        XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1];
    }
}
// WATER CALC
//υπολογισμός των XYw[0][i] and XYw[1][i]
//διερεύνηση για την περίπτωση που το ύψος του νερού είναι κάτω από το τη βάση
του πρνούς
if(w1!=0){
if(yw2<=yb){// βάθος κάτω από βάση
    for(i=0;i<=nstrips;i++){
        XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
        XYw[1][i]=yw2;
    }
}
else { // κανονική διήθηση
    for(i=0;i<=nstrips;i++){
        if(XtopYtop[0][i]<=xb){
            XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
            XYw[1][i]=yw1;
        }
        else if ((XtopYtop[0][i]>xb)&&(XtopYtop[0][i]<xc)){
            XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
            XYw[1][i]=yw1+aw*(XYw[0][i]-xw1);// προσοχή το υπολόγισα διαφορετικά
από τα XtopYtop[1][i]
        }
        else if (XtopYtop[0][i]>=xc){
            XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
            XYw[1][i]=yw2;
        }
    }
}
}

```

```

    } } //FS water finally
    do{//do while για να έχω σύγκλιση του FS
        strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,XYw[1][0],XYw[1][1],ah);//πρώτη τριγωνική
        strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,XYw[1][19],XYw[1][20],ah);
        FSup=S0.calc_FSupwater() + S19.calc_FSupwater();
        FSdown=S0.calc_FSdownwater()+S19.calc_FSdownwater();

        for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
            strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],
XtopYtop[1][i+1],B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,XYw[1][i],XYw[1][i+1],ah);

            FSup=FSup+S.calc_FSupwater();
            FSdown=FSdown+S.calc_FSdownwater();
        }
        FS=FSup/FSdown;
        dif=abs(FS0-FS);
        FS0=FS;
    }while(dif>=0.001);
}
//NOOOO WATER
else if (wl==0)
//FS finally
do{
    strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,ah);
    strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,ah);
    FSup=S0.calc_FSup() + S19.calc_FSup();
    FSdown=S0.calc_FSdown()+S19.calc_FSdown();
    for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
        strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],
XtopYtop[1][i+1],B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,ah);
        FSup=FSup+S.calc_FSup();
        FSdown=FSdown+S.calc_FSdown();
    }
    FS=FSup/FSdown;
    dif=abs(FS0-FS);
    FS0=FS;
}while(dif>=0.001);
}
}
//τέλος if case3
// CASE 4 !!!!!!!!!!!
else if ((R>length1)&&(R>length2)){
    casestudy=4;
//υπολογισμός των σημείων των Start and End Point
    xS=XcaseA(XY[0][j],XY[1][j],yb,R);
    yS=YcaseA(yb);
    xE=XcaseB(XY[0][j],XY[1][j],yc,R);
    yE=YcaseB(yc);
//////////υπολογισμός των λωρίδων σε κάθε κομμάτι
    double bstable = (xE-xS)/nstrips; //σταθερό μέγεθος λωρίδας
    double bc = (xc-xb)/bstable;//xb-xc
    int BC = (xc-xb)/bstable;
    double ce= (xE-xc)/bstable;//xc-xE, τα έχω δηλώσει σε προηγούμενες περιπτώσεις
    int CE= (xE-xc)/bstable;
    if (CE<1){
        CE=1;
    }
}

```

```

double sb= (xb-xS)/bstable;//xS-xb
int SB= (xb-xS)/bstable;
if (SB<1){
    SB=1;
}
////////// σε περίπτωση που δε θγαίνουν οι λωρίδες nstrips αλλά λιγότερες ή
περισσότερες
if((BC+CE+SB)>nstrips){
do{
    if((bc-BC)<0.5){//πρώτα ελέγχει για xc-xb
        BC=BC-1;
    }
    else if ((ce-CE)<0.5){//δεύτερον ελέγχει για xE-xc
        CE=CE-1;
    }
    else if((sb-SB)<0.5){//τρίτον ελέγχει για xb-xS
        SB=SB-1;
    }
    else{//και σε περίπτωση που είναι μικρότερες από 2θ οι λωρίδες αλλά δεν είναι
κάποιο από τα παραπάνω
        //μεγαλύτερο του θ,5 θα βάζει μία επιπλέον λωρίδα στο xE-xc
        CE=CE-1;
    }
}while((BC+CE+SB)>nstrips);
}
else if((BC+CE+SB)<nstrips){
do{
    if((bc-BC)>=0.5){//πρώτα ελέγχει για xc-xb
        BC=BC+1;
    }
    else if ((ce-CE)>=0.5){//δεύτερον ελέγχει για xE-xc
        CE=CE+1;
    }
    else if((sb-SB)>=0.5){//τρίτον ελέγχει για xb-xS
        SB=SB+1;
    }
    else{//και σε περίπτωση που είναι μικρότερες από 2θ οι λωρίδες αλλά δεν είναι
κάποιο από τα παραπάνω
        //μεγαλύτερο του θ,5 θα βάζει μία επιπλέον λωρίδα στο xE-xc
        CE=CE+1;
    }
}while((BC+CE+SB)<nstrips);//τέλος if!
}

//υπολογισμός των bj και των Xtop,Ytop
XtopYtop[0][0]=xS;
XtopYtop[1][0]=yS;
XtopYtop[0][SB]=xb;
XtopYtop[1][SB]=yb;
XtopYtop[0][SB+BC]=xc;
XtopYtop[1][SB+BC]=yc;
XtopYtop[0][nstrips]=xE;
XtopYtop[1][nstrips]=yE;
//Start to base
for(i=0;i<SB;i++){
    B[i]=(xb-xS)/SB;
}
for(k=1;k<SB;k++){
    XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
    XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1];
}

```

```

//base to crest
for(i=SB;i<(SB+BC);i++){
    B[i]=(xc-xb)/BC;
}
for(k=(SB+1);k<(SB+BC);k++){
    XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
    XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1]+a*(XtopYtop[0][k]-XtopYtop[0][k-1]);
}
//crest to End
for(i=(SB+BC);i<nstrips;i++){
    B[i]=(xE-xc)/CE;
}
for(k=(SB+BC+1);k<nstrips;k++){

    XtopYtop[0][k]=XtopYtop[0][k-1]+B[k-1];
    XtopYtop[1][k]=XtopYtop[1][k-1];
}
//WATER CALC
//υπολογισμός των XYw[0][i] and XYw[1][i]
//διερεύνηση για την περίπτωση που το ύψος του νερού είναι κάτω από το τη βάση
του πρανούς
if(wl!=0){
if(yw2<=yb){// βάθος κάτω από βάση
for(i=0;i<=nstrips;i++){
    XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
    XYw[1][i]=yw2;
}
}
else { // κανονική διήθηση
for(i=0;i<=nstrips;i++){
    if(XtopYtop[0][i]<=xb){
        XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
        XYw[1][i]=yw1;
    }
    else if ((XtopYtop[0][i]>xb)&&(XtopYtop[0][i]<xc)){
        XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
        XYw[1][i]=yw1+aw*(XYw[0][i]-xw1);// προσοχή το υπολόγισα διαφορετικά
από τα XtopYtop[1][i]
    }
    else if (XtopYtop[0][i]>=xc){
        XYw[0][i]=XtopYtop[0][i];
        XYw[1][i]=yw2;
    }
}
}
}
//FS finally
do{//do while για να έχω σύγκλιση του FS
    strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,XYw[1][0],XYw[1][1],ah);//πρώτη τριγωνική
    strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,XYw[1][19],XYw[1][20],ah);
    FSup=S0.calc_FSupwater()+S19.calc_FSupwater();
    FSdown=S0.calc_FDownwater()+S19.calc_FDownwater();

    for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
        strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],
XtopYtop[1][i+1],B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,XYw[1][i],XYw[1][i+1],ah);

        FSup=FSup+S.calc_FSupwater();
        FSdown=FSdown+S.calc_FDownwater();
    }
}

```

```

        }
        FS=FSup/FSdown;
        dif=abs(FS0-FS);
        FS0=FS;
    }while(dif>=0.001);
}
// NOOOOO WATER
else if (wl==0){
//FS finally
do{
    strip S0(XtopYtop[0][0],XtopYtop[1][0],XtopYtop[0][1],XtopYtop[1][1],B[0],
g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],1,ah);
    strip S19(XtopYtop[0][19],XtopYtop[1][19],XtopYtop[0][20],XtopYtop[1][20],
B[19],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],3,ah);
    FSup=S0.calc_FSup() + S19.calc_FSup();
    FSdown=S0.calc_FSdown()+S19.calc_FSdown();
    for(i=1;i<(nstrips-1);i++){
        strip S(XtopYtop[0][i],XtopYtop[1][i],XtopYtop[0][i+1],XtopYtop[1][i+1],
B[i],g,c,f,FS0,R,XY[0][j],XY[1][j],2,ah);
        FSup=FSup+S.calc_FSup();
        FSdown=FSdown+S.calc_FSdown();
    }

    FS=FSup/FSdown;
    dif=abs(FS0-FS);
    FS0=FS;
    }while(dif>=0.001);
} }//τέλος if case4
if(FS<FSmin) {
    FSmin=FS;
    Oi=XY[0][j];
    Oj=XY[1][j];
    Rslide=R;
    showcase=casestudy;
}
}while(R<=1.5*length1);// κλείνει η do while που εξετάζει τις R
//κλείνει η for που εξετάζει τα xh,yn
cout<<"      *****      ";
cout<<endl;
cout<<" ***** RESULTS ***** ";
cout<<endl;
cout<<"      *****      ";
cout<<endl;
cout<<endl;
cout<<" ^^ GEOMETRY OF FAILURE SURFACE ^^";
cout<<endl;
cout<<" Point of Base      (xb,yb) : ("<<xb<<"),("<<yb<<)"<<endl;
cout<<endl;
cout<<" Point of Crest      (xc,yc) : ("<<xc<<"),("<<yc<<)"<<endl;
cout<<endl;
cout<<" Point of Rotation (Oi,Oj) : ("<<Oi<<"),("<<Oj<<)"<<endl;
cout<<endl;
cout<<" Radius of Circle      : "<<Rslide<<endl;
cout<<endl;
if (ah==0){
cout<<"Factor of Safety Static      : "<<FSmin<<endl;
cout<<endl;
}
else
cout<<"Factor of Safety Dynamic      : "<<FSmin<<endl;
cout<<endl;

```

```
return (0);  
}
```

```

#SoilStabilityAnalysis.pyt
#Programmer: Ioanna Michal
#Last Date Modified:4-2-2017
#Description:

import arcpy
from arcpy.sa import *

arcpy.CheckOutExtension("spatial")

class Toolbox(object):
    def __init__(self):
        """Define the toolbox (the name of the toolbox is the name of the
        .pyt file)."""
        self.label = "Soil Stability Analysis"
        self.alias = "Soil Stability Analysis"

        # List of tool classes associated with this toolbox
        self.tools = [ExportSoilDataToTABLE,SlopeStabilityMap]

class ExportSoilDataToTABLE(object):
    def __init__(self):
        """Define the tool (tool name is the name of the class)."""
        self.label = "ExportSoilDataTABLE"
        self.description = "Εξάγει τα χαρακτηριστικά των πρανών σε πίνακα"
        self.canRunInBackground = True

    def getParameterInfo(self):
        """Define parameter definitions"""

        #1st parameter: Raster File with Elevation Information
        in_Raster=arcpy.Parameter(
            displayName="Input Raster",
            name="in_Raster",
            datatype="Raster Layer",
            parameterType="Required",
            direction="Input")
        #2nd parameter: Shapefile with soil polygons
        in_Soil_Polygons=arcpy.Parameter(
            displayName="Input Soil Polygons",
            name="in_Soil_Polygons",
            datatype="Feature Layer",
            parameterType="Required",
            direction="Input")
        #3d parameter: Shapefile with water polygons
        inWaterPolygons=arcpy.Parameter(
            displayName="Input Water Polygons",

```


SOILST~1

```
name="inWaterPolygons",
datatype="Feature Layer",
parameterType="Required",
direction="Input")
```

#4th parameter: Float number for seismic coefficient

```
ah=arcpy.Parameter(
    displayName="ah",
    name="ah",
    datatype="GPDouble",
    parameterType="Optional",
    direction="Input")
```

#5th parameter: Σεισμικός συντελεστής

```
OUTPUT=arcpy.Parameter(
    displayName="OUTPUT",
    name="OUTPUT",
    datatype="Feature Layer",
    parameterType="Required",
    direction="Output")
```

```
params = [in_Raster, in_Soil_Polygons, inWaterPolygons, ah, OUTPUT]
return params
```

```
def isLicensed(self):
    """Set whether tool is licensed to execute."""
    return True
```

```
def updateParameters(self, parameters):
    """Modify the values and properties of parameters before internal
    validation is performed. This method is called whenever a parameter
    has been changed."""
```

```
return
```

```
def updateMessages(self, parameters):
    """Modify the messages created by internal validation for each tool
    parameter. This method is called after internal validation."""
    return
```

```
#
# -----CODE-----
#
```

```
def execute(self, parameters, messages):
    """The source code of the tool."""
```

#Μεταβλητές στις οποίες αποθηκεύονται τα δεδομένα τα οποία εισάγονται από τον χρήστη

```

SOILST~1
in_Raster = parameters[0].valueAsText

in_Soil_Polygons = parameters[1].valueAsText

inWaterPolygons = parameters[2].valueAsText

ah=parameters[3].value

OUTPUT=parameters[4].valueAsText
#####

#####

#Μεταβλητές

Slope_Raster = "Slope_Ras" #Μεταβλητή αποθήκευσης του
Raster κλίσεων
Slope_Integer = "Slope_Int" #Μεταβλητή αποθήκευσης του
Raster ακέραιων κλίσεων
Slope_Polygons = "Slope_Pol_1" #Μεταβλητή αποθήκευσης των
Polygon κλίσεων
Reclassified_Raster = "Slope_Rec_Ras" #Μεταβλητή αποθήκευσης του
Raster επαναταξινομημένων κλίσεων
Reclassified_Polygons = "RecSlopePol" #Μεταβλητή αποθήκευσης των
Polygon επαναταξινομημένων κλίσεων
IntersectedPolygons = "IntersectedPolygons"#Μεταβλητή αποθήκευσης των
Polygon τομής επιπέδων
#DissolvedPolygons="DissolvedPolygons"

GeoBasePath="C:\\Users\\ioann\\Dropbox\\ArcGIS\\Thesprotia\\Thesprotia.mdb"
#Προσωπική Γεωβάση
TableforOutput="SOIL_DATA"
ExcelTable="C:\\Users\\ioann\\Desktop\\APPLICATION\\SoilData.xls"
#####

#Εργαλείο για υπολογισμό κλίσεων (Slope)
Slope_Raster=Slope(in_Raster, "DEGREE", "1")

#Παίρνω την ελάχιστη και μέγιστη αξία του raster των κλίσεων ( Get)

MinSlopeResult=arcpy.GetRasterProperties_management(Slope_Raster,"MINIMUM")

MaxSlopeResult=arcpy.GetRasterProperties_management(Slope_Raster,"MAXIMUM")

MinSlope=float(MinSlopeResult.getOutput(0))
MaxSlope=float(MaxSlopeResult.getOutput(0))

```

SOILST~1

```
x=(MaxSlope-MinSlope)/9
```

```
#Επαναταξινόμηση κλίσεων (Reclassify)
Reclassified_Raster=Reclassify(Slope_Raster,
"Value",RemapRange([[MinSlope,x,1],[x,2*x,2],[2*x,3*x,3],[3*x,4*x,4],[4*x,5*x,5],
[5*x,6*x,6],[6*x,MaxSlope,7]]))
```

```
#Raster Επαναταξινομημένων κλίσεων σε πολύγωνα (Raster to polygon)
arcpy.RasterToPolygon_conversion(Reclassified_Raster,Reclassified_Polygons,
"SIMPLIFY", "Value")
```

```
#Μετονομασία πεδίου τάξης ( alter field)
arcpy.AlterField_management(Reclassified_Polygons, "gridcode", "class",
"class")
```

```
#Δεκαδικά σε ακέραια το raster των κλίσεων (float to integer)
Slope_Integer=Int(Slope_Raster)
```

```
#Raster δεκαδικών κλίσεων σε πολύγωνα (raster to polygon)
arcpy.RasterToPolygon_conversion(Slope_Integer, Slope_Polygons,
"SIMPLIFY", "Value")
```

```
#Μετονομασία πεδίου κλίσης (alter field)
arcpy.AlterField_management(Slope_Polygons, "gridcode", "slope", "slope")
```

```
#Λίστα με πολύγωνα : δεκαδικών κλίσεων, επαναταξινομημένων κλίσεων,
εδαφολογικά, υδρολογία
```

```
ListforIntersect=[Slope_Polygons,Reclassified_Polygons,in_Soil_Polygons,inWaterPolyg
ons]
```

```
#Τομή πολυγώνων δεκαδικών κλίσεων, επαναταξινομημένων κλίσεων,
εδαφολογίας, υδρολογίας
arcpy.Intersect_analysis(ListforIntersect, IntersectedPolygons, "ALL",
"", "INPUT")
```

```
#Συγκέντρωση πολυγώνων σε ευρύτερα πολύγωνα πρηνών με κριτήριο την τάξη
και το εδαφος
```

```
arcpy.Dissolve_management(IntersectedPolygons, OUTPUT,
"class;water_leve;Soil_type;γ;c;φ", "slope MEAN", "SINGLE_PART",
"DISSOLVE_LINES")
```

```
arcpy.AddField_management(OUTPUT, "kh", "DOUBLE", "5", "", "", "kh",
"NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")
```

```
#Εισαγωγή τιμής σεισμικού συντελεστ
```

```
arcpy.CalculateField_management(OUTPUT, "kh", ah, "PYTHON_9.3", "")
```

```
arcpy.TableToTable_conversion(OUTPUT, GeoBasePath, TableforOutput, ""
, "" "water_leve \"water_leve\" true
```

```
true false 4 Float 0 0 ,First,#,OUTPUT,water_leve,-1,-1;
```

```
γ \"γ\" true true false 8 Double 0 0
```

```

SOILST~1
,First,#,OUTPUT,γ,-1,-1;
c \"c\" true true false 8 Double 0 0
,First,#,OUTPUT,c,-1,-1;
φ \"φ\" true true false 8 Double 0 0
,First,#,OUTPUT,φ,-1,-1;
MEAN_slope \"MEAN_slope\" true true
false 8 Double 0 0 ,First,#,OUTPUT,MEAN_slope,-1,-1;
Shape_Length \"Shape_Length\" false
true true 8 Double 0 0 ,First,#,OUTPUT,Shape_Length,-1,-1;
kh \"kh\" true true false 8 Double 0
0 ,First,#,OUTPUT,kh,-1,-1\"\", \"\")
#Εξαγωγή Πίνακα με Σεισμικό συντελεστή
arcpy.TableToExcel_conversion(TableforOutput, ExcelTable, \"NAME\", \"CODE\")

#else:
# arcpy.TableToTable_conversion(OUTPUT, GeoBasePath, TableforOutput,
\"\"
# , \"\"water_leve \"water_leve\" true
true false 4 Float 0 0 ,First,#,OUTPUT,water_leve,-1,-1;
# γ \"γ\" true true false 8 Double 0 0
,First,#,OUTPUT,γ,-1,-1;
# c \"c\" true true false 8 Double 0 0
,First,#,OUTPUT,c,-1,-1;
# φ \"φ\" true true false 8 Double 0 0
,First,#,OUTPUT,φ,-1,-1;
# MEAN_slope \"MEAN_slope\" true true
false 8 Double 0 0 ,First,#,OUTPUT,MEAN_slope,-1,-1;
# Shape_Length \"Shape_Length\" false
true true 8 Double 0 0 ,First,#,OUTPUT,Shape_Length,-1,-1\"\", \"\")
#arcpy.TableToExcel_conversion(TableforOutput, ExcelTable, \"NAME\",
\"CODE\")

return

```

```

class SlopeStabilityMap(object):
    def __init__(self):
        \"\"\"Define the tool (tool name is the name of the class).\"\"\"
        self.label = \"SlopeStabilityMap\"
        self.description = \"Παράγει χάρτη ευσταθών πρανών\"
        self.canRunInBackground = True

    def getParameterInfo(self):
        \"\"\"Define parameter definitions\"\"\"

        #1st parameter: TXT αρχείο με FS πρανών
        in_txt=arcpy.Parameter(

```

```

SOILST~1
    displayName="Input Text file",
    name="Input Text file",
    datatype="DETextfile",
    parameterType="Required",
    direction="Input")

#2nd parameter: Shapefile με πολύγωνα πρανών
in_Slope_Polygons=arcpy.Parameter(
    displayName="Input Slope Polygons",
    name="in_Slope_Polygons",
    datatype="Feature Layer",
    parameterType="Required",
    direction="Input")

#3rd parameter :Raster file, final map
Final_Map=arcpy.Parameter(
    displayName="Final_Map",
    name="Final_Map",
    datatype="Raster Layer",
    parameterType="Required",
    direction="Output")

params = [in_txt, in_Slope_Polygons, Final_Map]
return params

def isLicensed(self):
    """Set whether tool is licensed to execute."""
    return True

def updateParameters(self, parameters):
    """Modify the values and properties of parameters before internal
    validation is performed. This method is called whenever a parameter
    has been changed."""

    return

def updateMessages(self, parameters):
    """Modify the messages created by internal validation for each tool
    parameter. This method is called after internal validation."""
    return

#
# -----CODE-----
#

def execute(self, parameters, messages):
    """The source code of the tool."""

    in_txt=parameters[0].value
    αρχείο με FS                                     #Παράμετρος εισόδου : txt

```

SOILST~1

```
in_Slope_Polygons=parameters[1].valueAsText #Παράμετρος εισόδου :  
πολύγωνα πρानών από προηγούμενη άσκηση  
Final_Map=parameters[2].valueAsText
```

```
GeoBase = "C:\\Users\\ioann\\Dropbox\\ArcGIS\\Thesprotia\\Thesprotia.mdb"  
#Μεταβλητή αποθήκευσης της γεωβάσης, το TableToTable απαιτεί γεωβάση  
TableFS = "FS"  
#Μεταβλητή αποθήκευσης του πίνακα FS  
#Πολύγωνα_πρानών_με_συντελεστή_ασφαλείας = "Slope Dissolved"  
#Χάρτης_ευστάθειας_πρानών =  
"C:\\Users\\ioann\\Dropbox\\ArcGIS\\Thesprotia\\ThesprotiaResults.gdb\\fs"  
  
# Μετατροπή txt αρχείου σε πίνακα  
arcpy.TableToTable_conversion(in_txt, GeoBase, TableFS, "", ""FS \\FS\  
true true false 8 Double 0 0 ,First,#,  
C:\\Users\\ioann\\Desktop\\APPLICATION\\FactorOfSafety.txt,Field1,-1,-1""", "")
```

```
# Συσχέτιση με πίνακα πολυγωνικών πρानών  
arcpy.JoinField_management(in_Slope_Polygons, "OBJECTID", TableFS,  
"OBJECTID", "FS")
```

```
# Process: Μετατροπή πολυγώνων σε raster  
arcpy.PolygonToRaster_conversion(in_Slope_Polygons, "FS", Final_Map,  
"CELL_CENTER", "NONE", "19")
```

```
return
```