



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΕΞΑΚΟΥΣΤΙΔΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ
ΠΟΥ ΔΙΕΡΧΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΔΥΝΗΤΙΚΑ ΑΣΤΑΘΗ ΕΔΑΦΙΚΑ ΠΡΑΝΗ**



Επιβλέπων : Καττής Μαρίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ψαρρόπουλος Πρόδρομος, Ε.Δι.Π., Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019



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

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΞΗΣ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ
ΠΟΥ ΔΙΕΡΧΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΔΥΝΗΤΙΚΑ ΑΣΤΑΘΗ ΕΔΑΦΙΚΑ ΠΡΑΝΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της
ΕΞΑΚΟΥΣΤΙΔΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑΣ

Επιβλέπων : Καπτής Μαρίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ψαρρόπουλος Πρόδρομος, Ε.Δι.Π., Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Καπτής Μαρίνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ψαρρόπουλος Πρόδρομος
Μέλος Ε.Δι.Π., Ε.Μ.Π.

Τσομπανάκης Ιωάννης
Αν. Καθηγητής, Πολ. Κρήτης

Αθήνα, Μάρτιος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της παρούσας εργασίας, κ. Μαρίνο Καττή και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, για την πολύτιμη καθοδήγηση τους καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλουν να αποδοθούν στον κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, για την πάντα άμεσα διαθέσιμη βοήθεια του, τις συμβουλές του και την ενθάρρυνση, κατά τη συνεργασία μας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Νίκο Μακράκη και Στέφανο Τσουγκράνη για τη την παράθεση των γνώσεων και των απόψεων τους.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για τη διαρκή στήριξη της, τόσο κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, όσο και κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χερσαίοι αγωγοί μεγάλου μήκους αποτελούν μια από τις πιο πολυσυζητημένες κατηγορίες κατασκευών των τελευταίων χρόνων. Μέσω αυτών εξυπηρετείται η μεταφορά ενός πλήθους διαφορετικών ρευστών, με πιο διαδεδομένα το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Ωστόσο, η επίτευξη ενός τέτοιου έργου είναι μια διαδικασία σύνθετη. Ειδικότερα, η διαμόρφωση της διαδρομής ενός αγωγού απαιτεί τη μελέτη πολλών διαφορετικών κριτηρίων. Ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια είναι η πιθανότητα εκδήλωσης γεωκινδύνων κατά μήκος της γραμμής του αγωγού. Οι γεωκίνδυνοι μπορεί να βλάψουν την ακεραιότητα ενός αγωγού, προκαλώντας παραμορφώσεις ή και ολική κατάρρευση αυτού. Από το σύνολο των γεωκινδύνων, η υπό σεισμικές συνθήκες αστάθεια των πρηνών, δηλαδή οι σεισμικά προκαλούμενες μετατοπίσεις ή κατολισθήσεις του εδάφους, απαιτούν τη διεξαγωγή λεπτομερούς μελέτης. Δεδομένων των παραπάνω, στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια ανάπτυξης ενός υπολογιστικού-πολυκριτηριακού εργαλείου, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χάραξης αγωγών μεγάλου μήκους. Το εργαλείο διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε μεταξύ άλλων να μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη απόφασης σχετικά με τη διασταύρωση ή την αποφυγή ενός αγωγού με μια περιοχή, όπου ενδέχεται να προκληθεί μετατόπιση ή κατολίσθηση του εδάφους, εξαιτίας κάποιου σεισμού. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS διαμορφώνεται μια προκαταρκτική διαδρομή, με κριτήριο την επιβεβλημένη αποφυγή ορισμένων περιοχών. Έπειτα, εντοπίζονται τα σημεία διασταύρωσης της προκαταρκτικής διαδρομής με δυνητικά επικίνδυνα πρηνή. Αφού εντοπιστούν τα εν λόγω πρηνή, αυτά προσομοιώνονται με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, στο λογισμικό Abaqus, και εξετάζεται η ευστάθεια τους υπό σεισμικές συνθήκες, καθώς και η αλληλεπίδραση τους με τον αγωγό. Τελικό αποτέλεσμα των αναλύσεων αποτελούν οι σεισμικά προκαλούμενες παραμορφώσεις του αγωγού. Στη συνέχεια, οι τιμές των παραμορφώσεων ελέγχονται σε σχέση με τα επιτρεπόμενα όρια που ορίζει ο Ευρωκώδικας 8. Εάν οι παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν τα αποδεκτά όρια, η προκαταρκτική διαδρομή θεωρείται ασφαλής. Σε αντίθετη περίπτωση, η προκαταρκτική διαδρομή δεν θεωρείται ασφαλής και προτείνεται μια νέα διαδρομή προς χάραξη.

ABSTRACT

Long-distance onshore pipelines constitute one of the most widely discussed construction fields of recent years. Through them, the transport of a variety of fluids is achieved, with oil and gas being the most common. The completion of such a project is a complicated process. Particularly, configuration of a pipeline route requires consideration of many different criteria. One of the most important criteria to be examined is the probability of occurrence of geohazards along the line of the pipeline. Geohazards can damage the integrity of a pipeline, causing deformations or even total collapse. Of all the geohazards, the seismic instability of the slopes, i.e. the seismically induced displacements or landslides, require a detailed study. Given the above, this dissertation aims to develop a computational-multicriteria tool, whose objective is to optimize the route of long-distance pipelines. The tool was configured in such a way as to support, among other things, the decision on whether a pipeline will cross an area where the ground might be displaced or subsided due to an earthquake or not. More specifically, initially, using the ArcGIS software, a preliminary route is created, based on the necessity to avoid certain areas. Then, the junction points of the preliminary route with potentially hazardous slopes are identified. Once these slopes have been identified, they are simulated with the use of the finite element method, in the Abaqus software, and both their stability under seismic conditions and their interaction with the pipeline are examined. The result of this analysis is the seismically induced deformations of the pipeline. Then, the deformations values are checked against the permitted limits set by Eurocode 8. If deformations do not exceed the acceptable limits, the preliminary route is considered safe. Otherwise, the preliminary route is not considered safe and a new route is proposed.

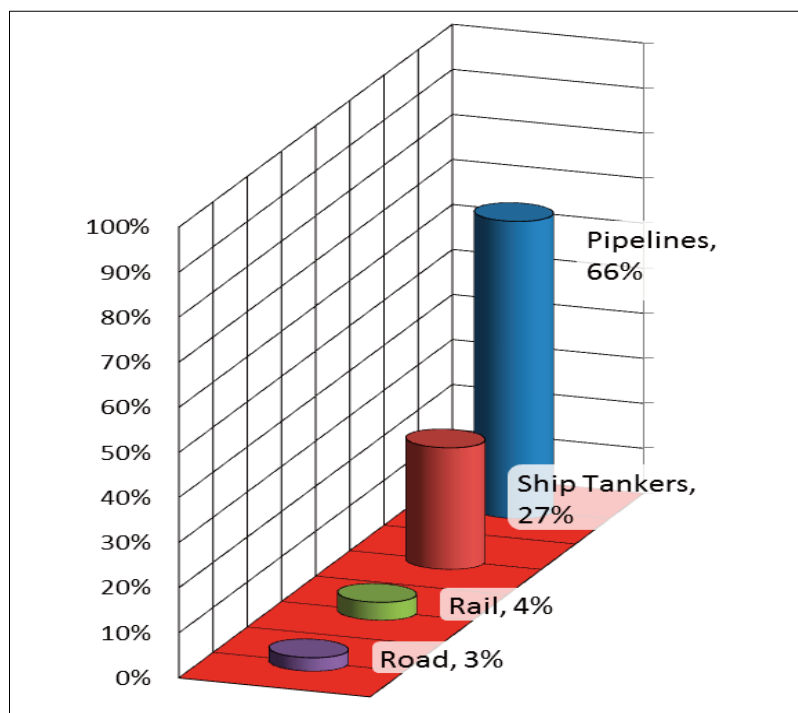
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΧΕΡΣΑΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	3
2.1 Ορισμός	3
2.2 Μεταφερόμενα προϊόντα	4
2.2.1 Αμμωνία	4
2.2.2 Μεταλλεύματα	5
2.2.3 Υδρογόνο	7
2.2.4 Νερό	8
2.2.5 Πετρέλαιο και φυσικό αέριο	10
2.3 Επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού	16
2.3.1 Περιγραφή της διαδικασίας επιλογής της διαδρομής	17
2.3.2 Δραστηριότητες επιλογής διαδρομής εντός των φάσεων υλοποίησης του έργου..	19
2.3.3 Βασικές αρχές και παράγοντες επιρροής της χάραξης του αγωγού	22
2.3.4 Κριτήρια επιλογής της διαδρομής του αγωγού	27
3. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ.....	29
3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Ευστάθεια πρανών υπό στατικές συνθήκες	30
3.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια.....	30
3.2.2 Κατολισθήσεις.....	33
3.2.3 Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών	38
3.3 Ευστάθεια πρανών υπό σεισμικές συνθήκες	41
3.3.1 Τύποι σεισμικών κατολισθήσεων	42
3.3.2 Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών	44
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ.....	49
4.1 Περιγραφή υπολογιστικού-πολυκριτηριακού εργαλείου	49
4.2 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και λογισμικό ArcGIS	50
4.2.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών	50
4.2.2 Είδη χρησιμοποιούμενων δεδομένων σε ένα Σ.Γ.Π.	51
4.2.3 Λειτουργία ενός Σ.Γ.Π.....	53
4.2.4 Περιγραφή του λογισμικού ArcGIS 10.3.1	56
4.2.5 Βασικά εργαλεία του λογισμικού ArcGIS που χρησιμοποιήθηκαν	61
4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων και λογισμικό Abaqus	70

4.3.1 Εισαγωγή.....	70
4.3.2 Τα κύρια βήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.....	71
4.3.3 Προ-επεξεργασία, Επεξεργασία και Μετά-Επεξεργασία δεδομένων κατά την εφαρμογή της ΜΠΣ.....	76
4.3.4 Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ABAQUS.....	77
4.3.5 Ορισμός μοντέλων στο λογισμικό ABAQUS.....	78
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1 ^Η : ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	79
5.1 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό ArcGIS.....	79
5.2 Διαμόρφωση προκαταρκτικής διαδρομής.....	83
5.3 Εντοπισμός των δυνητικά ασταθών περιοχών προς ανάλυση	87
5.4 Διερεύνηση της ευστάθειας των δυνητικά ασταθών πρηνών και της αλληλεπίδρασης αυτών με τον αγωγό στο λογισμικό Abaqus.....	90
5.5 Έλεγχος των μέγιστων παραμορφώσεων του αγωγού στο λογισμικό ArcGIS	104
5.6 Έλεγχος των παραμορφώσεων σε περίπτωση αύξησης του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης	108
5.7 Επαναπροσδιορισμός της διαδρομής του αγωγού	114
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2 ^Η : ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ	117
6.1 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό ArcGIS.....	117
6.2 Διαδικασία καθορισμού δυνητικά επικίνδυνων πρηνών	122
6.3 Διαμόρφωση προκαταρκτικών διαδρομών	127
6.4 Εντοπισμός σημείων τομής των προκαταρκτικών διαδρομών με τα δυνητικά επικίνδυνα πρηνή	129
6.5 Διερεύνηση της επίδρασης των δυνητικά επικίνδυνων πρηνών στον αγωγό	132
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	149
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	153

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, οι χερσαίοι αγωγοί μεγάλου μήκους κατέχουν ένα σημαντικό ρόλο στη μεταφορά των ρευστών. Σύμφωνα με την IPLOCA (International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013), η επιλογή των αγωγών ως μέσο μεταφοράς ρευστών υπερτερεί έναντι των εναλλακτικών μέσων, δηλαδή των δεξαμενόπλοιων, των τρένων ή των φορτηγών, καθώς θεωρείται περισσότερο ασφαλής και οικονομική. Επιπλέον, άξιο αναφοράς είναι το γεγονός, πως σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο καταγράφονται περίπου 3,5 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών, ενώ 190.905 χιλιόμετρα είναι στα σχέδια ή υπό κατασκευή (Pipeline & Gas Journal).



Εικόνα 1.1: Ποσοστά των εκτιμώμενων όγκων ρευστών που μεταφέρονται με το εκάστοτε μέσο μεταφοράς (Πηγή: International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013)

Ωστόσο, η κατασκευή ενός τέτοιου έργου είναι αρκετά σύνθετη. Ειδικότερα, η διαμόρφωση της διαδρομής ενός αγωγού μεγάλου μήκους αποτελεί συνήθως πρόκληση για τους εμπλεκόμενους μηχανικούς, καθώς είναι πολλοί οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σε πρώτη φάση, πρέπει να επιτυγχάνεται η ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, δηλαδή των κατοικημένων περιοχών, καθώς και των διαφόρων περιοχών που χρήζουν προστασίας, όπως είναι οι περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές ή τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Έπειτα, επιδιώκεται η αρμονική λειτουργία του αγωγού και η διαφύλαξη της ακεραιότητάς του. Σημειώνεται ότι η ακεραιότητα ενός αγωγού μπορεί να απειληθεί κατά κύριο λόγο είτε από την παρέμβαση τρίτων, είτε

από την εκδήλωση κάποιου γεωκινδύνου σε κάποια περιοχή από την οποία διέρχεται. Από τα παραπάνω, η παρέμβαση τρίτων μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα μέσω συστημάτων φύλαξης, ενώ η αντιμετώπιση της εκδήλωσης γεωκινδύνων είναι περισσότερο σύνθετη και απαιτεί εκτενέστερη μελέτη.

Πιο συγκεκριμένα, υπό ιδανικές συνθήκες, οι περιοχές ενδεχόμενης ενεργοποίησης γεωκινδύνων πρέπει να αποφεύγονται κατά τη χάραξη της διαδρομής ενός αγωγού. Ωστόσο, η αποφυγή των περιοχών αυτών, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, συνεπάγεται σημαντική αύξηση του μήκους του αγωγού και κατ' επέκταση και του κόστους κατασκευής. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την άγνοια, ως προς το αν η πιθανή ενεργοποίηση κάποιου γεωκινδύνου θα έχει όντως αρνητική επίπτωση στον αγωγό, οδηγούν στο συμπέρασμα πως μια εκ των προτέρων αποφυγή της περιοχής εκδήλωσης του γεωκινδύνου μπορεί να αποδειχτεί λανθασμένη. Για το λόγο αυτό, πριν από την απόφαση παράκαμψης των περιοχών των γεωκινδύνων, κρίνεται σκόπιμο να διαπιστώνεται, μέσω αριθμητικών μεθόδων, αν η διασταύρωση με τις περιοχές αυτές θα έχει επιβλαβείς συνέπειες για τον αγωγό. Κατά αυτό τον τρόπο, ανάλογα με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την ανάλυση, θα μπορεί να ληφθεί η σωστή απόφαση σχετικά με την αποφυγή ή τη διασταύρωση με τις περιοχές πιθανής εκδήλωσης γεωκινδύνων.

Δεδομένων των παραπάνω, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε μια απόπειρα δημιουργίας ενός υπολογιστικού-πολυκριτηριακού εργαλείου, το οποίο θα προτείνει τη βέλτιστη διαδρομή μεταξύ των προκαθορισμένων σημείων έναρξης και τερματισμού ενός αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, το εργαλείο αρχικά διαμορφώνει μια προκαταρκτική διαδρομή με κριτήριο την επιβεβλημένη αποφυγή ορισμένων περιοχών, όπως είναι οι αστικές ή οι περιβαλλοντικά ευαίσθητες. Αφού διαμορφωθεί η προκαταρκτική διαδρομή, εντοπίζονται οι περιοχές ενδεχόμενης ενεργοποίησης γεωκινδύνων, που διασταυρώνονται με αυτήν, και βάσει αριθμητικών μεθόδων, υποστηρίζεται η λήψη απόφασης σχετικά με το αν η διασταύρωση του αγωγού με αυτές είναι ασφαλής. Στην περίπτωση που η προκαταρκτική διαδρομή αποδειχθεί μη ασφαλής, το εργαλείο προτείνει μια νέα διαδρομή προς χάραξη. Καθώς η εξέταση όλων των πιθανών γεωκινδύνων είναι μια σύνθετη διαδικασία, το εν λόγω εργαλείο περιορίστηκε μόνο στην εξέταση της ευστάθειας των πρηνών υπό σεισμικές συνθήκες, δηλαδή στην πιθανότητα πρόκλησης κατολισθητικών φαινομένων ή μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων σε εδαφικά πρηνή, εξαιτίας κάποιου σεισμού. Διευκρινίζεται ότι για την ανάπτυξη του εργαλείου έγινε χρήση τόσο των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), όσο και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

2. ΧΕΡΣΑΙΟΙ ΑΓΩΓΟΙ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

2.1 Ορισμός

Χερσαίος αγωγός μεγάλου μήκους καλείται η σωληνοειδής κατασκευή που εγκαθίσταται στη στεριά και μπορεί να διατρέχει έως και εκατοντάδες χιλιόμετρα, με σκοπό τη μεταφορά κάποιου ρευστού υλικού από ένα σημείο σε ένα άλλο. Το ρευστό υλικό μπορεί να έχει υγρή, αέρια ή ακόμα και μορφή εναιωρήματος, δηλαδή διαλύματος στερεού σε υγρό. Για την κατασκευή του χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μέταλλα (χάλυβας, χυτοσίδηρος και αλουμίνιο), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σκυρόδεμα, προϊόντα αργίλου ή πλαστικό. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση του. Τέλος, η τοποθέτηση του γίνεται είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε υπό της επιφάνειας αυτής.



Εικόνα 2.1: Χερσαίος υπόγειος αγωγός μεγάλου μήκους (Πηγή: tuv.com)



Εικόνα 2.2: Χερσαίος υπέργειος αγωγός μεγάλου μήκους (Πηγή: energyeducation.ca)

2.2 Μεταφερόμενα προϊόντα

Οι χερσαίοι αγωγοί μεγάλου μήκους βρίσκουν εφαρμογή στη μεταφορά ποικίλων προϊόντων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή το ακατέργαστο πετρέλαιο και τα εξευγενισμένα προϊόντα αυτού, το φυσικό αέριο, τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο. Επιπλέον, συχνή είναι η χρήση αγωγών μεγάλου μήκους και για την μεταφορά νερού από απομακρυσμένες πηγές στα αστικά κέντρα. Από την άλλη, λιγότερο γνωστή είναι η χρήση αγωγών για τη μεταφορά προϊόντων όπως η αμμωνία, ο άνθρακας και άλλα μεταλλεύματα, το διοξείδιο του άνθρακα και ο ατμός. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναφέρονται μερικά παραδείγματα υπαρχόντων αγωγών μεταφοράς των παραπάνω προϊόντων, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά αυτών.

2.2.1 Αμμωνία

Η αμμωνία είναι ένα φυσικό στοιχείο που εντοπίζεται στο περιβάλλον, δηλαδή στον αέρα, στο έδαφος, στο νερό, στα φυτά, στα ζώα, ακόμα και στον άνθρωπο. Αποτελεί βασικό συστατικό παραγωγής πολλών προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή. Πιο συγκεκριμένα, το 90% της παραγόμενης αμμωνίας χρησιμοποιείται σε λιπάσματα, ενώ το υπόλοιπο 10% κατανέμεται σε οικιακά προϊόντα καθαρισμού, σε ψυκτικό αέριο για μηχανήματα, όπως το κλιματιστικό, στη σύνθεση φαρμακευτικών προϊόντων και σε διάφορες άλλες χρήσεις.

Μεταξύ άλλων, η άνυδρη αμμωνία, δηλαδή η καθαρή αέρια αμμωνία, μπορεί να μεταφερθεί και μέσω αγωγών μεγάλου μήκους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στις ΗΠΑ αποτελεί η γραμμή Nustar, που έχει μήκος περίπου 3.070 χιλιόμετρα και μεταφέρει αμμωνία από την πολιτεία του Μισισίπι στην Ινδιανάπολη, την Μινεσότα και την Νεμπράσκα. Οι δύο τελευταίες πολιτείες αποτελούν σταθμούς και για τη γραμμή Magellan, η οποία εκτείνεται νότια ως την Οκλαχόμα και το Τέξας και έχει μήκος περίπου 1.900 χιλιόμετρα. Οι δύο γραμμές συνολικά μεταφέρουν κατά προσέγγιση 2,9 εκατομμύρια τόνους αμμωνίας ετησίως. Όσον αφορά την Ευρώπη, σε αυτήν συναντάται ο αγωγός Transammiak, ο οποίος συνδέει το εργοστάσιο παραγωγής αμμωνίας της εταιρείας TogliattiAzot στη Ρωσία με το λιμάνι της Οδησσού, στην Μαύρη Θάλασσα. Ο αγωγός αυτός θεωρείται ένας από τους μεγαλύτερους αγωγούς μεταφοράς αμμωνίας, καθώς έχει μήκος 2.400 χιλιόμετρα και δυνατότητα μεταφοράς 3 εκατομμυρίων τόνων ετησίως (Valera-Medina, Xiao, Owen-Jones, David, & Bowen, 2018).



Εικόνα 2.3: Αγωγοί μεταφοράς αμμωνίας στις ΗΠΑ. Με τη συνεχή γραμμή απεικονίζεται ο αγωγός Nustar και με τη διακεκομμένη ο Magellan (Πηγή: energy.gov)

2.2.2 Μεταλλεύματα

Αγωγοί μεγάλου μήκους χρησιμοποιούνται και για την μεταφορά των μεταλλευμάτων από τα ορυχεία σε μονάδες εμπλουτισμού ή σε λιμάνια, όπου μεταφορτώνονται για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς επιλέγεται κυρίως στις περιπτώσεις όπου τα ορυχεία είναι πολύ απομακρυσμένα ή προσεγγίζονται δύσκολα. Τα μεταλλεύματα μεταφέρονται μέσω των αγωγών σε μορφή εναιωρήματος (slurry). Γενικά, εναιώρημα ονομάζεται το ετερογενές μίγμα ενός ρευστού, υγρού ή αέριου, με ένα ή περισσότερα είδη στερεών σωματιδίων, που ποικίλουν σε μέγεθος από μερικά μικρά έως μερικά χιλιοστά (Javaheri, Porter, & Kuokkala, 2018). Ορισμένα παραδείγματα μεταλλευμάτων που μεταφέρονται με αυτό τον τρόπο είναι ο άνθρακας, ο χαλκός, ο σίδηρος, ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος, το νικέλιο και ο βωξίτης. Τα υλικά αυτά, πριν από την είσοδο τους στους αγωγούς, αναμειγνύονται με νερό, ενώ κατά την έξοδο τους διαχωρίζονται ξανά από αυτό, μέσω ειδικών φίλτρων.

Αξιοσημείωτο παράδειγμα αποτελεί ο αγωγός μεταφοράς εναιωρήματος σιδήρου MMX της Βραζιλίας. Πιο συγκεκριμένα, ο εν λόγω αγωγός μεταφέρει

τα σιδηρομεταλλεύματα που εξορύσσονται και επεξεργάζονται στο ορυχείο της πολιτείας του Μίνας Γκεράϊς στα λιμάνια του Ρίο ντε Τζανέιρο, διασχίζοντας 33 δημοτικές ενότητες. Η διάμετρος του είναι περίπου 60 εκατοστά και το συνολικό του μήκος 529 χιλιόμετρα, γεγονός που τον καθιστά τον μεγαλύτερο στον κόσμο, στην κατηγορία του. Παρόλο που το έργο βρίσκεται σε λειτουργία, δεν έχει επέλθει ακόμα η ολοκλήρωση του. Ωστόσο, έχει εκτιμηθεί, ότι κατά την τελική του φάση ο αγωγός θα μεταφέρει 26,5 εκατομμύρια τόνους σιδηρομεταλλεύματος ανά χρόνο.



Εικόνα 2.4: Κατασκευαζόμενη σήραγγα και αγωγός του έργου Minas-Rio (Πηγή: ausenco.com)

Σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν κατασκευαστεί αρκετοί αγωγοί μεταφοράς εναιωρήματος μεγάλου μήκους, από τους οποίους ακολούθως αναφέρονται ενδεικτικά δέκα.

1. Da Hong Shan: αγωγός εναιωρήματος σιδηρομεταλλευμάτων, Κίνα, 171 χιλιόμετρα
2. Paragominas: αγωγός εναιωρήματος βωξίτη, Βραζιλία, 244 χιλιόμετρα
3. Samarco: αγωγός εναιωρήματος σιδηρομεταλλευμάτων, Βραζιλία, 396 χιλιόμετρα
4. Simplot: αγωγός φωσφόρου, ΗΠΑ, 100 χιλιόμετρα
5. Los Pelambres: αγωγός συμπυκνώματος χαλκού, Χιλή, 120 χιλιόμετρα
6. Minera Alumbrera: αγωγός συμπυκνώματος χαλκού, Αργεντινή, 310 χιλιόμετρα
7. Jianshan: αγωγός εναιωρήματος σιδηρομεταλλευμάτων, Κίνα, 100 χιλιόμετρα
8. Minera Dona Ines Collahuasi: αγωγός συμπυκνώματος χαλκού, Χιλή, 203 χιλιόμετρα
9. Freeport: ορυχείο Grasberg, αγωγός συμπυκνώματος χαλκού, Ίριαν Jaya/ Ινδονησία, 120 χιλιόμετρα

10. Hy-Grade Pellets: αγωγός εναιωρήματος σιδηρομεταλλευμάτων, Ινδία, 268 χιλιόμετρα

2.2.3 Υδρογόνο

Το υδρογόνο στις κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή σε θερμοκρασία 25° και υπό πίεση 1 atm, αποτελεί ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο, το οποίο δεν συναντάται ποτέ μόνο του στη Γή, αλλά πάντα σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία. Έχει διαπιστωθεί ότι αποτελεί σημαντική πρώτη ύλη για ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες και ένα καύσιμο, του οποίου η ενέργεια επαρκεί για να καλύψει το σύνολο των δραστηριοτήτων μιας κοινωνίας. Αυτός είναι και ο λόγος που έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές μέθοδοι παραγωγής του, οι οποίες με την σειρά τους συνεπάγονται διαφορετικές μεθόδους διανομής του από μια περιοχή σε μια άλλη. Όπως είναι αναμενόμενο, μια από τις μεθόδους μεταφοράς και διανομής του είναι η χρήση αγωγών. Για την μεταφορά αυτή, υπάρχει και η δυνατότητα μετατροπής του υδρογόνου σε υγρή μορφή, μέθοδος που όμως δεν προτιμάται, λόγω των προβλημάτων που επιφέρει (Takahashi, 2008).

Το παλαιότερο δίκτυο μεταφοράς υδρογόνου ξεκίνησε να λειτουργεί το 1938, βρίσκεται στην Δυτική Γερμανία και ονομάζεται Chemische Werke AG Hills. Πρόκειται για ένα υπόγειο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από αγωγό συνολικού μήκους περίπου 210 χιλιομέτρων και διαμέτρου 15 έως 30 εκατοστών. Ο αγωγός μεταφέρει υδρογόνο 95% καθαρότητας, σε πίεση 1,5 MPa.

Ένα άλλο σημαντικό παράδειγμα δικτύου μεταφοράς υδρογόνου, που αποτελεί και το μεγαλύτερο στον κόσμο, συναντάται στις ΗΠΑ από την εταιρεία Air Products and Chemicals. Το δίκτυο αυτό αναπτύσσεται κατά κύριο λόγο γύρω από τον κόλπο του Μεξικού και έχει συνολικό μήκος περίπου 965 χιλιόμετρα.



Εικόνα 2.5: Δίκτυο μεταφοράς υδρογόνου της εταιρείας Air Products and Chemicals στις ΗΠΑ (Πηγή: gasificationofbiomass.org)

2.2.4 Νερό

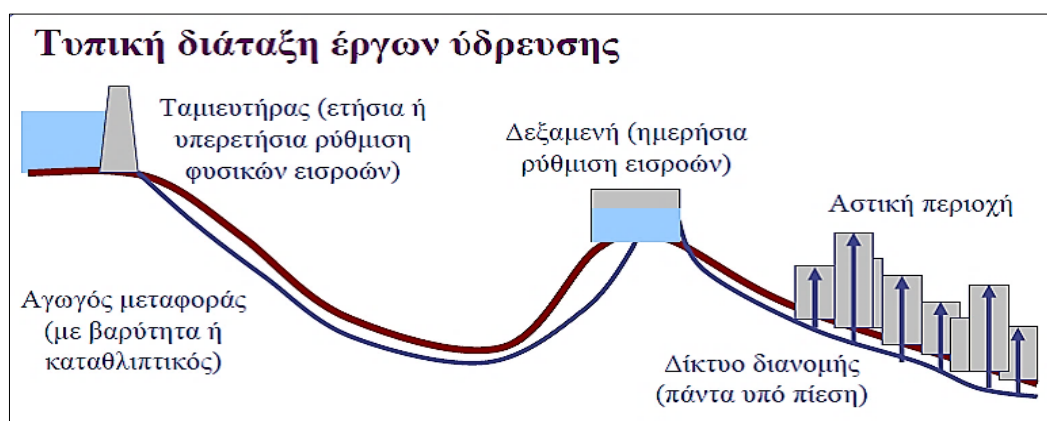
Η χρήση συστημάτων μεταφοράς νερού για ύδρευση ξεκινά από τα αρχαία μόλις χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, ιστορικές αναφορές αποδεικνύουν την ύπαρξη τους σε περιοχές όπως την Κρήτη, την Ανατολία της Τουρκίας και τη Ρώμη. Σκοπός των έργων ύδρευσης, από την εποχή εκείνη μέχρι και σήμερα, είναι η εξασφάλιση του απαιτούμενου νερού, καθώς και η μεταφορά και η διανομή αυτού στην εκάστοτε αστική περιοχή, για την εξυπηρέτηση των πάσης φύσεως αναγκών της. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα έργα ύδρευσης μπορούν να διακριθούν σε δύο γενικές κατηγορίες, οι οποίες είναι (Τσακίρης, 2010):

1. Έργα εξωτερικού υδραγωγείου ή υδροδοτικά έργα

Τα έργα εξωτερικού υδραγωγείου αναπτύσσονται έξω από τα όρια της αστικής περιοχής και περιλαμβάνουν την υδροληψία, δηλαδή τα έργα για την σύλληψη και απόληψη του νερού από τους υδατικούς πόρους, το δίκτυο μεταφοράς ή προμήθειας, στο οποίο χρησιμοποιούνται κλειστοί αγωγοί υπό πίεση ή σπανιότερα ανοιχτοί αγωγοί ελεύθερης επιφάνειας (κανάλια), καθώς και τη δεξαμενή ρύθμισης της παροχής.

2. Δίκτυα διανομής

Τα δίκτυα διανομής αναπτύσσονται στο εσωτερικό της αστικής περιοχής ως συστήματα κλειστών αγωγών υπό πίεση, που διανέμουν το επεξεργασμένο νερό από τις δεξαμενές ρύθμισης στους καταναλωτές.



Εικόνα 2.6: Τυπική διάταξη έργων ύδρευσης (Πηγή: Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2005)

Μεταξύ των κατηγοριών αυτών, κλειστοί αγωγοί μεγάλου μήκους χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στα έργα εξωτερικού υδραγωγείου για τη μεταφορά του νερού από τα σημεία υδροληψίας ως τις παρυφές των αστικών

περιοχών, στην δεξαμενή ρύθμισης της παροχής. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι υδατικοί πόροι από τους οποίους γίνεται η απόληψη βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από τις αστικές περιοχές. Σημειώνεται, ότι για την ίδια μεταφορά, ανοιχτοί αγωγοί ελεύθερης επιφάνειας (κανάλια) είναι τεχνικό-οικονομικά πρόσφοροι μόνο στην περίπτωση που η παροχή πρέπει να είναι πολύ μεγάλη, δηλαδή της τάξης των δεκάδων κυβικών μέτρων ανά δευτερόλεπτο.

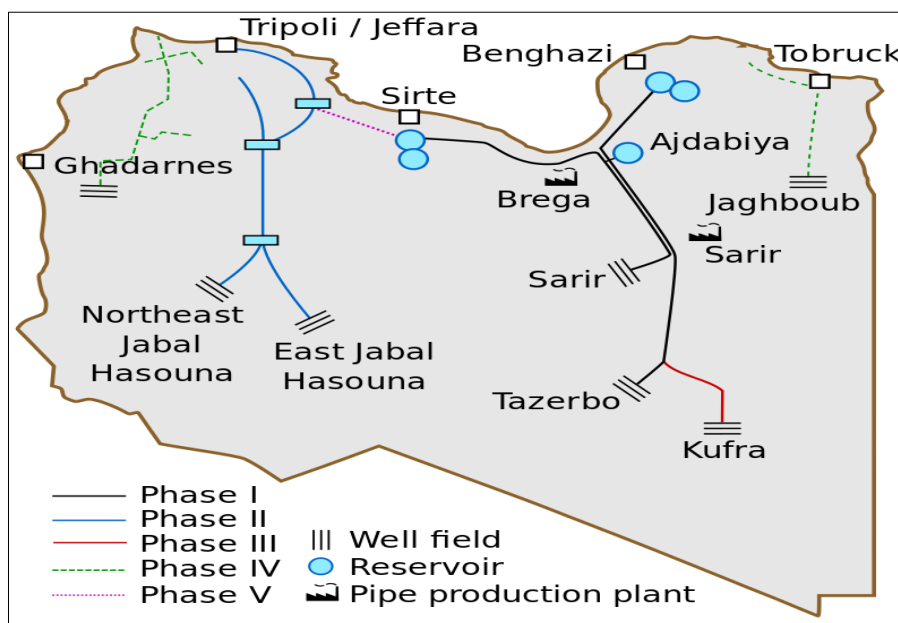
Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα συστήματος παροχής νερού είναι το Goldfields της δυτικής Αυστραλίας. Το έργο αυτό καλύπτει 530 χιλιόμετρα και μεταφέρει νερό από το Πέρθ σε κοινότητες όπως το Coolgardie και το Kalgoorlie. Ολοκληρώθηκε το 1903, αλλά εξακολουθεί να λειτουργεί μέχρι σήμερα, παρέχοντας νερό σε πάνω από 100.000 άτομα, σε νοικοκυριά, καθώς και σε ορυχεία, αγροκτήματα και άλλες επιχειρήσεις. Κατά την περίοδο της ολοκλήρωσης του, ο αγωγός του έργου αποτελούσε τον μέχρι τότε μακρύτερο αγωγό γλυκού νερού στον κόσμο.



Εικόνα 2.7: Αγωγός παροχής νερού Goldfields (Πηγή: goldfieldstourism.com.au)

Ωστόσο, το μεγαλύτερο σύστημα μεταφοράς νερού στον κόσμο αναμένεται να είναι το Great Man-Made River της Λιβύης, του οποίου η ολοκλήρωση εκκρεμεί ακόμα (Trifunovic, 2006). Πιο συγκεκριμένα, η εκτέλεση του έργου είχε χωριστεί σε πέντε φάσεις, από τις οποίες όμως μόνο οι τρεις έχουν ολοκληρωθεί. Κατά την πρώτη φάση, κατασκευάστηκε αγωγός μεγαλύτερος των 1.000 χιλιομέτρων, με σκοπό την ένωση του Ας-Σαφίρ με τη Σύρτη και τη Βεγγάζη, και την καθημερινή παροχή περισσότερων από ένα εκατομμύριο κυβικών μέτρων γλυκού νερού σε αυτές. Στην δεύτερη φάση, πραγματοποιήθηκε η αξιοποίηση των νοτιοδυτικών πηγών και η σύνδεση τους με την παράκτια ζώνη της χώρας, και πιο συγκεκριμένα την πόλη της Τρίπολης. Τέλος, με την ολοκλήρωση της τρίτης φάσης επιτεύχθηκε η σύνδεση του αγωγού της πρώτης φάσης και με μια άλλη πηγή νοτιοανατολικότερα. Οι αγωγοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένοι

από σκυρόδεμα και έχουν διάμετρο τεσσάρων μέτρων. Τα τρία στάδια διαμορφώνουν ένα πολύ μεγάλο δίκτυο αγωγών που συνολικά ξεπερνά τα 3.500 χιλιόμετρα και παρέχει περίπου τρία εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού ανά ημέρα. Στην περίπτωση που ολοκληρωθούν και οι δύο εναπομένουσες φάσεις, το τελικό δίκτυο θα παρέχει περίπου 5,7 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά ημέρα.



Εικόνα 2.8: Δίκτυο μεταφοράς νερού Great Man-Made River (Πηγή: en.wikipedia.org)

2.2.5 Πετρέλαιο και φυσικό αέριο

Αναμφισβήτητα, οι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι οι πιο πολυσυζητημένοι των τελευταίων χρόνων και οι πιο σημαντικοί, εάν σκεφτεί κανείς την ποσότητα των έργων που έχουν πραγματοποιηθεί, και συνεχίζουν να πραγματοποιούνται, σχετικά με αυτούς. Δεδομένου ότι και τα δύο προϊόντα που προαναφέρθηκαν αποτελούν τα κατεξοχήν καύσιμα παραγωγής ενέργειας, καθώς και του ότι τα συστήματα μεταφοράς τους παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, θα μπορούσε κανείς να ομαδοποιήσει τους αγωγούς αυτούς σε μια ξεχωριστή κατηγορία με το όνομα αγωγοί ενέργειας.

Το σύνολο λοιπόν των αγωγών ενέργειας μπορεί να διακριθεί σε δυο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με την κατάσταση της ύλης του μεταφερόμενου προϊόντος. Η πρώτη κατηγορία είναι οι αγωγοί μεταφοράς υγρών, στα οποία γενικά συγκαταλέγεται το ακατέργαστο πετρέλαιο, τα προϊόντα που προκύπτουν μετά από τη διύλιση του, καθώς και το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Η δεύτερη κατηγορία είναι οι αγωγοί μεταφοράς αερίων, στα

οποία ανήκει αποκλειστικά το φυσικό αέριο. Πέρα όμως από τις δύο αυτές βασικές κατηγορίες, οι αγωγοί ενέργειας, με βάση το τμήμα του δικτύου που εξυπηρετούν, μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις περαιτέρω υποκατηγορίες, οι οποίες είναι:

1. Συλλεκτήριοι αγωγοί (Gathering pipelines)

Οι συλλεκτήριοι αγωγοί καλύπτουν την μεταφορά του προϊόντος από την πηγή εξόρυξης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ή στις δεξαμενές αποθήκευσης. Οι διαστάσεις τους είναι μικρές. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος τους είναι της τάξεως των μερικών εκατοντάδων μέτρων και η διάμετρος τους δεν ξεπερνά τα 30 εκατοστά.

2. Αγωγοί τροφοδοσίας (Feeder pipelines)

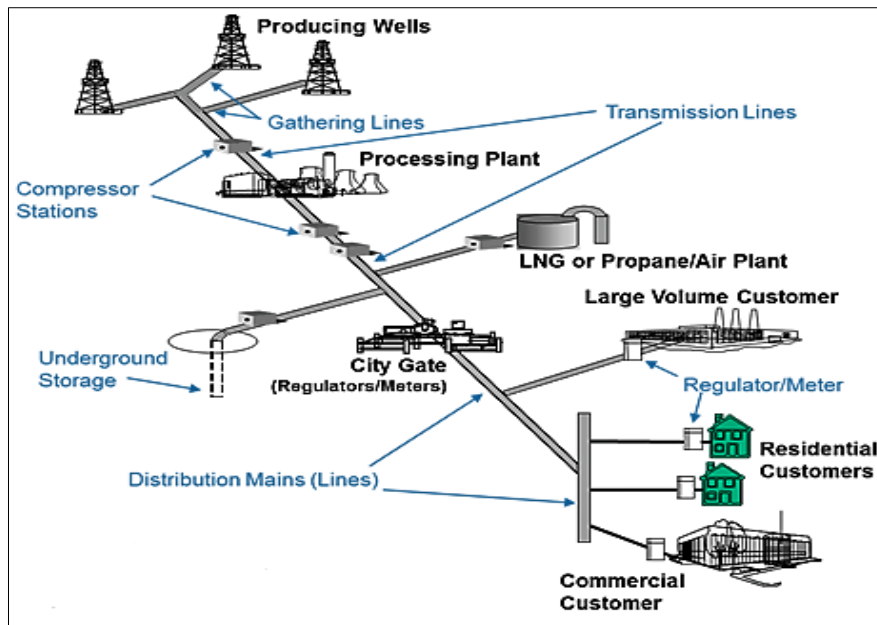
Οι αγωγοί τροφοδοσίας ανήκουν στην γενικότερη κατηγορία μεταφοράς υγρών. Επομένως, τα υλικά που μπορεί να μεταφέρουν είναι πετρέλαιο, προϊόντα πετρελαίου ή συστατικά του φυσικού αερίου, όπως το αιθάνιο, το προπάνιο και το βουτάνιο, που διαχωρίζονται από αυτό και αποκτούν μορφή υγρού (NGLs). Είναι αντίστοιχου μεγέθους με τους συλλεκτήριοις αγωγούς και κατά κύριο λόγο καλύπτουν την μεταφορά των προϊόντων από τις δεξαμενές αποθήκευσης στους μεγαλύτερων διαστάσεων αγωγούς μεταφοράς.

3. Αγωγοί μεταφοράς (Transmission pipelines)

Οι αγωγοί μεταφοράς καλύπτουν την απόσταση ανάμεσα στην ευρύτερη περιοχή εξόρυξης και τις τοπικές εταιρείες διανομής. Οι διαστάσεις τους είναι οι μεγαλύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, οι διαδρομές που καλούνται να ακολουθήσουν ενδέχεται να διέρχονται από διαφορετικές χώρες ή ακόμα και ηπείρους. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη σταθμών συμπίεσης ή αντλιών κατά μήκος της διαδρομής, ανάλογα με την μεταφορά φυσικού αερίου ή υγρών προϊόντων, αντίστοιχα. Τέλος, η διάμετρος τους κυμαίνεται από 10 εκατοστά έως και μερικά μέτρα.

4. Αγωγοί «διανομής» (Distribution pipelines)

Οι αγωγοί διανομής χρησιμοποιούνται για την μεταφορά αποκλειστικά του φυσικού αερίου από τις τοπικές εταιρείες διανομής στα σπίτια και τις υπηρεσίες. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 1 έως 15 εκατοστά.



Εικόνα 2.9: Κατηγορίες αγωγών σε ένα δίκτυο διανομής φυσικού αερίου (Πηγή: epa.gov)

Αφού αναφέρθηκαν οι κατηγορίες που είναι κοινές για το σύνολο των αγωγών ενέργειας, κρίνεται πλέον σκόπιμο τα δύο συστήματα μεταφοράς να εξεταστούν και χωριστά. Έτσι σε πρώτη φάση, προκειμένου να διασαφηνιστούν έννοιες που είναι σημαντικές και κατά την διαδικασία επιλογής χάραξης, για καθένα από τα συστήματα αυτά δίνεται μια γενική περιγραφή της λειτουργίας του. Έπειτα ακολουθεί η παράθεση ορισμένων χαρακτηριστικών παραδειγμάτων υπαρχόντων αγωγών .

A) Φυσικό αέριο

Όσον αφορά την περίπτωση του φυσικού αερίου, οφείλει να διευκρινιστεί, ότι η βασική αρχή της λειτουργίας και του σχεδιασμού ενός δικτύου μεταφοράς του είναι η κίνηση του αερίου να γίνεται από περιοχές υψηλότερης σε περιοχές χαμηλότερης πίεσης. Δεδομένης της αρχής αυτής, η πορεία των λειτουργιών ξεκινά με τη μεταφορά του φυσικού αερίου από το σημείο εξόρυξης στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, μέσω των συλλεκτήριων αγωγών. Για την επίτευξη της μεταφοράς αυτής πολλές φορές κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση δύο ή περισσότερων συμπιεστών πεδίου. Οι συμπιεστές είναι μηχανήματα, που με τη βοήθεια ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης ή μιας τουρμπίνας αναπληρώνουν την πίεση που χάνεται λόγω τριβής του φυσικού αερίου με τα τοιχώματα των αγωγών, ώστε να δώσουν στο αέριο ώθηση να κινηθεί.

Έπειτα, στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ορισμένα συστατικά, όπως το αιθάνιο, το προπάνιο και το βουτάνιο (NGLs), διαχωρίζονται από το φυσικό

αέριο και μέσω αγωγών τροφοδοσίας οδηγούνται σε διυλιστήρια πετρελαίου, προκειμένου να αξιοποιηθούν σε άλλες λειτουργίες. Επιπλέον, πραγματοποιείται αφαίρεση του νερού, του διοξειδίου του άνθρακα και του θείου, καθώς θεωρείται ότι μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση των αγωγών, όπως επίσης και των αδρανών αερίων, όπως το ήλιο, που μπορεί να προκαλέσει μείωση της ενεργειακής αξίας του αερίου. Τέλος, στο εναπομένον φυσικό αέριο προστίθεται ένα προϊόν με χαρακτηριστική οσμή, έτσι ώστε αυτό να μπορεί να γίνεται αντιληπτό από τους καταναλωτές, σε περίπτωση διαρροής.

Το επεξεργασμένο πλέον φυσικό αέριο περνάει στους αγωγούς μεταφοράς, προκειμένου μέσω αυτών να φτάσει σε τοπικές εταιρείες διανομής. Κατά μήκος των αγωγών τοποθετούνται σταθμοί συμπίεσης ανά 65 έως 160 χιλιόμετρα. Οι συμπιεστές στους σταθμούς αυτούς έχουν μεγάλη ισχύ, έως και 36.000 ίππους, με αποτέλεσμα το φυσικό αέριο να κινείται εντός των αγωγών με ταχύτητα περίπου 40 χιλιόμετρα ανά ώρα. Οι αγωγοί μαζί με τους σταθμούς διαμορφώνουν ένα πλήρως κλειστό κύκλωμα, έτσι ώστε το αέριο να μην μπορεί να διαφύγει. Επιπλέον, εάν οι εταιρείες εκμετάλλευσης το κρίνουν απαραίτητο, μπορούν σε αυτό το στάδιο να αποθηκεύουν το αέριο σε υπόγειες θέσεις, όπως είναι για παράδειγμα τα σπήλαια αλάτων, τα οποία είναι γνωστά για τη μη πορώδη και υδατοστεγή ιδιότητα τους.

Πριν από την διανομή του στα σπίτια και τις επιχειρήσεις, το φυσικό αέριο συγκεντρώνεται από τις τοπικές εταιρείες διανομής σε έναν σταθμό (Gate station). Κατά κύριο λόγο, ο ρόλος του σταθμού είναι να μειώνει την πίεση του αερίου, φέρνοντας την στα επίπεδα λειτουργίας των αγωγών διανομής. Επιπλέον, στις περιπτώσεις που αυτό δεν έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενο στάδιο, στον σταθμό αυτό γίνεται και η προσθήκη της χαρακτηριστικής οσμής στο αέριο, προκειμένου να ανιχνεύεται οποιαδήποτε διαρροή. Τέλος, το φυσικό αέριο παραδίδεται στους ιδιώτες, μέσω των αγωγών διανομής. Για τους αγωγούς αυτούς ισχύει ότι όσο πιο κοντά φτάνει το αέριο στους καταναλωτές, τόσο μικραίνει η διάμετρος και η πίεση στο εσωτερικό τους, καθώς επίσης και ότι λειτουργούν σε λιγότερο από το ένα πέμπτο της πίεσης που έχουν σχεδιαστεί να αναλαμβάνουν.

Ένα από τα μεγαλύτερα δίκτυα αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου αποτελεί το έργο West-East της Κίνας. Το εν λόγω έργο αποτελείται από τρεις αγωγούς, που συνολικά καλύπτουν παραπάνω από 20.000 χιλιόμετρα και μεταφέρουν 77 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως από την Δυτική στην Νοτιοανατολική Κίνα. Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος αγωγός (West-East I) ξεκινάει από το Ταρίμ στο Σιντζιάνγκ, και αφού διασχίσει 10 επαρχίες, καταλήγει στη Σαγκάη. Αποτελείται από έναν κύριο αγωγό και τρεις διακλαδώσεις και έχει συνολικό μήκος 4.380 χιλιόμετρα και ετήσια παροχή 17 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Ο δεύτερος αγωγός (West-East II), ο οποίος είναι και ο μεγαλύτερος αγωγός φυσικού αερίου στον κόσμο, ξεκινάει από το

Χόργκος στο Σιντζιάνγκ και καταλήγει στη Σαγκάη και το Χόνγκ Κόνγκ. Αποτελείται από έναν κύριο αγωγό και οκτώ διακλαδώσεις, διασχίζει 14 επαρχίες, έχει συνολικό μήκος 8.819 χιλιόμετρα και δυνατότητα ετήσιας παροχής 30 δισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων. Τέλος, ο τρίτος αγωγός (West-East III) ξεκινάει επίσης από το Χόργκος στο Σιντζιάνγκ και καταλήγει στην Φουτσόου της Φουτσιάν. Αποτελείται από έναν κύριο αγωγό και πέντε διακλαδώσεις, διασχίζει 10 επαρχίες, έχει συνολικό μήκος 6.840 χιλιόμετρα και δυνατότητα ετήσιας παροχής 30 δισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων φυσικού αερίου.



Εικόνα 2.10: Αγωγοί φυσικού αερίου West-East I, II και III (Πηγή: China National Petroleum Corporation)

Β) Πετρέλαιο

Σε αντιστοιχία με το δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου, η λειτουργία του δικτύου μεταφοράς πετρελαίου ξεκινάει από τις πηγές εξόρυξης, από όπου το ακατέργαστο πετρέλαιο οδηγείται μέσα από ένα σύνολο μικρών συλλεκτήριων αγωγών στις δεξαμενές αποθήκευσης. Έπειτα, μέσω αγωγών τροφοδοσίας το πετρέλαιο οδηγείται είτε σε κοντινά διυλιστήρια είτε στους μεγαλύτερων διαστάσεων αγωγούς μεταφοράς. Για να μπορέσει το πετρέλαιο να κινηθεί, κατά μήκος των αγωγών μεταφοράς τοποθετούνται ανά κοντινά διαστήματα αντλιοστάσια. Τα αντλιοστάσια είναι κατασκευασμένα έτσι, ώστε μαζί με τον αγωγό να συνιστούν ένα πλήρως κλειστό σύστημα, προκειμένου να αποφεύγεται η οποιαδήποτε διαρροή. Επιπλέον, διαθέτουν πολλαπλές αντλίες, καθεμία από τις οποίες λειτουργεί με ηλεκτρικό μοτέρ, ισχύος της

τάξεως των 6.500 ίππων. Αποτέλεσμα αυτών είναι το πετρέλαιο να κινείται με ταχύτητα περίπου πέντε χιλιόμετρα ανά ώρα.

Πριν την κατάληξη του στα διυλιστήρια, και κατά την διάρκεια της πορείας του στους αγωγούς μεταφοράς, το πετρέλαιο ενδέχεται να πρέπει να αποθηκευτεί προσωρινά κάπου. Αυτό επιτυγχάνεται με υπέργειες δεξαμενές αποθήκευσης, οι οποίες τοποθετούνται κατά μήκος της διαδρομής του υπόγειου αγωγού και είναι σχεδιασμένες έτσι, ώστε να συγκρατούν με ασφάλεια τα διάφορα πετρελαϊκά προϊόντα.

Στην συνέχεια, το ακατέργαστο ακόμα πετρέλαιο φτάνει στα διυλιστήρια, όπου μέσα από διαδικασίες επεξεργασίας μετατρέπεται σε προϊόντα όπως βενζίνη, άσφαλτος, καύσιμα πλοίων, καύσιμα αεροπορίας ή καύσιμα οικιακής θέρμανσης. Προκειμένου τα προϊόντα αυτά να αξιοποιηθούν εμπορικά, χρησιμοποιούνται και πάλι αγωγοί μεταφοράς, οι οποίοι τα οδηγούν σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης, κοντά στους καταναλωτές. Από εκεί, ανάλογα με την μελλοντική τους χρήση, μεταφέρονται τελικά είτε με αγωγούς διανομής είτε με δεξαμενόπλοια στους τελικούς αποδέκτες.

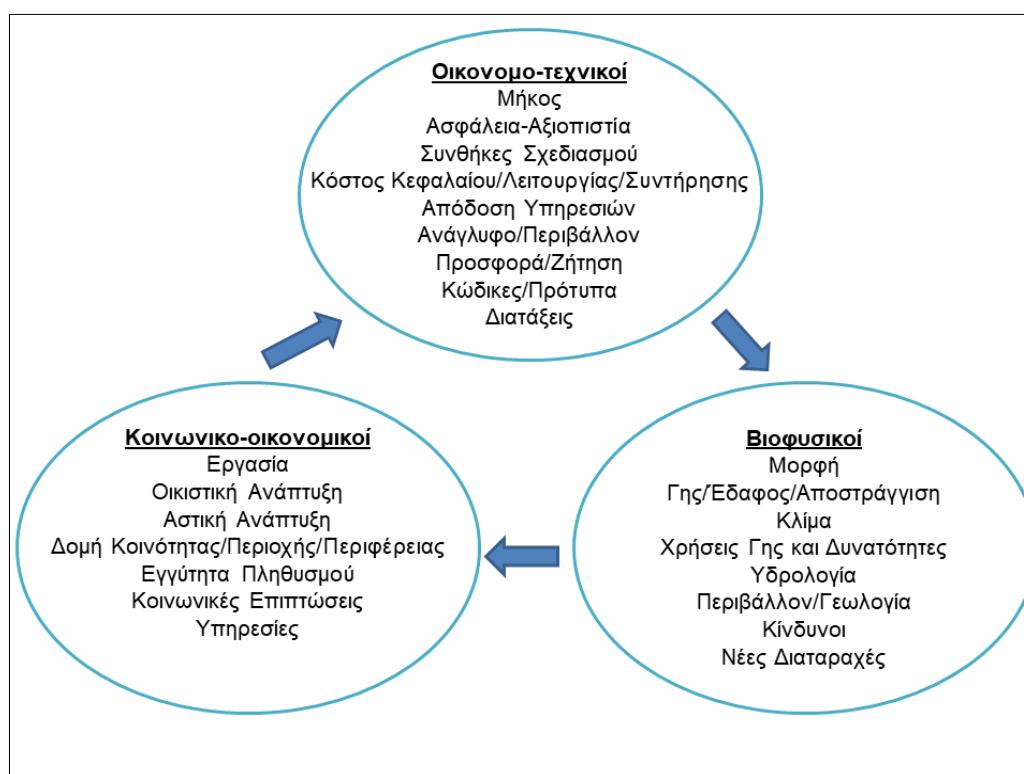
Ένας από του μεγαλύτερους αγωγούς μεταφοράς ακατέργαστου πετρελαίου στον κόσμο είναι ο Eastern Siberia-Pacific Ocean (ESPO) της Ρωσίας. Πρόκειται για ένα έργο που σαν στόχο είχε την έξοδο στις αγορές των χωρών της περιοχής Ασίας-Ειρηνικού και το οποίο ολοκληρώθηκε σε δύο φάσεις. Το πρώτο τμήμα (ESPO-1), ολοκληρώθηκε το 2009 και συνδέει την περιοχή του Τάισετ (Tayshet) με την περιοχή του Σκοβοροντίνο (Skovorodino), περνώντας από επτά ενδιάμεσα αντλιοστάσια. Επιπλέον, έχει συνολικό μήκος 2.694 χιλιόμετρα και δυνατότητα ετήσιας παροχής 30 εκατομμυρίων τόνων. Το δεύτερο τμήμα (ESPO-2) ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2012. Πρόκειται για έναν αγωγό που συνδέει τον ESPO-1 με το λιμάνι του Κοζμίνο (Koz'mino). Έχει συνολικό μήκος 2.046 χιλιόμετρα και την ίδια ετήσια παροχή με τον ESPO-1, εφόσον αποτελεί επέκταση του.



Εικόνα 2.11: Αγωγός Eastern Siberia-Pacific Ocean (Πηγή: Sealing Technology Journal)

2.3 Επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία της επιλογής της διαδρομής ενός αγωγού μεγάλου μήκους, όπως αυτή προτείνεται από την διεθνή ένωση IPLOCA (International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013). Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια τυπική προσέγγιση της χάραξης της διαδρομής ενός αγωγού, ο οποίος πρέπει να διέρχεται από γνωστά σημεία έναρξης και πέρατος, καθώς και πιθανά ενδιάμεσα σημεία τροφοδοσίας του μεταφερόμενου προϊόντος. Στο σημείο αυτό, οφείλει να διευκρινιστεί ότι μια περιγραφή που θα καλύπτει όλες τις περιπτώσεις χάραξης καθίσταται αδύνατη, καθώς καθεμία από αυτές είναι ξεχωριστή και διαμορφώνεται από διαφορετικούς τεχνικούς, περιβαλλοντικούς, κοινωνικοοικονομικούς και πολιτικούς παράγοντες.



Εικόνα 2.12: Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού (Πηγή: Rizkalla, 2008)

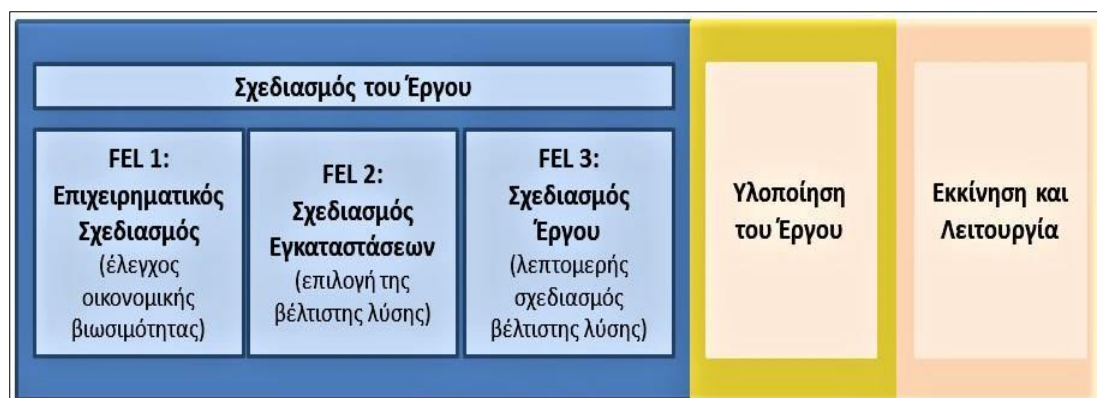
Σε κάθε περίπτωση όμως, η τελική διαδρομή θα πρέπει να είναι:

- Ασφαλής
- Περιβαλλοντικά αποδεκτή
- Οικονομική
- Πρακτική

2.3.1 Περιγραφή της διαδικασίας επιλογής της διαδρομής

Η επιλογή της διαδρομής ενός αγωγού είναι μια επαναληπτική διαδικασία που ξεκινάει με τον ορισμό ενός πλήθους εναλλακτικών διαδρόμων (corridors), δηλαδή περιοχών εκτεταμένου πλάτους, που συνδέουν τα προκαθορισμένα σημεία έναρξης και πέρατος. Από τους διαδρόμους αυτούς, των οποίων το πλάτος μπορεί να φτάνει έως και τα 20 χιλιόμετρα, επιλέγεται ένας ως περισσότερο κατάλληλος. Στην συνέχεια, το πλάτος του επιλεγμένου διαδρόμου σταδιακά περιορίζεται, μέχρι την επίτευξη της τελικής διαδρομής ROW (Right Of Way). Σε πρώτη φάση, η επιλογή των διαδρόμων γίνεται έτσι ώστε να αποφεύγονται μόνο βασικοί περιορισμοί. Αντίθετα, για την επιλογή της τελικής διαδρομής από τον επιλεγμένο διάδρομο, πέρα από παράγοντες όπως η δημόσια ασφάλεια, η ακεραιότητα του αγωγού, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή και τη λειτουργία του αγωγού, οι συνέπειες έπειτα από ενδεχόμενη διαρροή του μεταφερόμενου προϊόντος, κοινωνικά, οικονομικά, τεχνικά και κατασκευαστικά κριτήρια, λαμβάνονται υπόψη και οι διαβουλεύσεις με τα ενδιαφερόμενα μέλη και τους ιδιοκτήτες γης. Απώτερος στόχος είναι η επίτευξη μιας οικονομικά και περιβαλλοντικά εφικτής διαδρομής προς κατασκευή.

Η κατανομή των διαφόρων ενεργειών, που πραγματοποιούνται για την επιλογή της τελικής διαδρομής του αγωγού, στα διάφορα στάδια υλοποίησης του έργου παρουσιάζεται επιγραμματικά στον Πίνακα 2.1. Διευκρινίζεται ότι λεπτομερέστερη περιγραφή των εν λόγω ενεργειών γίνεται στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 2.13: Τα κύρια στάδια ενός έργου κατασκευής αγωγού (Πηγή: International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013)

Πίνακας 2.1: Στάδια επιλογής και ευθυγράμμισης της διαδρομής ενός αγωγού (Πηγή: International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013)

Στάδιο	Σχεδιασμός του Έργου			Υλοποίηση Έργου	Εκκίνηση και Λειτουργία
	FEL 1 Επιχειρηματικός Σχεδιασμός	FEL 2 Σχεδιασμός Εγκαταστάσεων	FEL 3 Σχεδιασμός Έργου		
Ακρίβεια Εκτιμώμενου Κόστους	Τάξη Μεγέθους	+/- 30%	+/- 15%	+/- 5%	Ολοκλήρωση
Διαδικασία	Αξιολόγηση	Βιωσιμότητα	Επιλογή/ Καθορισμός	Εγκρίσεις/ Εκτέλεση/ Κατασκευή	Λειτουργία
Δραστηριότητα	Εξερεύνηση εναλλακτικών επιλογών διαδρόμου στο γραφείο	Επιλογή διαδρόμου και Αναγνώριση εναλλακτικών επιλογών ευθυγράμμισης	Επιλογή διαδρομής, Επιτόπιες έρευνες και Διαβουλεύσεις	Λεπτομερής ευθυγράμμιση, Αδειοδότηση τελικής διαδρομής, Λήξη διαπραγματεύσεων και Απόκτηση γης	Συντήρηση
Πλάτος Διαδρόμου	10-20 χλμ. (πλάτος εναλλακτικών διαδρόμων)	500 μ.-1 χλμ. (πλάτος επιλεγμένου διαδρόμου)	100 μ.-200 μ. (πλάτος επιλεγμένου διαδρόμου)	20 μ.-36 μ. (πλάτος διαδρόμου κατασκευής)	8 μ. (πλάτος μόνιμου διαδρόμου για συνεχόμενη εποπτεία και συντήρηση)
Εικόνες	Χάρτες κλίμακας 1:25.000 ή 1:50.000, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του εδάφους	Χάρτες κλίμακας 1:10.000 ή 1:25.000 και Αεροφωτογραφίες ακρίβειας 25 χιλιοστών (ή καλύτερης) σε υπέρθεση με συν/νες κλίμακας 1:10.000	Χάρτες κλίμακας 1:25.000, Προετοιμασία χαρτιών ευθυγράμμισης από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:2.500, Διευκρίνιση διασταυρώσεων ειδικού ενδιαφέροντος σε κλίμακα 1:250 ή 1:25	Σχέδια για τις συμφωνίες με τους ιδιοκτήτες γης, σε κλίμακα 1:2.500 (ή μικρότερη)	Παράδοση σχεδίων κατασκευής υψηλής ακρίβειας σε όλα τα εμπλεκόμενα μέλη
Παραγόμενο Αποτέλεσμα	Προκαταρκτικά σχέδια διαδρομής και χάρτες διαδρομής κλίμακας 1:100.000	Χάρτες χάραξης, κλίμακας 1:50.000	Λεπτομερής χάραξη, με χάρτες κλίμακας 1:5.000-1:10.000, Απόκτηση γης κ' απαραίτητων σχεδίων, Τελικά σχέδια αποτύπωσης της περιοχής, Χαρτιά ευθυγράμμισης	Τελικά σχέδια ευθυγράμμισης, Σχέδια για τους ιδιοκτήτες γης και άδεια/έγκριση/αποδοχή, Αγορά γης, Λεπτομερή σχέδια διασταυρώσεων	Σχέδια κατασκευής

2.3.2 Δραστηριότητες επιλογής διαδρομής εντός των φάσεων υλοποίησης του έργου

- Φάση πρώτη: εναλλακτικές επιλογές «διαδρόμου» [FEL 1, Appraise]

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τις εργασίες γραφείου που είναι απαραίτητες για τον καθορισμό των εναλλακτικών επιλογών διαδρόμων. Ο καθορισμός γίνεται με κριτήριο την αποφυγή βασικών περιορισμών της περιοχής ενδιαφέροντος. Πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη ή όχι των περιορισμών αυτών πρέπει να αναζητούνται και να συλλέγονται από διαθέσιμους τοπογραφικούς και γεωλογικούς χάρτες, αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες, καθώς και δημόσια έγγραφα, όπως χωροταξικά σχέδια. Όλα τα παραπάνω συνθέτουν ένα σύνολο δεδομένων, το οποίο πρέπει σε καθένα από τα επόμενα στάδια να εμπλουτίζεται. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί, ότι από τις πηγές δεδομένων που αναφέρθηκαν, εκτός από την πληροφόρηση σχετικά με τους περιορισμούς, προκύπτουν και βασικά στοιχεία της μηχανικής του αγωγού, όπως το μήκος και το προφίλ του, τα οποία είναι χρήσιμα για την κοστολόγηση και τον προγραμματισμό των εργασιών.

- Φάση δεύτερη: Επιλογή «διαδρόμου» [FEL 2, Select]

Στη φάση αυτή επιλέγεται ο πλέον κατάλληλος εκ των εναλλακτικών διαδρόμων, ύστερα από την εκπόνηση μελέτης βασικών ζητημάτων (key issues study). Η μελέτη αυτή στην ουσία είναι μια οπτική αξιολόγηση της περιοχής ενδιαφέροντος, κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων δημόσιων εγγράφων και πληροφοριών. Οι πληροφορίες και τα δεδομένα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερης ακρίβειας από την προηγούμενη φάση. Πιο συγκεκριμένα, στα δεδομένα της πρώτης φάσης θα πρέπει να προστεθούν και αυτά σχετικά με τις μετεωρολογικές συνθήκες, τους γεωκινδύνους, τις ανθρωπίνες δραστηριότητες και τις χρήσεις γης, που μπορεί να αποτελέσουν εμπόδιο στην κατασκευή. Αφού επιλεγθεί ο τελικός διάδρομος, ξεκινά και η διαδικασία καθορισμού των εναλλακτικών επιλογών χάραξης της τελικής διαδρομής εντός αυτού.

Αρχικά, ο διάδρομος επιλέγεται, ώστε να παρακάμπτει, όπου αυτό είναι εφικτό, αστικές περιοχές, κύριους οδικούς άξονες, διασταυρώσεις με σιδηροδρομικές γραμμές, ποτάμια και λίμνες, καθώς και περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Το πλάτος του εξαρτάται από τη φύση του εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος, τις υπάρχουσες και μελλοντικές ροές πληθυσμού και το βαθμό πολυπλοκότητας, όπως αυτός διαμορφώνεται από τις περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές και κατασκευαστικές συνιστώσες της.

Επιπλέον, για τον καθορισμό των εναλλακτικών διαδρομών εντός του επιλεγμένου διαδρόμου, πρέπει αρχικά το σημείο έναρξης του αγωγού και τυχόν ενδιάμεσα σταθερά σημεία να καταγράφονται σε κατάλληλης κλίμακας χάρτες της περιοχής ενδιαφέροντος. Έπειτα, ο διάδρομος θα πρέπει να εξερευνηθεί κατά μήκος της διαδρομής που ορίζουν τα προαναφερθέντα σημεία, έτσι ώστε να μπορέσουν να αποτυπωθούν και να εκτιμηθούν βασικά ζητήματα και περιορισμοί, που δύναται να επηρεάσουν την επιλογή της τελικής διαδρομής. Είναι προφανές ότι βασικοί περιορισμοί και εμπόδια θα πρέπει να αποφεύγονται, όσο το δυνατόν περισσότερο.

Για την καλύτερη καταγραφή και επεξεργασία του μεγάλου όγκου των δεδομένων που απαιτούνται και συλλέγονται για την εκτέλεση των διαδικασιών που αναφέρθηκαν παραπάνω, συνιστάται η δημιουργία ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (Σ.Γ.Π.).

Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και σχετικούς με την ασφάλεια παράγοντες, που ενδέχεται να αποδειχτούν σημαντικοί κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία του συστήματος του αγωγού, θα πρέπει να επιλεχθεί μια εκ των εναλλακτικών διαδρομών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσα από μια μελέτη σύγκρισης στην αμέσως επόμενη φάση.

- Φάση τρίτη: Διερεύνηση διαδρομής και διαβούλευση [FEL 3, define, consulting]

Η τρίτη φάση περιλαμβάνει την επιλογή της τελικής προτιμώμενης διαδρομής και τις διαβουλεύσεις με τα ενδιαφερόμενα μέρη.

Αρχικά, για την επιλογή της τελικής διαδρομής κρίνεται απαραίτητη η συγκέντρωση ακόμα περισσότερο λεπτομερών πληροφοριών για την επισήμανση και την χαρτογράφηση των περιορισμών εντός του επιλεγμένου διαδρόμου. Όλοι οι περιορισμοί και τα προβλήματα προγραμματισμού που ενδέχεται να επηρεάσουν τον αγωγό πρέπει κατά την παρούσα φάση να καταγράφονται. Έπειτα, στα πλαίσια της αξιολόγησης των εναλλακτικών διαδρομών του αγωγού, που έχουν προκύψει, προτείνεται η εφαρμογή μιας ποσοτικής εκτίμησης κινδύνου QRA (Quantitative Risk Assessment). Σύμφωνα με την εκτίμηση αυτή, για κάθε διαδρομή, υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης επικίνδυνων συμβάντων και οι αντίστοιχες συνέπειες τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η σύγκριση ανάμεσα στις εναλλακτικές επιλογές διαδρομής και η επιλογή της καταλληλότερης.

Ακολούθως, απαιτείται η διεξαγωγή μιας λεπτομερούς εξέτασης της διαδρομής που επιλέχθηκε, σε επαρκές βάθος και πλάτος εκατέρωθεν αυτής, με σκοπό την επιβεβαίωση της καταλληλότητας της. Πιο συγκριμένα,

δεδομένης της απόκτησης αδειών από τους αντίστοιχους ιδιοκτήτες ή παρουσία αυτών, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν τοπογραφικές, γεωτεχνικές, περιβαλλοντικές και σχετικές με την αντοχή του εδάφους έρευνες πεδίου. Περισσότερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στις περιοχές που ήταν δύσκολο να προσδιοριστούν μέσα από τους χάρτες. Στις έρευνες αυτές θα πρέπει να είναι παρόντες μηχανολόγοι, γεωτεχνικοί μηχανικοί, περιβαλλοντολόγοι, αρχαιολόγοι και ανθρωπολόγοι. Επιπλέον, στην παρούσα φάση, απαραίτητες κρίνονται και οι έρευνες πεδίου σχετικά με την χωροθέτηση των υπέργειων και υπόγειων συμπληρωματικών εγκαταστάσεων, όπως η οδική υποδομή πρόσβασης στον αγωγό και οι εγκαταστάσεις διαμονής και κατασκευαστικής προετοιμασίας. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις παραπάνω έρευνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αργότερα, κατά τον σχεδιασμό της κατασκευής του αγωγού.

Πριν όμως από την έναρξη κατασκευής του αγωγού, διεξάγονται οι διαβουλεύσεις ανάμεσα στα ενδιαφερόμενα μέρη. Οι διαβουλεύσεις θα πρέπει να διεξάγονται όσο το δυνατόν νωρίτερα, κατά την διάρκεια οριστικοποίησης της διαδρομής. Στα ενδιαφερόμενα μέρη συμπεριλαμβάνονται όλες οι σχεδιαστικές και θεσμικές αρχές, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών αρχών σχεδιασμού και τις υπηρεσίες ασφαλείας της Κυβέρνησης, καθώς και οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη οργάνωση ή πρόσωπα, όπως οι ιδιοκτήτες γης της περιοχής από την οποία πρόκειται να περάσει ο αγωγός. Πιο συγκεκριμένα, οι αρμόδιες αρχές και κάθε ενδιαφερόμενος τρίτος φορέας θα πρέπει να έρθουν σε επαφή, έτσι ώστε να προκύψουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη καταπατήσεων κατά μήκος της διαδρομής, καθώς και υπόγειων εμποδίων ή άλλων υπάρχοντων αγωγών. Άλλα θέματα διαβούλευσης αποτελούν επίσης η χρήση των οδών πρόσβασης στο έργο κατά την διάρκεια κατασκευής του, αλλά και για την συντήρηση του στο μέλλον, οι δραστηριότητες από τρίτους κατά μήκος του αγωγού, καθώς και ζητήματα σχετικά με την ασφάλεια.

Συγκεντρώνοντας όλα τα αρχεία, τους χάρτες και τα αποτελέσματα από τις έρευνες πεδίου, που πραγματοποιήθηκαν, συντίθεται ένα πλήρες σύνολο δεδομένων σχετικά με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του αγωγού. Η επιλεγμένη διαδρομή πρέπει να καταγραφεί σε κατάλληλης κλίμακας φύλλα ευθυγράμμισης, στα οποία να επισημαίνονται και οι συντεταγμένες όλων των σημαντικών σημείων, όπως τα σημεία διασταυρώσεων ή τα σημεία έναρξης και τέλους λυγισμού του αγωγού. Στα σχέδια αυτά θα πρέπει να αποτυπώνονται και οι ισοϋψείς καμπύλες, με ισοδιάσταση που να ευνοεί τους σκοπούς του σχεδιασμού. Τέλος, συνιστάται και η δημιουργία της μηκοτομής της διαδρομής του αγωγού.

- Τελική φάση: Σχεδιασμός και έγκριση της τελικής διαδρομής του αγωγού [Project Execution phase, detailed design]

Στη φάση αυτή οριστικοποιείται η έγκριση του τοπικού σχεδιαστικού φορέα και οι συμφωνίες μεταξύ ιδιοκτητών και ενοικιαστών της γης. Επιπλέον, πραγματοποιείται κάποια διαδικασία αναγνώρισης της επιλεγμένης διαδρομής στο πεδίο, συνήθως με την επισήμανση σημείων κατά μήκος της. Οι θέσεις τοποθέτησης των βαλβίδων του αγωγού, οι διασταυρώσεις με ποταμούς και οι τοποθεσίες πιθανής εκδήλωσης γεωκινδύνων διερευνώνται διεξοδικά και ετοιμάζονται σε επίπεδο κατασκευής. Έπειτα από όλα αυτά, η φυσική κατασκευή και λειτουργία του αγωγού μπορεί πλέον να ξεκινήσει, βάσει των κριτηρίων κατασκευής.

2.3.3 Βασικές αρχές και παράγοντες επιρροής της χάραξης του αγωγού

1. Ασφάλεια του κοινού και του εργαζόμενου προσωπικού του έργου:
Η διαδρομή πρέπει να παρέχει ένα ασφαλές περιβάλλον τόσο κατά την διάρκεια της κατασκευής όσο και κατά την διάρκεια της λειτουργίας του αγωγού. Ιδανικά, θα πρέπει να χαράσσεται μακριά από κατοικημένες περιοχές.
2. Οικονομία:
Η διαδρομή θα πρέπει να ανταποκρίνεται στους οικονομικούς στόχους του έργου, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια και η προστασία του περιβάλλοντος.
3. Παράγοντες που σχετίζονται με την ιδιοκτησία της γης:
Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι για παράδειγμα ο αριθμός των ιδιοκτητών γης ή η ευκολία λήψης των απαιτούμενων συγκαταθέσεων.
4. Το πλάτος του διαδρόμου δικαιώματος διέλευσης
5. Το μεταφερόμενο προϊόν και οι συνθήκες λειτουργίας του αγωγού:
Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ενδεχόμενα όπως αυτό της διαρροής ενός υγρού υψηλής πίεσης.
6. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:
Η διαδρομή που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει τις ελάχιστες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να καταλαμβάνει τη μικρότερη δυνατή έκταση.

7. Επιφανειακές και υπόγειες εδαφικές συνθήκες:
Συμπεριλαμβάνονται οι γεωτεχνικές, υδρολογικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Ένα παράδειγμα είναι η ευστάθεια του εδάφους και οι ενέργειες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστάθεια, όπως οι εκσκαφές.
8. Περιοχές πολιτιστικής κληρονομιάς
9. Σχέδια υπάρχουσας και μελλοντικής χρήσης γης:
Αυτά μπορούν να αποκτηθούν έπειτα από αναζήτηση σε δημόσια αρχεία και διαβουλεύσεις με χωροταξικούς οργανισμούς, οι οποίοι είναι σε θέση να προσδιορίσουν τις δραστηριότητες τρίτων εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, τη γεωργική πρακτική, τις υπάρχουσες υποδομές και υπηρεσίες, καθώς και τις μελλοντικές αναπτύξεις.
10. Υπάρχουσες και προγραμματισμένες υποδομές μεταφοράς, καθώς και υπόγειες ή υπέργειες υπηρεσίες κοινής ωφέλειας
11. Μόνιμη πρόσβαση:
Ο αγωγός θα πρέπει ιδανικά να είναι προσβάσιμος για επιθεώρηση και συντήρηση καθόλη την διάρκεια της ζωής του.
12. Ασφάλεια:
Το δίκτυο του αγωγού πρέπει να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, ιδιαίτερα αυτές της παραβίασης και της δολιοφθοράς.
13. Χρησιμοποίηση των υπαρχόντων γραμμικών παροχών, δρόμων ή ηλεκτρικών καλωδίων, όπου αυτό είναι εφικτό.

Καθώς η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η αντιμετώπιση γεωκινδύνων είναι δυο πολύ σημαντικοί παράγοντες, στους οποίους δόθηκε έμφαση κατά την πραγματοποίηση των εφαρμογών της παρούσας εργασίας, κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση τους. Για το λόγο αυτό, ακολουθεί μια λεπτομερέστερη περιγραφή των δύο αυτών ζητημάτων.

A) Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Κατά την επιλογή της διαδρομής και της θέσης των ενδιάμεσων σταθμών, θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην αναγνώριση και την ελαχιστοποίηση των πιθανών επιπτώσεων στα ακόλουθα:

- Περιοχές Ramsar (υγρότοποι διεθνούς σημασίας, όπως ορίζονται από την σύμβαση Ramsar)

- Τοποθεσίες ιδιαίτερου επιστημονικού ενδιαφέροντος SSSIs (Sites of Special Scientific Interest)
- Εθνικά πάρκα
- Φυσικά αποθέματα
- Χλωρίδα και πανίδα
- Δάση
- Χώροι πολιτιστικής κληρονομιάς και ακτές
- Ειδικές ζώνες συντήρησης και προστασίας
- Περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους AONBs (Areas of Outstanding Natural Beauty)
- Αρχαία μνημεία και αρχαιολογικοί χώροι
- Ορυκτοί πόροι
- Περιοχές προστασίας των υπόγειων υδάτων

Αντίθετα, θα πρέπει να επιτευχθούν όσο είναι δυνατόν τα ακόλουθα:

- Η χωροθέτηση των υπέργειων συμπληρωματικών εγκαταστάσεων (βανοστάσια, σταθμοί μέτρησης, σταθμοί εσωτερικού καθαρισμού των τοιχωμάτων) να είναι τέτοια, ώστε να μην δημιουργεί ηχορύπανση εις βάρος του τοπικού πληθυσμού.
- Η αποφυγή της μόλυνσης των υπέργειων και επιφανειακών υδάτων.
- Η μείωση του όγκου κυκλοφορίας.
- Η ελαχιστοποίηση των δέντρων που θα πρέπει να αφαιρεθούν.

Ωστόσο, όσο και να τηρηθούν οι παραπάνω κανόνες, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, μεγάλες ή μικρές, είναι αναπόφευκτες. Για το λόγο αυτό, κατά τα πρώιμα ήδη στάδια, δηλαδή πριν την επιλογή της τελικής διαδρομής, οι υπεύθυνοι του έργου θα πρέπει να έρθουν σε επαφή με τις αρμόδιες τοπικές αρχές, προκειμένου να καθοριστούν οι απαιτήσεις και η έκταση της απαιτούμενης Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε) από την κατασκευή του αγωγού και των συμπληρωματικών εγκαταστάσεων. Τα αποτελέσματα της Μ.Π.Ε θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη έπειτα, κατά το στάδιο επιλογής της τελικής διαδρομής.

B) Γεωκίνδυνοι

Ο τύπος, η φύση, το μέγεθος και ο ρυθμός των γεωλογικών διεργασιών και κινδύνων παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή της τελικής διαδρομής του αγωγού. Ως εκ τούτου, θα πρέπει από τα πρώτα ήδη στάδια του έργου, να διεξάγεται η διαδικασία της αξιολόγησης των εδαφικών συνθηκών, καθώς και της αναγνώρισης και της εκτίμησης των γεωκινδύνων, σε όλο το εύρος του επιλεγμένου διαδρόμου. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και η τελική διαδρομή να αποφεύγει, όσο αυτό είναι εφικτό, τους γεωκινδύνους και τις προβληματικές περιοχές, που μπορεί να

προκαλέσουν φθορές στον αγωγό. Αντίθετα, θα πρέπει να καταβάλλεται προσπάθεια, έτσι ώστε ο αγωγός να διέρχεται από εδάφη με ήπιες κλίσεις, που είναι απαλλαγμένα από κατολισθήσεις, απότομα βράχια, διασταυρώσεις με ποτάμια και βαθιές κοιλότητες.

Η διαδικασία αξιολόγησης του εδάφους κατά μήκος του επιλεγμένου διαδρόμου του αγωγού μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας πληθώρας τεχνικών χαμηλού κόστους. Στις τεχνικές αυτές συμπεριλαμβάνεται η ερμηνεία δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών, η αποτύπωση της επιφάνειας του εδάφους, καθώς και πολλές άλλες τεχνικές τηλεπισκόπησης. Για να μπορέσει να προκύψει ολοκληρωμένη εικόνα των εδαφικών συνθηκών, τα αποτελέσματα των παραπάνω τεχνικών, καθώς και άλλα δεδομένα, όπως στοιχεία για παλαιότερα σεισμικά γεγονότα ή γεωλογικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να εισάγονται σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών. Η υπέρθεση αυτών εντός του συστήματος έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία των επιθυμητών μοντέλων εδάφους, τα οποία θα διευκολύνουν την επιλογή της τελικής διαδρομής.

Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αποφυγή των γεωκινδύνων δεν είναι πάντα εφικτή. Στις περιπτώσεις αυτές, υπάρχουν συγκεκριμένες προτάσεις μετριασμού του εκάστοτε γεωκινδύνου, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.2: Τύποι Γεωκινδύνων (Πηγή: *International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013*)

Γεωκίνδυνοι
Φυσικοί
Κατολισθήσεις Ροή συντριμμιών Σεισμική Δραστηριότητα-Σεισμοί και Ρήξη Ρηγμάτων Σεισμική Δραστηριότητα-Εκρήξεις Ηφαιστειών Πτώσεις βράχων και Χιονοστιβάδες Υπόγεια κενά και κοιλότητες Διάβρωση ποταμών Μολυσμένα εδαφικά υλικά Μαλακά εδαφικά υλικά Κυκλώνες Τσουνάμι
Ανθρωπογενείς
Εξορύξεις Χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων Χημικά και Μολύνσεις

Πίνακας 2.3: Γεωκίνδυνοι και μέθοδοι μετριάσμού τους (Πηγή: International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013)

Γεωκίνδυνος	Περιγραφή	Πρόταση
Κατολισθήσεις	Μετατόπιση εδάφους ή αποκόλληση μάζας βράχου, εδάφους ή συντριμμιών	<ul style="list-style-type: none"> Αποφυγή, αν είναι εφικτό Χάραξη παράλληλα στον άξονα της κατολίσθησης.
Διάβρωση εδάφους	Μετακίνηση εδάφους λόγω νερού, αέρα ή πάγου	<ul style="list-style-type: none"> Αποφυγή περιοχών ενεργής διάβρωσης, εάν είναι εφικτό Χάραξη 90° κάθετα στην περιοχή διάβρωσης
Κινητοί αμμόλοφοι	Εύθραυστο περιβάλλον της ερήμου	<ul style="list-style-type: none"> Αποφυγή, αν είναι εφικτό Ελαχιστοποίηση του μήκους διασταύρωσης
Σεισμοί και Ρήγματα	Άνοιγμα στη συνέχεια ενός βράχου που προκαλείται από μετακίνηση ή αποκόλληση του φλοιού της Γής.	<ul style="list-style-type: none"> Αποφυγή, αν είναι εφικτό Ειδικές εκτιμήσεις σχεδιασμού (ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία) Ειδικές τεχνικές επιχωμάτωσης, που αποτρέπουν τη ζημιά. Ειδικός σχεδιασμός τάφρου
Ηφαίστεια	Έκρηξη λάβας, βράχων και τέφρας	<ul style="list-style-type: none"> Αποφυγή
Μαλακά εδαφικά υλικά	Εδάφη που ενδέχεται να μην μπορούν να υποστηρίξουν τον αγωγό.	<ul style="list-style-type: none"> Υποστηρικτικά αγκύρια, βιδωμένα σε σκληρό έδαφος, κάτω από το μαλακό Εφαρμογή στρωμάτων κάτω από τον αγωγό για μείωση της πίεσης έδρασης Αφαίρεση αδύναμου εδάφους και αντικατάσταση με μηχανικό επίχωμα
Υπόγειες κοιλότητες	Περιοχές εξόρυξης άνθρακα, σπήλαια, περιοχές καθίζησης	<ul style="list-style-type: none"> Αποφυγή, αν είναι εφικτό Τοποθέτηση σκυροδέματος στα υπόγεια ορυχεία Σχεδιασμός αγωγού με μεγαλύτερο πάχος
Μετακίνηση ποταμού	Διάβρωση των όχθων και της κοίτης των ποταμών	Επαρκής ταφή του αγωγού κάτω από τις όχθες ή την κοίτη
Μολυσμένα εδάφη	Μολυσμένα εδάφη	Η αποφυγή εξαρτάται από τον τύπο της μόλυνσης και το αν απειλεί την ασφάλεια του τοπικού πληθυσμού.

2.3.4 Κριτήρια επιλογής της διαδρομής του αγωγού

Η επιλογή της τελικής διαδρομής του αγωγού αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα προς επίλυση. Τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται είναι πολλά και ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς. Επιπλέον, κάθε χώρα έχει τις δικές της κανονιστικές και αδειοδοτικές απαιτήσεις, τους δικούς της τοπικούς περιορισμούς και τα δικά της περιβαλλοντικά ζητήματα. Για το λόγο αυτό, η παρουσίαση μιας λίστας κριτηρίων που να καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις έργων κατασκευής αγωγού είναι αδύνατη. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένα πιθανά κριτήρια, κοινωνικής, περιβαλλοντικής και τεχνικής φύσεως.

Πίνακας 2.4: Βασικά κριτήρια επιλογής διαδρομής (Πηγή: International Pipe Line & Offshore Contractors Association, 2013)

Κοινωνικά Κριτήρια	Περιβαλλοντικά Κριτήρια	Τεχνικά Κριτήρια/Απαιτήσεις του έργου
Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στους ανθρώπους	Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στη χλωρίδα, την πανίδα και το φυσικό περιβάλλον	Ελαχιστοποίηση του μήκους του αγωγού. Μικρότερες διαδρομές μπορεί να προσφέρουν σημαντικά οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και λογιστικά οφέλη.
Ελαχιστοποίηση των κοινωνικών διαταραχών και των συγκρούσεων σχετικά με τις χρήσεις γης	Αποφυγή επιπτώσεων στους τομείς της αρχαιολογίας και της πολιτιστικής κληρονομιάς	Ελαχιστοποίηση των κύριων εδαφικών περιορισμών, οι οποίοι τείνουν να αυξάνουν τη δυσκολία και το κόστος κατασκευής και επηρεάζουν την κλίμακα των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
Ελαχιστοποίηση των διαταραχών σε εγκαταστάσεις πλησίον του έργου	Ελαχιστοποίηση των αισθητικών επιπτώσεων	Ελαχιστοποίηση του κόστους και της δυσκολίας της κατασκευής
Ελαχιστοποίηση της εγγύτητας σε κατοικημένες περιοχές και δημόσια κέντρα	Αποφυγή προστατευόμενων περιοχών και περιοχών υψηλής οικολογικής αξίας	Αποφυγή περιοχών που καθιστούν την κατασκευή δύσκολη-απότομες πλαγιές, ασταθή επιφανειακά υλικά, υψηλός υδροφόρος ορίζοντας
Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων στο σχεδιασμό/ χρήσεις γης	Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων σε ευαίσθητους και ασταθείς τύπους γης	Ελαχιστοποίηση περιοχών πιθανής ενεργοποίησης γεωκινδύνων

Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων σε γεωργικές και αστικές περιοχές, καθώς και περιοχές εξόρυξης ή άλλων υποδομών	Ελαχιστοποίηση διαταραχών σε παράκτιες περιοχές	Αποφυγή βραχωδών και ασταθών εδαφών προκειμένου να αποφευχθούν μεταγενέστερη εδαφική διάβρωση από βροχή και αέρα.
Συνυπολογισμός της δημόσιας γνώμης και ασφάλειας	Αποφυγή περιοχών σημαντικής διατήρησης	Αποφυγή σημαντικών φυσικών εμποδίων, όπως προεξοχές γρανίτη και πολύ απότομα πρηνή, (διαμήκη και εγκάρσια
Αποφυγή πιθανής διαμάχης για κυριότητα επί της γης	Ελαχιστοποίηση της αφαίρεσης φυτών	Ελαχιστοποίηση των τοπογραφικών αλλαγών
Αποφυγή της διασταύρωσης με ιδιοκτησίες	Ελαχιστοποίηση του συνολικού αποτυπώματος του έργου στο περιβάλλον	Αποφυγή περιοχών εξόρυξης άνθρακα και υπόγειων χαρακτηριστικών όπως σπήλαια
Αποφυγή της διασταύρωσης με αγροτική ιδιοκτησία	Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο τοπίο, αποφεύγοντας διασταυρώσεις με κορυφογραμμές	Ελαχιστοποίηση εκσκαφών
Αποφυγή δασικών περιοχών	Αποφυγή πάρκων, φυσικών καταφυγίων και άλλων περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών	Ελαχιστοποίηση των διασταυρώσεων με δρόμους, σιδηροδρομικές γραμμές, ποτάμια, αγωγούς, υπόγεια καλώδια ενέργειας
	Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων στην τοπική βλάστηση	Ελαχιστοποίηση περιοχών ευαίσθητων προς ρευστοποίηση
	Αποφυγή περιοχών RAMSAR	Ελαχιστοποίηση περιοχών ευαίσθητων σε κατολισθήσεις
	Αποφυγή προστατευόμενων περιοχών	Ελαχιστοποίηση των διασταυρώσεων με περιοχές πλημμύρας
	Αποφυγή μολυσμένης γης	Αποφυγή της χάραξης παράλληλα σε γραμμές υψηλής τάσης

Είναι προφανές ότι η πλήρης ικανοποίηση όλων των κριτηρίων σε όλους τους τομείς είναι αδύνατη. Για το λόγο αυτό, η εκάστοτε ομάδα μηχανικών, ανάλογα και με τις τοπικές κανονιστικές ρυθμίσεις, θα πρέπει να αποδίδει τα αντίστοιχα βάρη, δηλαδή κάποια ποσοστά σημαντικότητας, στα κριτήρια σχεδιασμού, ώστε να συγκεκριμενοποιεί και να απλοποιεί το πρόβλημα. Η επιλογή διαδρομής που θα προκύψει από την κατανομή βάρους στα διάφορα κριτήρια θα πρέπει να είναι αποδεκτή από όλα τα εμπλεκόμενα μέλη.

3. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Με τον όρο πρανή νοούνται οι κεκλιμένοι, φυσικοί ή τεχνητοί, σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Ο σχηματισμός των φυσικών πρανών γίνεται σταδιακά, κατά την διάρκεια μεγάλων χρονικών διαστημάτων, και προκύπτει έπειτα από φυσικές διεργασίες, όπως αυτή της διάβρωσης. Από την άλλη, τα τεχνητά πρανή κατασκευάζονται από τον άνθρωπο, με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά, ανάλογα με την χρήση τους. Οι πιο συνηθισμένες μορφές τεχνητών πρανών είναι τα πρανή των εκσκαφών, τα ορύγματα, τα επιχώματα και τα χωμάτινα φράγματα.

Είτε φυσικά είτε τεχνητά, τα πρανή μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να καταστούν ασταθή έναντι στατικών ή σεισμικών φορτίων και να εξελιχθούν σε κατολισθήσεις. Οι συνέπειες από την ύπαρξη κατολισθητικών φαινομένων μπορούν να χαρακτηριστούν από ασήμαντες έως πολύ καταστροφικές, ανάλογα με την απώλεια ή μη ανθρώπινων ζώων και περιουσιών, καθώς και τη φθορά τεχνικών έργων.



Εικόνα 3.1: Κατολίσηση σε αυτοκινητόδρομο (Πηγή: civildigital.com)

Η πρόληψη έναντι των καταστροφικών συνεπειών των κατολισθητικών φαινομένων, κατά την φάση σχεδιασμού ενός τεχνικού έργου, αλλά και η δυνατότητα εφαρμογής μέτρων αποκατάστασης, σε περίπτωση που αυτά συμβούν, είναι άμεσα συνδεδεμένες με την γνώση της πιθανότητας και των συνθηκών, υπό τις οποίες αυτά τα φαινόμενα μπορούν να εκδηλωθούν. Όπως είναι αναμενόμενο, η ανάγκη απόκτησης της παραπάνω γνώσης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών.

3.2 Ευστάθεια πρανών υπό στατικές συνθήκες

Βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην ευστάθεια ενός πρανούς υπό στατικές συνθήκες είναι η βαρύτητα καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού από το οποίο αποτελείται, δηλαδή η συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής, οι οποίες καθορίζουν και τη διατμητική αντοχή του. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε πρανές οι δυνάμεις βαρύτητας σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την πιθανή παρουσία νερού μέσα στο έδαφος δημιουργούν διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του, οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα του, έτσι ώστε να εξομαλύνουν το έδαφος. Στις τάσεις αυτές αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους. Αν οι διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται υπερβούν την αντοχή του εδάφους, τότε το πρανές αστοχεί ή αλλιώς κατολισθαίνει.

3.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια

Οι παράγοντες που μπορεί να διαταράξουν την ισορροπία και κατ' επέκταση και την ευστάθεια ενός πρανούς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους φυσικούς και τους τεχνητούς, οι οποίοι προκύπτουν από ανθρώπινες δραστηριότητες. Επιπλέον, οι παράγοντες αυτοί μπορεί είτε να προϋπάρχουν ως αίτια, δημιουργώντας μια προδιάθεση κατολίσθησης του πρανούς, είτε να αποτελέσουν την αφορμή για την άμεση πρόκληση μιας κατολίσθησης, γεγονός που τους κατατάσσει και σε πρωτογενείς και δευτερογενείς, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, στους πρωτογενείς παράγοντες, οι οποίοι αφορούν τη γεωτεκτονική και το κλίμα της περιοχής έδρασης του πρανούς, συμπεριλαμβάνονται οι γεωλογικές συνθήκες, η μορφολογία, η βαρύτητα, η θερμοκρασία και η φυτοκάλυψη. Από την άλλη, στους δευτερογενείς παράγοντες, οι οποίοι αφορούν τις τοπικές και παροδικές συνθήκες, συμπεριλαμβάνεται η αλλαγή της στάθμης των υπόγειων υδάτων, οι βροχοπτώσεις, οι χιονοπτώσεις, ο άνεμος και οι ανθρώπινες δραστηριότητες.

Επιπλέον, μια αστοχία σε ένα πρανές μπορεί να επέλθει είτε γιατί κάποιος παράγοντας αποτέλεσε το αίτιο αύξησης των διατμητικών τάσεων που τείνουν να μετακινήσουν την μάζα του, είτε γιατί αποτέλεσε το αίτιο μείωσης της

διατμητικής αντοχής του υλικού από το οποίο αποτελείται (Varnes, 1978). Κατά αυτό τον τρόπο, οι παράγοντες που επιδρούν στην ευστάθεια ενός πρानούς μπορούν να διαχωριστούν και σε εξωγενείς ή ενδογενείς, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Μηχανισμοί ενεργοποίησης κατολισθήσεων (Πηγή: Varnes, 1978)

Αιτία	Παράγοντας	Φαινόμενο	
Αύξηση Φόρτισης (διατμητικών τάσεων)	Αφαίρεση Πλευρικής Στήριξης	Διάβρωση από ποτάμια, πάγο, κύματα ή παλιρροιακά ρεύματα	
		Παλαιότερη κατολίθση ή καθίζηση	
		Εκσκαφή ή αφαίρεση τοίχων αντιστήριξης	
	Προσαύξηση		Βάρος από βροχή, χαλάζι, χιόνι ή νερό πηγών
			Φυσική Απόθεση
			Φυτοκάλυψη
			Βάρος κτιρίων ή άλλων κατασκευών
			Σωροί σκουπιδιών
			Αποθέσεις μεταλλευμάτων ή βράχων
	Παροδική Φόρτιση		Βάρος νερού από διαρροές
			Σεισμικά κύματα, δονήσεις, ηφαιστεια
	Αφαίρεση Υποκείμενης Στήριξης		Υπόγεια διάβρωση
Εξορύξεις και συναφείς ενέργειες			
Πλευρικές Ωθήσεις		Νερό σε ρωγμές ή σπήλαια	
		Πάγος	
Μείωση Διατμητικής Αντοχής	Υλικά Χαρακτηριστικά	Γεωτεχνικά χαρακτηριστικά	
		Τάσεις	
	Αλλαγή στις μεταβλητές πρानών		Αποσάρθρωση
			Απώλεια διατμητική αντοχής
			Αύξηση ύψους υπόγειων νερών

Από τα παραδείγματα παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω, επιλέχθηκαν, ώστε να αναλυθούν εκτενέστερα, η αλλαγή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, η διάβρωση, η θερμοκρασία και η ανθρωπινή δραστηριότητα.

- Αλλαγή στη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Η αλλαγή στην ποσότητα των υπόγειων νερών μπορεί να μεταβάλλει το μέτρο της διατμητικής αντοχής ενός πρανούς. Αν για παράδειγμα, η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ανέβει, λόγω διήθησης του νερού της βροχής, τότε στο τμήμα του εδάφους που πριν τη διήθηση βρισκόταν πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα θα αναπτυχθούν επιπρόσθετες δυνάμεις άνωσης (πίεση πόρων). Οι δυνάμεις αυτές θα μειώσουν τις ενεργές τάσεις και κατά συνέπεια και την διατμητική αντοχή του υλικού. Επιπλέον, εκτός από την μείωση των ενεργών τάσεων, η παρουσία του νερού επηρεάζει και τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού, που διαμορφώνουν τη διατμητική αντοχή του, αφού ελαττώνει τη συνοχή και την τριβή μεταξύ των δεσμών του. Τέλος, η προσθήκη νερού συμβάλλει και στην αύξηση των τάσεων που τείνουν να μετακινήσουν την μάζα του πρανούς, καθώς αυξάνει το συνολικό βάρος του εδάφους.

- Διάβρωση

Η επαφή των φυσικών ή τεχνητών πρανών με το νερό ή τον αέρα προκαλεί σταδιακά την διάβρωση των εδαφών που τα αποτελούν. Η διάβρωση με τη σειρά της συνεπάγεται τη μεταβολή των γεωμετρικών ή μηχανικών χαρακτηριστικών των πρανών και την πιθανή εκδήλωση μιας αστοχίας. Ιδιαίτερα, η επαφή των πρανών με το νερό, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις που τα πρανά βρίσκονται στα όρια ποταμών ή λιμνών, μπορεί να προκαλέσει απομάκρυνση ενός μέρους του υλικού από το πόδι του πρανούς. Η απομάκρυνση αυτή έχει σαν συνέπεια τη μείωση των δυνάμεων που συγκρατούν τη μάζα του πρανούς και κατ' επέκταση την διατάραξη της ισορροπίας του. Επιπλέον, όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η παρουσία του νερού στο εσωτερικό του πρανούς μπορεί να μεταβάλλει και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και να προκαλέσει εσωτερική διάβρωση. Τέλος, η διάβρωση που μπορεί να προκληθεί από την επαφή με τον αέρα είναι πολύ μικρότερου βαθμού σε σχέση με αυτή που προκαλείται από το νερό, και για το λόγο αυτό συνήθως αγνοείται.

- **Θερμοκρασία**

Η μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια ενός πρανούς. Πιο συγκεκριμένα, υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές μπορεί να προκαλέσουν θρυμματισμό του πετρώματος, λόγω φαινομένων συστολής-διαστολής. Επιπλέον, επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ψύξης και θέρμανσης έχουν σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της αντοχής του εδάφους. Σε γενικές γραμμές, οι θερμοκρασιακές αλλαγές επιφέρουν επιφανειακές φθορές και για αυτό το λόγο δεν θεωρούνται ανησυχητικά φαινόμενα. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις η επιφανειακή φθορά θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγαλύτερης κλίμακας αστάθεια.

- **Ανθρώπινη παρέμβαση**

Οι κατασκευαστικές δραστηριότητες πολλές φορές μπορεί να αποτελέσουν την αφορμή για την πρόκληση κατολισθητικών φαινομένων στα πρανή. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευές που τοποθετούνται στη στέψη του πρανούς αυξάνουν το συνολικό βάρος και κατά επέκταση και τις δυνάμεις που τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα του. Επιπλέον, κατασκευαστικές δραστηριότητες, όπως εκσκαφές, δονήσεις από βαριά μηχανήματα ή χρήση εκρηκτικών, κοντά στο πόδι του πρανούς μπορούν είτε να αυξήσουν την κλίση του, είτε να μειώσουν την πλευρική στήριξη του εδάφους, με αποτέλεσμα την πιθανή εκδήλωση αστοχίας.

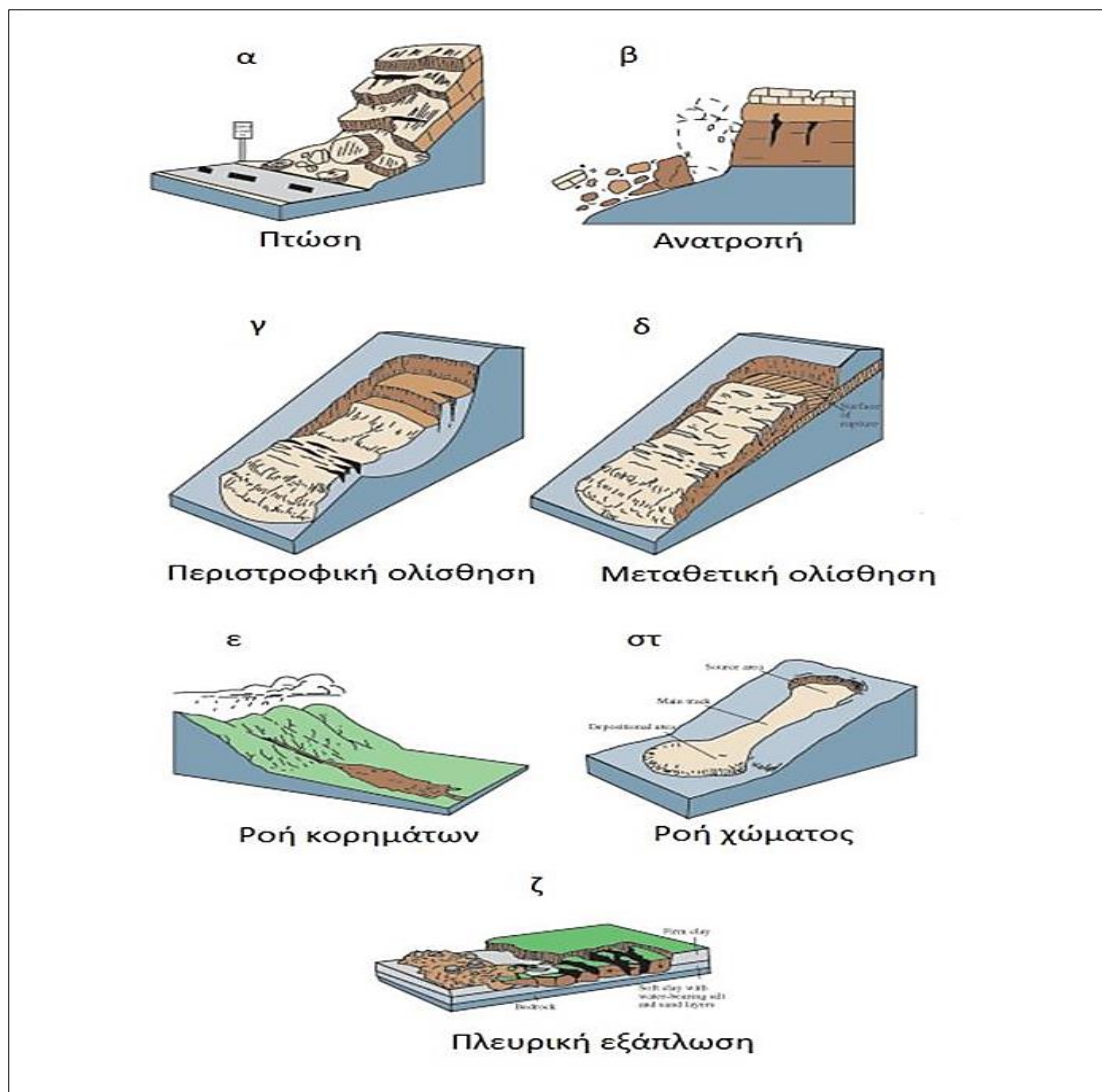
3.2.2 Κατολισθήσεις

Για την ταξινόμηση των κατολισθήσεων έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι, καθένας από τους οποίους λαμβάνει υπόψη του διαφορετικά κριτήρια. Ο βασικότερος είναι αυτός που τις κατατάσσει, ανάλογα με το υλικό που αστοχεί, σε βραχώδεις (rock) και εδαφικές (soil). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα αναλυθούν μόνο οι εδαφικές κατολισθήσεις.

Οι Cruden & Varnes (Cruden & Varnes, 1993) ταξινόμησαν τις κατολισθήσεις με βάση το είδος της κίνησης της εδαφικής μάζας, που κατολισθαίνει. Οι κατηγορίες που προέκυψαν παρουσιάζονται επιγραμματικά στον ακόλουθο πίνακα και στην συνέχεια καθεμία από αυτές αναλύεται εκτενέστερα.

Πίνακας 3.2: Τύποι κατολισθήσεων με βάση το είδος της κίνησης (Πηγή: Cruden & Varnes, 1996)

Κίνηση	Εδάφη	
	Κυρίως Χονδροκόκκα	Κυρίως Λεπτόκοκκα
Πτώση	Πτώση Κορημάτων	Πτώση Γαιών
Ανατροπή	Ανατροπή Κορημάτων	Ανατροπή Γαιών
Ολίσθηση	Ολίσθηση Κορημάτων	Ολίσθηση Γαιών
Εξάπλωση	Εξάπλωση Κορημάτων	Εξάπλωση Γαιών
Ροή	Ροή Κορημάτων	Ροή Γαιών



Εικόνα 3.2: Τύποι κατολισθήσεων με βάση το είδος της κίνησης (Πηγή: pubs.usgs.gov)

- Πτώση (Fall)

Πτώση είναι το είδος της κατολίσθησης, στο οποίο αποκολλάται τμήμα συνεκτικού εδάφους (ή βράχου), από ένα απότομο πρανές, κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Μετά την αποκόλληση η αστοχούσα εδαφική μάζα υφίσταται ελεύθερη πτώση και εξαιρετικά γρήγορη κύλιση επί της πλαγιάς. Είναι πιθανόν, πριν από την πτώση να έχει προηγηθεί μικρή ολίσθηση ή ανατροπή, κινήσεις που συντελούν στην σταδιακή αποκόλληση του υλικού από την ακίνητη μάζα.

- Ανατροπή (Topple)

Ανατροπή είναι η προς τα εμπρός περιστροφική κίνηση της αποσπώμενης εδαφικής (ή βραχώδους) μάζας γύρω από ένα σημείο ή άξονα που εντοπίζεται κάτω από το κέντρο βάρους της. Προκαλείται κυρίως από τη βαρύτητα, καθώς και το νερό ή τον πάγο που βρίσκεται στις ρωγμές της μάζας. Το φαινόμενο μπορεί σταδιακά να εξελιχθεί σε ολίσθηση ή πτώση, ανάλογα με τη γεωμετρία του πρανούς και της αποσπώμενης εδαφικής μάζας. Η ταχύτητα μιας ανατροπής μπορεί να χαρακτηριστεί από εξαιρετικά αργή έως εξαιρετικά γρήγορη.

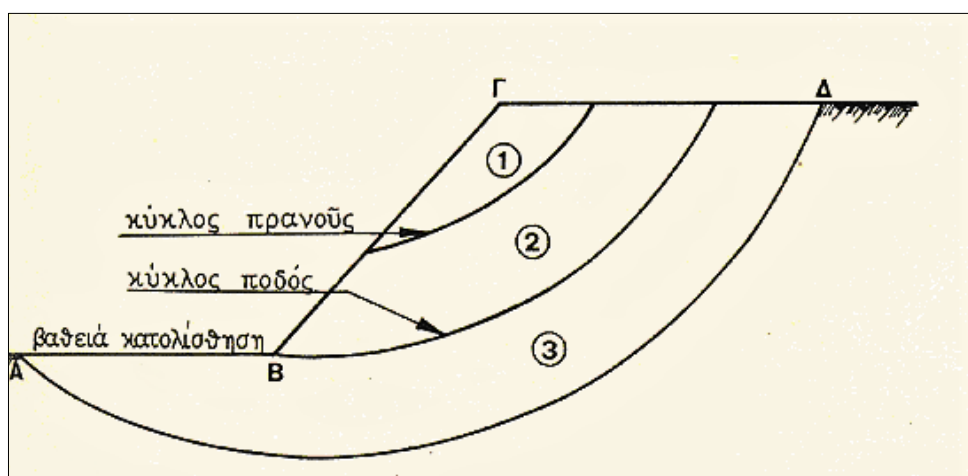
- Ολίσθηση (Slide)

Ολίσθηση είναι η προς τα κάτω κίνηση της εδαφικής μάζας του πρανούς, που λαμβάνει χώρα κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών αστοχίας. Η κίνηση αυτή μπορεί να είναι ακαριαία (ταχεία) ή προοδευτική, με τα πρώτα σημάδια της να εμφανίζονται ως ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους. Η μετακινούμενη μάζα μπορεί να παραμένει ενιαία κατά την ολίσθηση ή να διαχωρίζεται σε ανεξάρτητες μάζες.

Σε μια τέτοιου τύπου κατολίσθηση, η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας είναι πολύ καλά ορισμένη και μπορεί να είναι επίπεδη, κυκλική ή πολυγωνική. Τα παραπάνω είδη γεωμετρίας κατατάσσουν τις ολισθήσεις σε μεταθετικές, περιστροφικές ή πολύπλοκες, αντίστοιχα.

Στις μεταθετικές ολισθήσεις (Translational Slides) η μετακινούμενη μάζα κινείται κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας ολίσθησης. Πρόκειται για ολισθήσεις πολύ μικρού βάθους, σε σχέση με το μήκος τους, που εμφανίζονται κυρίως σε πρανή που αποτελούνται από χονδρόκοκκα εδάφη και παράλληλες εδαφικές στρώσεις ίδιας κλίσης, με την επιφάνεια ολίσθησης να σχηματίζεται συνήθως κατά μήκος των γραμμών που διαχωρίζουν τις εκάστοτε στρώσεις.

Στις περιστροφικές ή κυκλικές ολισθήσεις (Rotational Slides) η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει πάνω σε μια κυκλική επιφάνεια αστοχίας. Οι κατολισθήσεις αυτού του τύπου εμφανίζονται κυρίως σε ομοιογενή και λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά και το μήκος τους μπορεί να είναι τρεις έως επτά φορές μεγαλύτερο από το βάθος τους. Ανάλογα με την έκταση που καλύπτει η επιφάνεια ολίσθησης, διακρίνονται τρεις υποκατηγορίες. Η πρώτη υποκατηγορία αφορά τις ολισθήσεις, όπου η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται εντός των ορίων του πρानού. Η δεύτερη υποκατηγορία αφορά τις ολισθήσεις όπου η επιφάνεια ολίσθησης καταλήγει στο πόδι του πρानού. Τέλος, η τρίτη υποκατηγορία αφορά τις βαθιές ολισθήσεις, όπου η επιφάνεια ολίσθησης ξεπερνά τα όρια του πρानού και φτάνει έως την βάση του.



Εικόνα 3.3: Υποκατηγορίες περιστροφικής ολίσθησης (Πηγή: Βαλαλάς, 1981)

- Εξάπλωση (Spread)

Με τον όρο εξάπλωση νοείται η επέκταση ενός συνεκτικού υλικού σε βάρος ενός άλλου μαλακότερου υποκείμενου υλικού, στο οποίο και στηρίζεται. Οι κινήσεις αυτές είναι αρκετά διακριτές, καθώς συνήθως εκδηλώνονται σε πολύ ομαλές πλαγιές ή σε επίπεδο έδαφος. Στα εδαφικά πρानή, συνηθέστερες είναι οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης. Στις περιπτώσεις αυτές, τα υποκείμενα υλικά (συνήθως στρώσεις άμμου) περνούν από τη στερεή σε μια υγροποιημένη κατάσταση. Όταν συμβεί αυτό, το υπερκείμενο συνεκτικό υλικό (συνήθως άργιλος και ιλύς) υφίσταται θραύση και επέκταση. Τα τεμάχια που αποσπώνται αρχικά καθιζάνουν και στη συνέχεια μπορεί να περιστραφούν, να ολισθήσουν, να βυθιστούν ή να υγροποιηθούν και να ρέυσουν. Η θραύση είναι βαθμιαία, ενώ η επέκταση ξεκινάει ξαφνικά, χωρίς προειδοποίηση, και κινείται με μεγάλη έως πολύ μεγάλη ταχύτητα.

- Ροή (Flow)

Η ροή είναι μία συνεχής κίνηση στο χώρο, στην οποία οι επιφάνειες αστοχίας δεν είναι καλά ορισμένες, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και είναι κοντά η μία στην άλλη. Οι κινήσεις αυτές εκδηλώνονται συνήθως σε χαλαρά υλικά και μπορεί να είναι υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές. Γενικά, υπάρχει μια βαθμιαία μετάβαση από ολισθήσεις σε ροές, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με την περιεκτικότητα των υλικών σε νερό και λεπτομερή υλικά, δηλαδή υλικά που αυξάνουν την κινητικότητα τους. Οι εδαφικές ροές διακρίνονται σε ροές κορημάτων (Debris Flow) και ροές γαιών (Earth Flow). Στις ροές γαιών, στην περίπτωση που η περιεκτικότητα σε νερό είναι μεγάλη, οι κινήσεις είναι εξαιρετικά γρήγορες και αναφέρονται ως ροές λάσπης. Τέλος, όταν οι ροές χαρακτηρίζονται από πολύ έως εξαιρετικά αργή ταχύτητα κίνησης, θεωρείται ότι συνιστούν μια ξεχωριστή κατηγορία, αυτή του ερπυσμού (Creep). Γενικά, ο ερπυσμός είναι η ανεπαίσθητα αργή, σταθερή και προς τα κάτω κίνηση μιας μάζας. Σαν φαινόμενο αναγνωρίζεται από την ύπαρξη κυρτών κορμών δέντρων και λυγισμένων περιφράξεων ή τοίχων αντιστήριξης.

Εκτός από το είδος της κίνησης της μεταφερόμενης μάζας, οι Cruden & Varnes κατηγοριοποίησαν τις κατολισθήσεις και με βάση την ταχύτητα τους. Οι κατηγορίες που προέκυψαν είναι επτά και παρουσιάζονται επιγραμματικά στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.3: Τύποι κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα κίνησης (Πηγή: Cruden & Varnes, 2006)

Τάξη Ταχύτητας	Περιγραφή	Ταχύτητα (mm/s)	Τυπική Ταχύτητα
7	Υπερβολικά Γρήγορη	$>5 \cdot 10^3$	>5 m/s
6	Αρκετά Γρήγορη	$5 \cdot 10^1$	3 m/min
5	Γρήγορη	$5 \cdot 10^{-1}$	1,8 m/hr.
4	Μέσης Ταχύτητας	$5 \cdot 10^{-3}$	13 m/month
3	Αργή	$5 \cdot 10^{-5}$	1,6 m/year
2	Αρκετά Αργή	$5 \cdot 10^{-7}$	16 mm/year
1	Υπερβολικά Αργή	$<5 \cdot 10^{-7}$	<16 mm/year

3.2.3 Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών

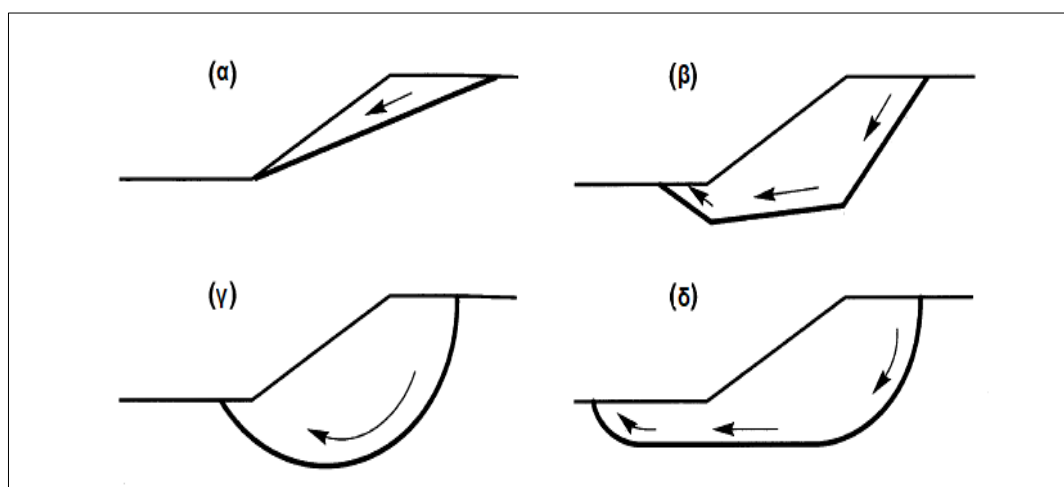
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι πολλές. Από αυτές, οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας υπό στατικές συνθήκες είναι η μέθοδος οριακής ισορροπίας και η μέθοδος τάσεων-παραμορφώσεων (Kramer, 1996), οι οποίες είναι και αυτές που θα αναλυθούν παρακάτω.

A) Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας

Βασική αρχή της μεθόδου της οριακής ισορροπίας είναι ότι η ευστάθεια του πρανούς κρίνεται από το μέγεθος ενός συντελεστή ασφαλείας F.S. (Factor of Safety). Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων/τάσεων που αντιστέκονται στην αστοχία (αντιδρώσες δυνάμεις) προς τις δυνάμεις/τάσεις που τείνουν να την προκαλέσουν (δρώσες δυνάμεις). Εναλλακτικά, θα μπορούσε να οριστεί και ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού του πρανούς προς τις διατμητικές τάσεις που απαιτούνται για την διατήρηση της ισορροπίας του.

$$F.S. = \frac{\text{Αντιδρώσες Δυνάμεις}}{\text{Δρώσες Δυνάμεις}}$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι. Πρωταρχικό βήμα της κάθε μεθόδου είναι η υιοθέτηση μιας αυθαίρετης επιφάνειας αστοχίας, η οποία να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την πιθανή πραγματική. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να είναι επίπεδη, πολυγωνική, κυκλική ή μη κυκλική.



Εικόνα 3.4: Οι πιο συνηθισμένες μορφές επιφάνειας αστοχίας (Πηγή: Kramer, 1996)

Δεδομένης αυτής της διάκρισης, τα πρηνή των οποίων η επιφάνεια αστοχίας είναι επίπεδα (Εικόνα 3.4α), όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τις ασυνέχειες των βράχων, μπορούν να αναλυθούν εύκολα με τη μέθοδο Culmann. Από την άλλη, τα πρηνή στα οποία η αστοχία μπορεί να συμβεί σε δύο ή περισσότερα επίπεδα (Εικόνα 3.4β) μπορούν να αναλυθούν με τη μέθοδο της σφήνας (π.χ. μέθοδος Perloff and Baron 1976 ή Lambe και Whitman 1969). Επιπλέον, στα ομοιογενή πρηνή, η επιφάνεια αστοχίας συνήθως έχει κυκλικό ή σπειροειδές σχήμα (Εικόνα 3.4γ). Τα πρηνή αυτά συνήθως αναλύονται με τη συνήθη μέθοδο των λωρίδων ή με την τροποποιημένη μέθοδο Bishop. Τέλος, όταν οι συνθήκες του υπεδάφους δεν είναι ομοιογενείς, δηλαδή όταν υπάρχουν διαφορετικές στρώσεις με αντίστοιχες διαφορετικές αντοχές ή υφίστανται ασυνέχειες, οι επιφάνειες αστοχίας είναι πιθανό να μην είναι κυκλικές (Εικόνα 3.4δ). Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι όπως αυτή των Morgenstern και Price (1965), του Spencer (1967) ή του Janbu (1968).

Σύμφωνα με τον ορισμό του συντελεστή ασφαλείας, ένα πρηνές παρουσιάζει αστοχία και καθίσταται ασταθές, όταν οι δρώσες δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις αντιδρώσες, δηλαδή όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος της μονάδας. Με την ίδια λογική, ένα πρηνές θεωρείται οριακά σταθερό, όταν ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει ίσος με τη μονάδα και σταθερό, όταν ο συντελεστής προκύπτει μεγαλύτερος από τη μονάδα. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο συντελεστής ασφαλείας προσεγγίσει τη μονάδα, η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι πλήρως ενεργοποιημένη επί της επιφάνειας αστοχίας και το πρηνές ισορροπεί οριακά. Αυτό σημαίνει πως οποιοδήποτε επιπρόσθετο φορτίο θα προκαλέσει την αστοχία του. Στην περίπτωση αυτή, το πρηνές θα παραμορφωθεί μέχρι να ισορροπήσει σε έναν νέο σχηματισμό, στον οποίο οι διατμητικές τάσεις που απαιτούνται για την ισορροπία του είναι μικρότερες ή ίσες με την διατμητική του αντοχή.

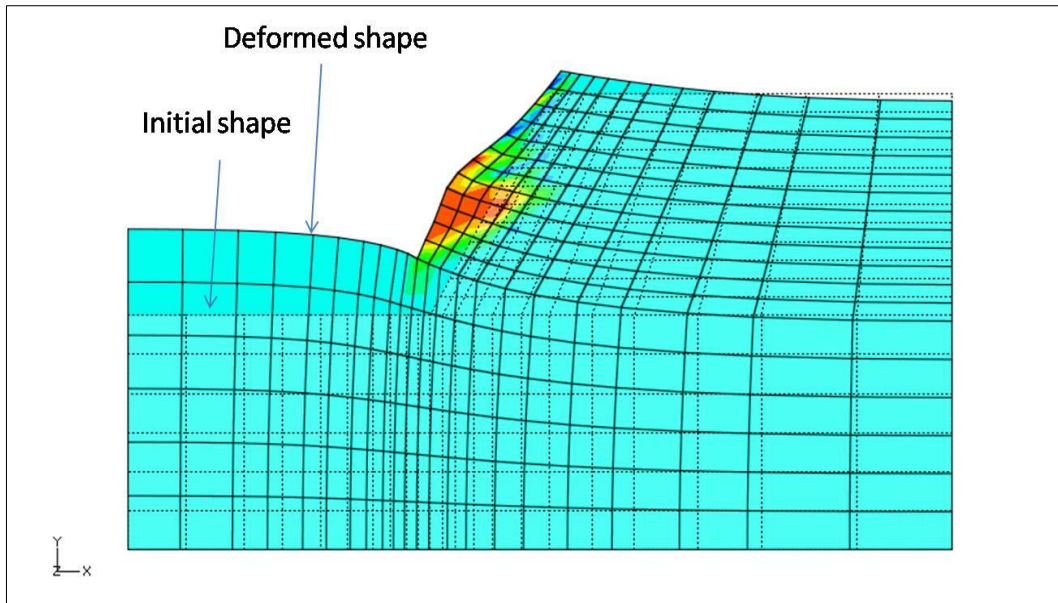
Στην πράξη, για να θεωρηθεί ένα πρηνές σταθερό θα πρέπει ο συντελεστής ασφαλείας να είναι επαρκώς μεγαλύτερος από τη μονάδα. Για την επιλογή της τιμής, πάνω από την οποία ένας συντελεστής θα μπορεί να θεωρείται αποδεκτός, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα της ακρίβειας με την οποία αναπαραστάθηκε ο πραγματικός μηχανισμός αστοχίας, η ακρίβεια των παραμέτρων εισόδου (διατμητική αντοχή του εδάφους, συνθήκες των υπόγειων υδάτων, γεωμετρία του πρηνούς κ.α.), η πιθανότητα και η διάρκεια έκθεσης σε διάφορα είδη εξωτερικής φόρτισης και το μέγεθος των επιπτώσεων από μια πιθανή αστοχία του πρηνούς. Τυπικά, οι ελάχιστες τιμές συντελεστών ασφαλείας που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό πρηνών είναι 1,5 για κανονικές μακροχρόνιες συνθήκες φόρτισης και 1,3 για προσωρινά πρηνή εκσκαφής ή για μόνιμα πρηνή που βρίσκονται στο στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής.

Τέλος οφείλουν να αναφερθούν οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η μέθοδος οριακής ισορροπίας, καθώς αυτές επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της. Αρχικά λοιπόν, η μέθοδος οριακής ισορροπίας υποθέτει ότι το έδαφος πάνω από την επιλεχθείσα επιφάνεια αστοχίας είναι άκαμπτο (τέλεια πλαστικό) και ότι διάτμηση μπορεί να υπάρξει μόνο επί της επιφάνειας αστοχίας. Αυτός είναι και ο λόγος που η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παραμορφώσεις του πρανούς. Επιπλέον, προκειμένου ο συντελεστής ασφαλείας να θεωρηθεί σταθερός καθόλη την έκταση της επιφάνειας αστοχίας, θεωρείται ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους ενεργοποιείται ταυτόχρονα σε όλα τα σημεία της επιφάνειας αυτής, κάτι που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Επομένως, στην πραγματικότητα ο συντελεστής ασφαλείας δεν έχει την ίδια τιμή σε κάθε σημείο της επιφάνειας αστοχίας.

B) Μέθοδος Τάσεων-Παραμορφώσεων

Σύμφωνα με τη μέθοδο ανάλυσης τάσεων-παραμορφώσεων, το συμπέρασμα για το αν ένα πρανές μπορεί να θεωρηθεί ευσταθές ή όχι, προκύπτει από το μέγεθος των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων, που του δημιουργούν τα φορτία που ασκούνται σε αυτό.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας πρανών που βασίζονται στην ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων. Από αυτές, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε λογισμικά, τα οποία παρέχουν την δυνατότητα προσομοίωσης του υπό μελέτη χώρου, και στη συγκεκριμένη περίπτωση του πρανούς. Για την επίτευξη της προσομοίωσης, ο χρήστης καλείται να καθορίσει κατάλληλα τη γεωμετρία, τη διαδικασία κατασκευής, τις εδαφικές παραμέτρους και τις συνοριακές συνθήκες. Η βασική ιδέα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να συνοψιστεί στο ότι ο υπό εξέταση χώρος διαιρείται σε επιμέρους μικρά τμήματα, τα πεπερασμένα στοιχεία (elements), τα οποία συνολικά διαμορφώνουν ένα πλέγμα (mesh). Κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους (nodes). Ο υπολογισμός των άγνωστων μεταβλητών γίνεται στους κόμβους και έπειτα μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής λαμβάνουν τιμή και τα υπόλοιπα σημεία του μέσου. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου στα πρανά επιτρέπει την πρόβλεψη του μεγέθους των τάσεων, των παραμορφώσεων, των μετακινήσεων, της πίεσης των πόρων και εν τέλει και της ευστάθειας τους. Επιπλέον, σημαντικό είναι, ότι σε αντίθεση με άλλες μεθόδους λαμβάνει υπόψη και αντιμετωπίζει τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους, τις σύνθετες συνοριακές συνθήκες, τις ακανόνιστες γεωμετρίες καθώς και ποικίλες κατασκευαστικές λειτουργίες. Σημειώνεται, ότι αναλυτικότερη περιγραφή της μεθόδου πραγματοποιείται στο τέταρτο κεφάλαιο.



Εικόνα 3.5: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Οι διακεκομμένες γραμμές ορίζουν την αρχική μορφή του πρανούς, ενώ οι συνεχείς την παραμορφωμένη. (Πηγή: engineering-group.com)

Γενικά, τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων ανάλυσης τάσεων-παραμορφώσεων, έναντι άλλων μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας πρανών, είναι αυτά της αναγνώρισης της πιθανής μορφής της αστοχίας μέσα από την πρόβλεψη των παραμορφώσεων του πρανούς, του εντοπισμού των ζωνών που συγκεντρώνουν τις μεγαλύτερες τάσεις και της πρόβλεψης των επιπτώσεων από πιθανές αστοχίες. Από την άλλη πλευρά, μειονεκτήματα εντοπίζονται στη μεγάλη διάρκεια του χρόνου που απαιτείται για τη μηχανική διαμόρφωση του προβλήματος, τον καθορισμό των ιδιοτήτων του υλικού και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς και στην πολυπλοκότητα της υπολογιστικής μεθόδου. Η ακρίβεια τους επηρεάζεται άμεσα από την ακρίβεια με την οποία το μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων του πρανούς αντιπροσωπεύει την πραγματική συμπεριφορά του υλικού του.

3.3 Ευστάθεια πρανών υπό σεισμικές συνθήκες

Ένα πρανές ισορροπεί όταν το σύνολο των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό και τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα του είναι ίσο ή μικρότερο του συνόλου των δυνάμεων που τείνουν να αντισταθούν στην κίνηση αυτή. Υπό στατικές συνθήκες, η βαρύτητα αποτελεί την βασικότερη δύναμη που τείνει να μετακινήσει την μάζα ενός πρανούς. Εκτός όμως από την βαρύτητα, υπάρχουν κι άλλοι παράγοντες, πρωτογενούς ή δευτερογενούς φύσης, που μπορούν να επηρεάσουν την ευστάθεια ενός πρανούς. Από αυτούς, ένας από τους πιο σημαντικούς είναι ο σεισμός. Οι σεισμικές δονήσεις έχουν σαν

αποτέλεσμα είτε την αύξηση των διατμητικών τάσεων που ασκούνται στο πρηνές και τείνουν να μετακινήσουν την μάζα του, είτε την μείωση της διατμητικής αντοχής του. Και στις δύο περιπτώσεις, εάν η διατμητική αντοχή δεν επαρκεί για την εξισορρόπηση των ασκούμενων διατμητικών τάσεων, το πρηνές μπορεί να αστοχήσει, δηλαδή να κατολισθήσει.

3.3.1 Τύποι σεισμικών κατολισθήσεων

Από τους ιστορικούς χρόνους έχουν καταγραφεί αναρίθμητες κατολισθήσεις σε ολόκληρο τον κόσμο, με τη σεισμική δραστηριότητα να είναι πάντα μια από τις κυριότερες αιτίες ενεργοποίησής τους. Οι σεισμικά επαγόμενες κατολισθήσεις μπορεί να έχουν πολύ καταστροφικές συνέπειες. Μάλιστα έχει διαπιστωθεί, πως σε πολλές περιπτώσεις σεισμών, οι κατολισθήσεις προκάλεσαν τον ίδιο ή μεγαλύτερο αριθμό καταστροφών, σε σχέση με το σύνολο των υπόλοιπων γεωκινδύνων που ενεργοποιήθηκαν.



Εικόνα 3.6: Κατολισθήσεις που προκλήθηκαν από σεισμό 6,6 ρίχτερ που πραγματοποιήθηκε στο Χοκάνιτο της Ιαπωνίας, το Σεπτέμβρη του 2018 (Πηγή: cnn.gr)

Το 1984 ο Keefe ταξινόμησε τις κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό σε τρεις κύριους τύπους, ύστερα από τη μελέτη 40 σεισμικών γεγονότων. Οι τύποι αυτοί διαχωρίζονται σε μικρότερες υποκατηγορίες ανάλογα με το εδαφικό υλικό αστοχίας, την ελάχιστη κλίση του πρηνούς τη στιγμή της αστοχίας και το μέγεθος του σεισμού, στην κλίμακα Richter. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης αυτής παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 3.4: Τύποι σεισμικών κατολισθήσεων (Πηγή: Keefer, 1984)

Κύριος Τύπος Κατολίσησης	Είδη	Υλικό Αστοχίας	Ελάχιστη Κλίση Πρανούς	Μέγεθος Σεισμού (M _L)
Πτώσεις	Εδαφικές πτώσεις	Κοκκώδη εδάφη, ελαφρώς συνεκτικά	40° (1,2:1)	4,0
Ολισθήσεις	Εδάφη με μορφή χιονοστιβάδας	Χαλαρά εδάφη: μη κορεσμένη άμμος	25° (2,1:1)	6,5
	Ολισθήσεις διαταραγμένων εδαφών	Χαλαρά εδάφη: μη κορεσμένη άμμος	15° (3,7:1)	4,0
	Εδαφικές βουτιές	Χαλαρά εδάφη: μερικώς ή πλήρως κορεσμένη άμμος ή ιλύς, ελαφρώς συμπαγής άμμος, ιλύς ή άργιλος	10° (5,7:1)	4,5
	Ολισθήσεις εδάφους σε μπλοκ	Χαλαρά εδάφη: 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	Μερικώς ή πλήρως κορεσμένη άργιλος	10° (5,7:1)	5,0
	Ολίσθηση ροής	Κορεσμένη, μη συμπαγής ή ελαφρώς συμπαγής άμμος ή αμμώδης άργιλος	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

3.3.2 Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών

Η ανάλυση της ευστάθειας ενός πρανούς υπό σεισμικές συνθήκες είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την ανάλυση υπό στατικές συνθήκες, καθώς απαιτεί την διερεύνηση τόσο της δράσης των δυναμικών τάσεων που προκαλούνται από την σεισμική δόνηση, όσο και των συνεπειών των τάσεων αυτών στην αντοχή και τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού από το οποίο αποτελείται το πρανές.

Οι αστοχίες που προκαλούνται από την πραγματοποίηση ενός σεισμού μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες (Kramer, 1996), οι οποίες είναι:

- Αδρανειακές αστοχίες (Inertial instabilities)

Στις περιπτώσεις αυτές, η διατμητική αντοχή του εδάφους παραμένει σταθερή. Ωστόσο, αστοχία επέρχεται λόγω της προσωρινής υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του εδάφους από την προσθήκη των δυναμικών αδρανειακών τάσεων στο σύνολο των υπάρχοντων διατμητικών τάσεων του πρανούς. Πιο συγκεκριμένα, οι σεισμικές κινήσεις μεταφράζονται ως οριζόντιες και κάθετες δυναμικές τάσεις πάνω στη μάζα των πρανών. Με την σειρά τους, οι τάσεις αυτές παράγουν αντίστοιχες δυναμικές, ορθές και διατμητικές τάσεις επάνω στις πιθανές επιφάνειες αστοχίας. Η υπέρθεση των δυναμικών διατμητικών τάσεων στις υπάρχουσες στατικές διατμητικές τάσεις μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την υπέρβαση της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του εδάφους και την εκδήλωση αδρανειακής αστοχίας.

- Αστοχίες αποδυνάμωσης της αντοχής του εδάφους (Weakening instabilities)

Στις περιπτώσεις αυτές, η σεισμική δόνηση αποδυναμώνει την αντοχή του εδάφους, το οποίο δεν μπορεί να αντέξει τις επιπρόσθετες σεισμικές τάσεις και καταρρέει. Συνηθέστερη αιτία αποδυνάμωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους, που προκαλείται από τις σεισμικές δονήσεις, είναι η αύξηση της πίεσης στους πόρους. Πιο συγκεκριμένα, η πίεση των πόρων μπορεί να φτάσει σε τιμές ίσες με την ολική τάση του εδάφους. Αυτό σημαίνει πως οι ενεργές τάσεις μηδενίζονται και κατά συνέπεια η διατμητική αντοχή του εδάφους μειώνεται αισθητά. Αν το σύνολο των εφαρμοζόμενων στατικών και δυναμικών διατμητικών τάσεων υπερβεί την μειωμένη αντοχή του εδάφους, εκδηλώνεται αστοχία αποδυνάμωσης.

Για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών τόσο έναντι αδρανειακών αστοχιών, όσο και έναντι αστοχιών αποδυνάμωσης, έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο τεχνικών, εκ των οποίων άλλες βασίζονται στην ανάλυση οριακής ισορροπίας και άλλες στην ανάλυση τάσεων-παραμορφώσεων. Ωστόσο, στα

πλαίσια της παρούσα εργασίας εξετάστηκε μόνο η περίπτωση της ευστάθειας έναντι αδρανειακών αστοχιών και για το λόγο αυτό θα αναφερθούν μόνο οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρηνών έναντι αυτών.

A) Ψευδοστατική ανάλυση

Η ψευδοστατική ανάλυση υπολογίζει ένα συντελεστή ασφαλείας έναντι σεισμικών φορτίων, με τον ίδιο τρόπο που η ανάλυση οριακής ισορροπίας υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας έναντι στατικών φορτίων. Βασική παραδοχή της ψευδοστατικής ανάλυσης είναι ότι η επιτάχυνση και κατ' επέκταση και η αδρανειακή δύναμη που ασκεί ο σεισμός δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, αλλά παραμένουν σταθερές. Για αυτό και μετονομάζονται σε ψευδοστατική επιτάχυνση και δύναμη, αντίστοιχα. Επιπλέον, θεωρείται πως η συνολική ψευδοστατική δύναμη εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους της μάζας που αστοχεί και χωρίζεται σε μια οριζόντια (F_h) και μια κάθετη (F_v) συνιστώσα, των οποίων το μέτρο είναι ίσο με:

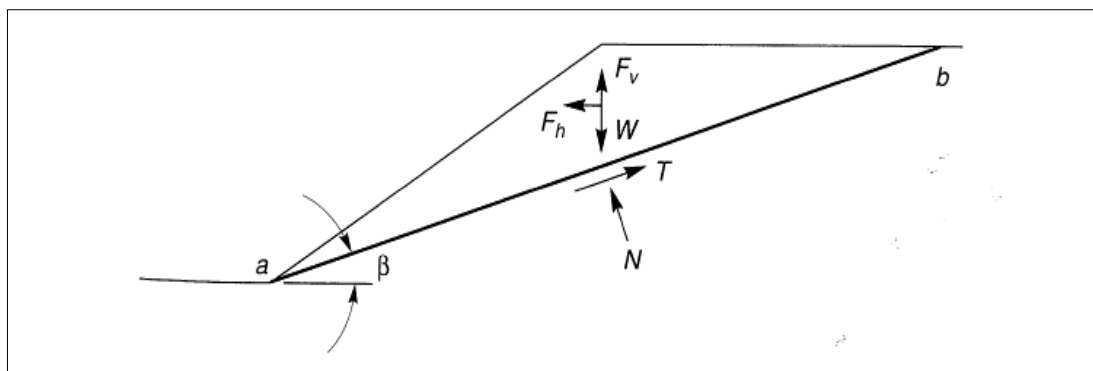
$$F_h = \frac{a_h \times W}{g} = k_h \times W \quad (3.1)$$

$$F_v = \frac{a_v \times W}{g} = k_v \times W \quad (3.2)$$

,όπου a_h και a_v είναι η οριζόντια και η κάθετη ψευδοστατική επιτάχυνση, k_h και k_v είναι ο αδιάστατος οριζόντιος και κάθετος ψευδοστατικός συντελεστής, αντίστοιχα, και W είναι το βάρος της αστοχούσας μάζας.

Η επιλογή των κατάλληλων τιμών των ψευδοστατικών επιταχύνσεων αποτελεί την πιο κρίσιμη και δύσκολη διαδικασία της ανάλυσης. Το μέτρο τους θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του εύρους της πραγματικής επιτάχυνσης του εκάστοτε σεισμού, καθώς από αυτό εξαρτάται η τιμή των ψευδοστατικών δυνάμεων και κατ' επέκταση και η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Δεδομένου ότι οι συναρτήσεις των πραγματικών επιταχύνσεων λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις θα πρέπει να αντιστοιχίζονται σε τιμές αρκετά μικρότερες των μέγιστων πραγματικών επιταχύνσεων (a_{max}). Για την επιλογή της κατάλληλης τιμής του ψευδοστατικού συντελεστή, η οποία θα καθορίσει και την τιμή της ψευδοστατικής επιτάχυνσης, έχουν προταθεί διάφοροι κανόνες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, ο Terzaghi έχει προτείνει την χρήση της τιμής $k_h=0,1$ για ισχυρούς σεισμούς, την τιμή $k_h= 0,2$ για βίαιους σεισμούς και την τιμή $k_h= 0,5$ για καταστροφικούς σεισμούς. Μια άλλη προσέγγιση έγινε από τον Marcuson, ο οποίος πρότεινε οι ψευδοστατικές επιταχύνσεις για τα φράγματα να είναι ίσες με το ένα τρίτο ή το ένα δεύτερο της μέγιστης πραγματικής επιτάχυνσης. Όπως γίνεται φανερό, δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος κανόνας για την

επιλογή του κατάλληλου συντελεστή επιτάχυνσης. Ωστόσο ο συντελεστής που επιλέγεται, θα πρέπει πάντα να αντιπροσωπεύει το εύρος της πραγματικής επιτάχυνσης και να συσχετίζεται μέσω ενός ποσοστού με την μέγιστη τιμή αυτού.



Εικόνα 3.7: Δυνάμεις που ασκούνται σε εδαφική τριγωνική σφήνα πάνω από επίπεδη επιφάνεια αστοχίας υπό ψευδοστατικές συνθήκες (Πηγή: Kramer, 1996)

Όπως στην περίπτωση της μεθόδου της οριακής ισορροπίας, έτσι και στην ψευδοστατική μέθοδο, από την εξίσωση των δυνάμεων που τείνουν να μετακινήσουν την μάζα, που πρόκειται να αστοχήσει, με τις δυνάμεις που τείνουν να αντισταθούν στην κίνηση αυτή, προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας. Στην προκειμένη περίπτωση η εξίσωση αυτή είναι:

$$F.S. = \frac{\text{resisting forces}}{\text{driving forces}} = \frac{cl_{ab} + [(W - F_v) \cos \beta - F_h \sin \beta] \tan \varphi}{(W - F_v) \sin \beta + F_h \cos \beta} \quad (3.3)$$

,όπου c και φ είναι η συνοχή και η γωνία εσωτερικής τριβής του εδαφικού υλικού (παράμετροι Mohr-Coulomb που περιγράφουν την διατμητική αντοχή του εδάφους) και l_{ab} είναι το μήκος του επιπέδου αστοχίας. Σημειώνεται, ότι η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να είναι επίπεδη, κυκλική ή μη κυκλική.

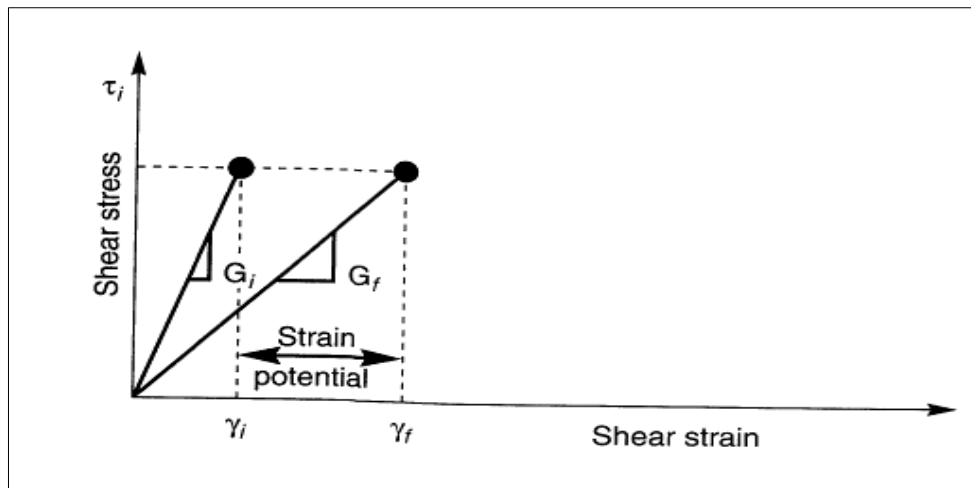
Όπως προκύπτει από τον παραπάνω τύπο, η οριζόντια ψευδοστατική δύναμη (F_h) είναι δυσμενής για την ευστάθεια του πρσανούς, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ασφαλείας. Αντίθετα, η κάθετη ψευδοστατική δύναμη (F_v) έχει μικρή επιρροή στην τιμή του συντελεστή ασφαλείας, καθώς ανάλογα με τη διεύθυνση της, αυξάνει ή μειώνει κατά το ίδιο μέγεθος, τόσο τις δρώσες όσο και τις αντιδρώσες δυνάμεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια, στις ψευδοστατικές αναλύσεις, η επίδραση της κάθετης επιτάχυνσης πολλές φορές να αγνοείται.

B) Ανάλυση Τάσεων-Παραμορφώσεων

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, που βασίζεται στην ανάλυση τάσεων παραμορφώσεων, για την ανάλυση της ευστάθειας των πρανών υπό σεισμικές συνθήκες είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην ευστάθεια πρανών υπό στατικές συνθήκες. Στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, το σύνολο των σεισμικά προκυπτουσών μόνιμων παραμορφώσεων των στοιχείων (elements) του πλέγματος (mesh) ολοκληρώνεται αριθμητικά, προκειμένου να προκύψει η συνολική μόνιμη παραμόρφωση του πρανούς. Η μόνιμη παραμόρφωση εντός του κάθε στοιχείου ξεχωριστά μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες τεχνικές. Από αυτές, οι προσεγγίσεις της δυναμικής παραμόρφωσης (Strain Potential approach) και της μείωσης της ακαμψίας (Stiffness Reduction approach) υπολογίζουν τις μόνιμες παραμορφώσεις στο κάθε στοιχείο, χρησιμοποιώντας εργαστηριακά αποτελέσματα τάσεων για τον καθορισμό της ακαμψίας των υλικών που υποβάλλονται σε σεισμική φόρτιση. Από την άλλη, η προσέγγιση της μη γραμμικής ανάλυσης (Nonlinear analysis approach) χρησιμοποιεί τη μη γραμμική ανελαστική μηχανική συμπεριφορά του εδάφους, προκειμένου να υπολογίσει τις μόνιμες παραμορφώσεις από την εκδήλωση ενός σεισμού. Ακολούθως, καθεμία από αυτές τις προσεγγίσεις περιγράφεται αναλυτικότερα.

- Η προσέγγιση της δυναμικής παραμόρφωσης (Strain Potential approach) διατυπώθηκε από τον Seed το 1973. Πρόκειται για μια διαδικασία δυναμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, που σκοπεύει στον προσδιορισμό της σεισμικά επαγόμενης μόνιμης παραμόρφωσης του πρανούς, από αποτελέσματα γραμμικών ή ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων. Για τον υπολογισμό της συνολικής παραμόρφωσης του πρανούς, αρχικά υπολογίζονται οι κυκλικές διατμητικές τάσεις σε κάθε στοιχείο του πλέγματος, που προσομοιώνει το πρανός. Οι τάσεις αυτές προκύπτουν έπειτα από εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα του εδαφικού υλικού, τα οποία υποβάλλονται στις ίδιες στατικές και σεισμικές φορτίσεις με εκείνες που αναπτύσσονται σε ένα στοιχείο του πρανούς στο πεδίο. Ωστόσο, επειδή ένα πραγματικό στοιχείο στο πεδίο δεν μπορεί να παραμορφωθεί όπως το δοκιμαστικό δείγμα στο εργαστήριο, καθώς περιορίζεται και από τις παραμορφώσεις των γειτονικών του στοιχείων, οι κυκλικές παραμορφώσεις που αποδίδονται στα στοιχεία αποκαλούνται δυναμικές. Έπειτα, η παραμόρφωση του πρανούς υπολογίζεται ως το γινόμενο της μέσης τιμής των δυναμικών τάσεων που ανήκουν σε μια κάθετη τομή του επί το ύψος του. Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι η μέθοδος αυτή, καθώς θεωρεί ότι η μέγιστη διατμητική τάση έχει οριζόντια διεύθυνση σε όλα τα στοιχεία, υπολογίζει μόνο οριζόντιες μετατοπίσεις.
- Η προσέγγιση μείωσης του μέτρου ακαμψίας (Stiffness Reduction approach) είναι μια μέθοδος υπολογισμού των μόνιμων μετατοπίσεων των

πρανών, που αναπτύχθηκε από τους Lee και Serff. Στην προσέγγιση αυτή, οι υπολογισμένες δυνητικές παραμορφώσεις χρησιμοποιούνται για την μείωση του μέτρου ακαμψίας του εδάφους, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 3.8. Έπειτα, πραγματοποιούνται δυο στατικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, μια με το αρχικό μέτρο δυσκαμψίας και μια με το μειωμένο μέτρο δυσκαμψίας. Από την αριθμητική διαφορά των μετατοπίσεων των κόμβων, που υπολογίζονται από τις δυο αναλύσεις, προκύπτουν οι σεισμικά επαγόμενες μόνιμες μετατοπίσεις του πρανούς. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο με γραμμικά, όσο και με μη γραμμικά μοντέλα. Τέλος, σε αντίθεση με την προσέγγιση δυνητικών παραμορφώσεων (Strain Potential approach), η προσέγγιση αυτή μπορεί να υπολογίσει τόσο οριζόντιες, όσο και κάθετες μετατοπίσεις.



Εικόνα 3.8: Διαδικασία μείωσης του μέτρου ακαμψίας του εδάφους από την αρχική τιμή G_i στην τελική τιμή G_f (Πηγή: Kramer, 1996)

- Για τον υπολογισμό των μόνιμων σεισμικά επαγόμενων μετατοπίσεων των πρανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μη γραμμικές, δυναμικές αναλύσεις, δυο ή τριών διαστάσεων (Nonlinear analysis approach). Στις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιούνται μη γραμμικά και ανελαστικά μοντέλα εδάφους. Η βασική ιδέα είναι ότι οι παγκόσμιες εξισώσεις κίνησης γράφονται σε αναδρομική μορφή και ολοκληρώνονται ως προς το χρόνο, ώστε να προκύψουν οι μετατοπίσεις του πρανούς. Η τεχνική αυτή βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε αναλύσεις φραγμάτων.

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ

4.1 Περιγραφή υπολογιστικού-πολυκριτηριακού εργαλείου

Η λειτουργία του εργαλείου ξεκινά με τη διαμόρφωση μιας προκαταρκτικής χάραξης της διαδρομής του αγωγού, χρησιμοποιώντας ως κριτήρια την επιβεβλημένη αποφυγή ορισμένων περιοχών, όπως είναι για παράδειγμα οι αστικές περιοχές, οι περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές ή οι περιοχές πολιτιστικής κληρονομιάς. Σημειώνεται, ότι τα εδαφικά πρηνή επιλέγεται συνειδητά να μην είναι μια από τις παραπάνω περιοχές αποφυγής, για δύο λόγους. Αρχικά, διότι σε πρώτη φάση επιδιώκεται η διαμόρφωση της συντομότερης διαδρομής, και όπως έχει ήδη αναφερθεί η αποφυγή τους έχει συνήθως αντίθετα αποτελέσματα, και έπειτα διότι δεν υπάρχουν χαρτογραφικά δεδομένα που να απεικονίζουν τα εδαφικά πρηνή ως χωρικά καθορισμένες οντότητες, και κατά συνέπεια δεν είναι εξ' αρχής γνωστή η έκταση που καταλαμβάνουν. Αφού διαμορφωθεί η προκαταρκτική χάραξη, αυτή εξετάζεται σε συνδυασμό με δεδομένα που αποδίδουν το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης και εντοπίζονται τα σημεία διασταύρωσης της με εδαφικά πρηνή. Έπειτα, όσα από τα παραπάνω πρηνή μπορούν να θεωρηθούν δυνητικά ασταθή εξετάζονται ως προς την ευστάθεια τους υπό σεισμικές συνθήκες, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης του κάθε πρηνούς αποτελεί η μέγιστη, εφελκυστική και θλιπτική, αξονική παραμόρφωση που προκαλείται στον αγωγό από το συγκεκριμένο πρηνές, λόγω πιθανής μετατόπισης του εξαιτίας του σεισμού. Στη συνέχεια, οι τιμές της παραμόρφωσης ελέγχονται σε σχέση με κάποιο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, που έχει καθοριστεί βάσει Κανονισμών. Αν οι παραμορφώσεις ξεπερνούν το επιτρεπόμενο όριο, σε ένα ή περισσότερα πρηνή, επαναπροσδιορίζονται τα κριτήρια διαμόρφωσης της διαδρομής, ώστε να συμπεριλαμβάνουν και την αποφυγή των σεισμικά ασταθών πρηνών και προτείνεται μια νέα διαδρομή προς χάραξη. Σε αντίθετη περίπτωση, η προκαταρκτική χάραξη μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής.

Για την ανάπτυξη του εργαλείου έγινε χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), και ειδικότερα του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής ArcMap, του λογισμικού ArcGIS. Στην εφαρμογή αυτή πραγματοποιήθηκε η πλειοψηφία των απαραίτητων ενεργειών υλοποίησης του εργαλείου. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι αναλύσεις ευστάθειας των πρηνών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του λογισμικού Abaqus. Τα δύο λογισμικά είναι άμεσα συνδεδεμένα, καθώς τα τελικά αποτελέσματα των αναλύσεων ευστάθειας των πρηνών, δηλαδή οι τιμές των παραμορφώσεων του αγωγού, επιστρέφουν ως δεδομένα εισόδου στην εφαρμογή ArcMap, όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος με τα επιτρεπόμενα όρια και η αλλαγή της διαδρομής του αγωγού, εφόσον αυτή κριθεί αναγκαία.

Πριν από την παράθεση των εφαρμογών που πραγματοποιήθηκαν μέσω του υπολογιστικού-πολυκριτηριακού εργαλείου, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια εκτενέστερη περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν. Για το λόγο αυτό, στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί η περιγραφή των Σ.Γ.Π. και του λογισμικού ArcGIS, καθώς και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και του λογισμικού Abaqus.

4.2 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και λογισμικό ArcGIS

4.2.1 Εισαγωγή στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών διαπιστώθηκε, ότι οι ανάγκες για αξιόπιστες και ενημερωμένες πληροφορίες δεν μπορούσαν να ικανοποιηθούν από τους παραδοσιακούς τρόπους συλλογής, καταγραφής, ενημέρωσης και επεξεργασίας πληροφοριών. Το γεγονός αυτό είχε σαν συνέπεια την σταδιακή ανάπτυξη των πληροφοριακών συστημάτων. Ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετούν και την αρχιτεκτονική τους, τα πληροφοριακά συστήματα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, εκ των οποίων μια πολύ σημαντική είναι τα χωρικά πληροφοριακά συστήματα. Τα χωρικά συστήματα διαφέρουν από τα υπόλοιπα ως προς το ότι η βάση δεδομένων τους αποτελείται από παρατηρήσεις για χωρικά κατανεμημένα χαρακτηριστικά, δραστηριότητες ή γεγονότα (χωρικά δεδομένα), τα οποία καθορίζονται στο χώρο σαν σημεία, γραμμές ή επιφάνειες. Μια από τις πιο σημαντικές υποκατηγορίες των χωρικών πληροφοριακών συστημάτων είναι τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών - Σ.Γ.Π.(Geographical Information Systems - G.I.S.).

Σύμφωνα με έναν από τους πιο γνωστούς ορισμούς που έχουν δοθεί, τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι ένα σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάκτηση κατά βούληση, μεταφορά και παρουσίαση χωρικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο, για ένα συγκεκριμένο σύνολο σκοπών (Burrough, 1986) .

Πιο συγκεκριμένα, τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών αποτελούν λογισμικά, που δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργήσει μια απεικόνιση του πραγματικού κόσμου και να την αποθηκεύσει σε ψηφιακή ή αναλογική μορφή. Κύριος στόχος της δημιουργίας της απεικόνισης είναι η υποστήριξη διαδικασιών λήψης αποφάσεων σε τομείς σχετικούς με τη διαχείριση των χρήσεων γης, το περιβάλλον, τις μεταφορές, τα φυσικά διαθέσιμα ή τις υπηρεσίες σε αστικές περιοχές. Για την επίτευξη της απεικόνισης, κάθε δεδομένο που συλλέγεται αποθηκεύεται σε μια κεντρική βάση δεδομένων (γεωβάση), μέσα από την οποία έπειτα αντλείται και επεξεργάζεται. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές πηγές, όπως τοπογραφικές μετρήσεις ή δορυφορικές εικόνες. Βασικό χαρακτηριστικό των Σ.Γ.Π. είναι ότι δεδομένα που συλλέγονται από

διαφορετικές πηγές, και είναι φαινομενικά ασύνδετα μεταξύ τους, συσχετίζονται με δείκτη τη χωρική συνιστώσα τους σε ένα ενιαίο επίπεδο-υπόβαθρο, με τη μορφή χάρτη. Επιπλέον, τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων μπορεί να είναι τόσο γεωμετρικής, όσο και μη γεωμετρικής (θεματικής) φύσης, γεγονός που τα κατηγοριοποιεί σε γραφικά και περιγραφικά, αντίστοιχα. Η δυνατότητα σύνδεσης και διαχείρισης αυτών των δύο κατηγοριών, δηλαδή η δυνατότητα συσχέτισης των αντικειμένων του ψηφιακού χάρτη με τις πληροφορίες που έχουν καταχωρηθεί για αυτά, σε ένα ενιαίο περιβάλλον, αποτελεί και την βασική διαφορά των Σ.Γ.Π από τα υπόλοιπα σχεδιαστικά συστήματα. Επομένως, γίνεται κατανοητό, ότι στην περίπτωση των Σ.Γ.Π., ο χάρτης, που παράγεται, δεν αποτελεί απλώς ένα σχέδιο, αλλά ένα σύνολο αρχείων πληροφοριών, που συνδέουν τα γεωμετρικά στοιχεία του χώρου με τις περιγραφικές ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν.

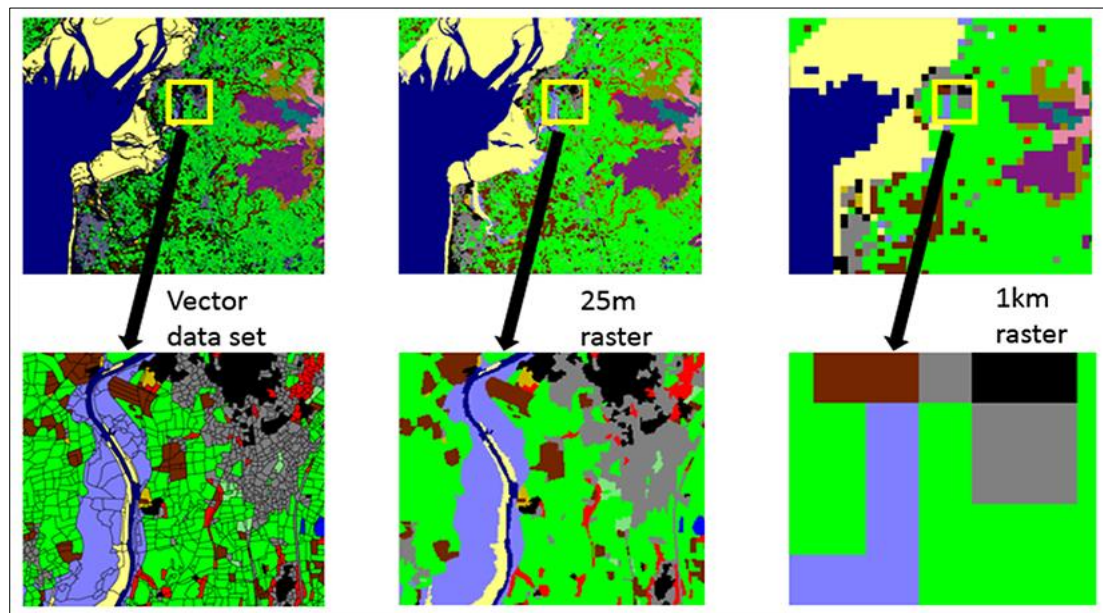
4.2.2 Είδη χρησιμοποιούμενων δεδομένων σε ένα Σ.Γ.Π.

Έχει ήδη αναφερθεί η διάκριση των δεδομένων σε γραφικά και περιγραφικά. Ανάλογα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους, τα γραφικά (γεωμετρικά) δεδομένα σε ένα Σ.Γ.Π. μπορούν να διακριθούν σε περαιτέρω υποκατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τη φύση τους χωρίζονται σε διακριτά, όταν η πληροφορία δεν είναι δυνατόν να καλύπτει κάθε στοιχειώδες σημείο της περιοχής μελέτης, και σε συνεχή, όταν για κάθε σημείο του χάρτη υπάρχει μια πληροφορία. Επιπλέον, ανάλογα με τις διαστάσεις τους, μπορούν να διακριθούν σε σημειακά, γραμμικά ή πολυγωνικά. Ωστόσο, η πιο σημαντική κατηγοριοποίηση για την κατανόηση της λειτουργίας των Σ.Γ.Π. είναι αυτή που γίνεται με βάση τον τρόπο καταχώρισης και επεξεργασίας των χαρτογραφικών στοιχείων, η οποία διακρίνει τα δεδομένα σε ψηφιδωτά (raster) και διανυσματικά (vector).

Τα ψηφιδωτά δεδομένα (raster datasets) αναπαριστούν τις γεωγραφικές οντότητες ως πλέγματα ψηφίδων (pixels). Σε κάθε ψηφίδα εκχωρείται μια αριθμητική τιμή που αντιστοιχεί στην πληροφορία που μεταφέρει το εκάστοτε δεδομένο για την συγκεκριμένη περιοχή. Ανάλογα με το σχήμα της ψηφίδας, τα ψηφιδωτά δεδομένα χωρίζονται σε κανονικής και μη κανονικής μορφής. Το πιο διαδεδομένο μοντέλο είναι αυτό των «τεταρτημορίων», με βάση το τετράγωνο, λόγω της δυνατότητας του να υποδιαιρείται σε απεριόριστο αριθμό υποπεριοχών, που έχουν το ίδιο σχήμα και τις ίδιες ιδιότητες. Το μέγεθος της τετραγωνισμένης ψηφίδας αντιστοιχεί στην επιφάνεια του εδάφους που καλύπτει και κατ' επέκταση αποτελεί ένδειξη της ανάλυσης του ψηφιδωτού αρχείου. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος της ψηφίδας, τόσο υψηλότερη είναι η ανάλυση του αρχείου, δηλαδή η λεπτομέρεια της πληροφορίας. Από την άλλη πλευρά, όσο υψηλότερη είναι η ανάλυση, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αποθηκευτικός χώρος και το

υπολογιστικό σύστημα που απαιτείται. Τέλος, τα ψηφιδωτά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση τόσο διακριτών όσο και συνεχών μεταβλητών. Ωστόσο, ενδείκνυται κυρίως για την αναπαράσταση συνεχών μεταβλητών, όπως το υψόμετρο, η θερμοκρασία ή η βροχόπτωση.

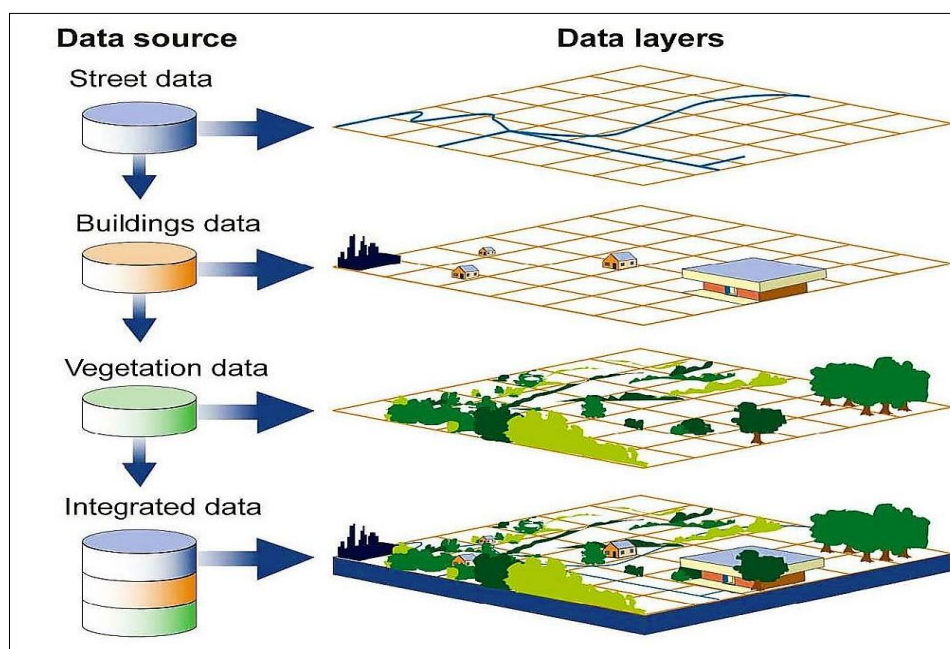
Τα διανυσματικά δεδομένα (vector datasets) αναπαριστούν τις γεωγραφικές οντότητες ως σημεία, γραμμές ή επιφάνειες-πολύγωνα. Τα όρια τους, και κατά συνέπεια και τα όρια των γεωγραφικών οντοτήτων που αναπαριστούν, προσδιορίζονται από τις συντεταγμένες που τους αποδίδονται. Προκειμένου να εισαχθεί ένα διανυσματικό αντικείμενο σε ένα Σ.Γ.Π., πρέπει να προσδιοριστεί η φύση του, δηλαδή αν πρόκειται για σημείο, γραμμή ή πολύγωνο, η θέση του στο χώρο, μέσω των συντεταγμένων του αρχικού και τελικού του σημείου, τα σημεία αλλαγής διεύθυνσης, που ονομάζονται κόμβοι, καθώς και τα σημεία από τα οποία αποτελείται. Η χρήση τους ενδείκνυται για την αναπαράσταση διακριτών μεταβλητών, όπως είναι τα διοικητικά όρια, οι δρόμοι, τα κτίρια, τα ποτάμια ή οι λίμνες. Η απόδοση τους στο χαρτογραφικό υπόβαθρο είναι καλύτερη από εκείνη των ψηφιδωτών δεδομένων, καθώς προσεγγίζουν περισσότερο τον πραγματικό κόσμο. Ωστόσο, με τα διανυσματικά δεδομένα δυσχεραίνεται η διαδικασία της υπέρθεσης διαφορετικών επιπέδων πληροφορίας. Τέλος, εκτός από χωρική πληροφορία για τις γεωγραφικές οντότητες, παρέχουν και αντίστοιχες περιγραφικές, οι οποίες αποθηκεύονται σε έναν πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών (attribute table).



Εικόνα 4.1: απεικόνιση μιας επιφάνειας 36 τετραγωνικών χιλιομέτρων (κάτω φωτογραφίες) με διανυσματικά δεδομένα και ψηφιδωτά δεδομένα μεγέθους 25 μέτρων και ενός χιλιομέτρου (Πηγή: ceh.ac.uk)

4.2.3 Λειτουργία ενός Σ.Γ.Π.

Πολύ βασική για την κατανόηση της λειτουργίας ενός Σ.Γ.Π. είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οργανώνονται τα δεδομένα σε αυτό. Τα δεδομένα σε ένα Σ.Γ.Π. αναπαρίστανται μέσω επιπέδων πληροφορίας (information layers), τα οποία μπορούν να παρομοιαστούν με διαφανείς σελίδες, καθεμία από τις οποίες περιέχει ένα διαφορετικό είδος πληροφορίας. Τα επίπεδα πληροφορίας τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο το ένα πάνω στο άλλο, ώστε στο αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτή την υπέρθεση να είναι εμφανές το σύνολο των πληροφοριών του καθενός από αυτά. Συνήθως, στην κορυφή τοποθετούνται τα επίπεδα σημειακής πληροφορίας, από κάτω τα επίπεδα γραμμικής πληροφορίας, έπειτα τα επίπεδα επιφανειακής πληροφορίας και τέλος τα ψηφιδωτά. Σημειώνεται, ότι πολλές φορές τα επίπεδα πληροφορίας διανυσματικών δεδομένων ταυτίζονται με τον όρο *shapefile*.



Εικόνα 4.2: Οργάνωση δεδομένων σε επίπεδα πληροφορίας. Από επάνω προς τα κάτω διακρίνονται τρία επίπεδα πληροφοριών, σχετικά με τους δρόμους, τα κτίρια και τη βλάστηση μιας περιοχής, αντίστοιχα. Το τελευταίο επίπεδο είναι το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των τριών προηγούμενων σε ένα. (Πηγή: nationalgeographic.org)

Για την δημιουργία μίας G.I.S. εφαρμογής, η οποία να καλύπτει συγκεκριμένες απαιτήσεις, ακολουθείται μία συγκεκριμένη σειρά ενεργειών, από τη συλλογή και την εισαγωγή των δεδομένων, έως την επεξεργασία και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Ευελπίδου & Αντωνίου , 2015). Αναλυτικότερα, οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα με τη σειρά, είναι οι εξής:

- Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων που θα εισαχθούν στο σύστημα είναι δυνατόν να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τη φύση των δεδομένων και την απαιτούμενη αξιοπιστία. Οι μέθοδοι συλλογής δεδομένων είναι πολυάριθμοι και συχνά ιδιαίτερα δαπανηροί. Η επιλογή του τρόπου συλλογής των δεδομένων στηρίζεται στη φύση της μελέτης, στην ειδίκευση του προσωπικού που χειρίζεται το Σ.Γ.Π., στις οικονομικές δυνατότητες του φορέα που υλοποιεί την έρευνα και στο βαθμό και ρυθμό ενημέρωσης των δεδομένων από την πρωτογενή πηγή συλλογής τους. Εξυπακούεται, ότι κατά την συλλογή δεδομένων καταβάλλεται προσπάθεια, ώστε αυτά να είναι λεπτομερή και ακριβή, καθώς αυτό αποτελεί τη βάση για την αντικειμενικότητα και την ισχύ των πορισμάτων σε κάθε επιστημονικό κλάδο.

- Εισαγωγή δεδομένων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι εισαγωγής των δεδομένων και η επιλογή του καταλληλότερου εξαρτάται από το είδος των δεδομένων. Οι κυριότεροι τρόποι εισαγωγής είναι: α) από την οθόνη του υπολογιστή, χρησιμοποιώντας το ποντίκι για την εισαγωγή των στοιχείων του χάρτη (σημεία, γραμμές, όρια επιφανειών), β) μέσω GPS (Σύστημα Παγκόσμιου Εντοπισμού Θέσης) και γ) μέσω επικοινωνίας του Σ.Γ.Π. με όργανα συνεχούς παρατήρησης και καταγραφής δεδομένων στο πεδίο.

Πολλές φορές, ιδιαίτερα όταν κάποιες πληροφορίες για τη σύνθεση του ζητούμενου χάρτη δεν είναι διαθέσιμες σε μορφή αρχείου έτοιμη να εισαχθεί στο λογισμικό, είναι επιτακτική η εισαγωγή εικόνων ή χαρτών, προκειμένου να αποτελέσουν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα γίνει ο σχεδιασμός των οντοτήτων που λείπουν. Οι οντότητες που σχεδιάζονται αποθηκεύονται σε επίπεδα πληροφορίας που δημιουργεί ο χρήστης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ψηφιοποίηση. Στην ουσία, η ψηφιοποίηση μετατρέπει τα ψηφιακά δεδομένα σε διανυσματικά (σημεία, γραμμές, επιφάνειες). Οι χάρτες, οι εικόνες και όλα τα δεδομένα που ενδέχεται να αποτελέσουν το υπόβαθρο, πάνω στο οποίο θα γίνει η ψηφιοποίηση, εισάγονται από την οθόνη του υπολογιστή σύμφωνα με τις ενδείξεις του εκάστοτε λογισμικού. Θα πρέπει να διευκρινιστεί, ότι πριν από την ψηφιοποίηση οντοτήτων, προηγείται η γεωαναφορά (georeference) των εισαχθέντων εικόνων ή χαρτών, έτσι ώστε να προσαρμοστούν στο σωστό σύστημα αναφοράς.

- Αποθήκευση Δεδομένων

Η αποθήκευση των δεδομένων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες και απαιτεί σωστή οργάνωση, προκειμένου να είναι δυνατή η βέλτιστη διαχείριση της αποθηκευμένης πληροφορίας. Συνήθως είναι

προτιμότερη η αποθήκευση των δεδομένων κατά ομάδες όμοιων χαρακτηριστικών, σε διαφορετικά επίπεδα πληροφορίας (layers), με σκοπό την αποδοτικότερη και απρόσκοπτη περαιτέρω διαχείριση και ανάλυση τους. Τα δεδομένα μπορεί να αποθηκεύονται είτε σε εσωτερική (ενσωματωμένη στο λογισμικό), είτε σε εξωτερική βάση δεδομένων.

- Διαχείριση δεδομένων

Τα επίπεδα πληροφορίας συνδέονται με βάσεις δεδομένων, στις οποίες αποθηκεύεται η περιγραφική πληροφορία των γεωγραφικών αντικειμένων. Ο χρήστης ορίζει ποια πεδία από την βάση δεδομένων πρέπει να εμφανίζονται, όταν ζητούνται πληροφορίες για αντικείμενα ενός συγκεκριμένου επιπέδου πληροφορίας. Τα Σ.Γ.Π. μπορούν να διαχειριστούν και ψηφιακές εικόνες, σε μορφή raster. Με τον τρόπο αυτόν, δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός ή η αναζήτηση στοιχείων, αλλά αφενός διευκολύνεται η συγκριτική παρατήρηση και αφετέρου είναι δυνατή η ψηφιοποίηση στοιχείων που λείπουν κατά τη διάρκεια μιας μελέτης, χωρίς να είναι απαραίτητη η ψηφιοποίηση όλων των στοιχείων εκ των προτέρων.

- Ανάκτηση δεδομένων

Η ανάκτηση της περιγραφικής πληροφορίας για μια γεωγραφική οντότητα γίνεται απλά με την επιλογή αυτής. Εάν επιλεγούν περισσότερες οντότητες, το Σ.Γ.Π. μπορεί να επεξεργαστεί τις αντίστοιχες γραμμές της βάσης δεδομένων και να εξάγει δευτερογενείς πληροφορίες από το συνδυασμό ή τη στατιστική επεξεργασία αυτών. Ένα Σ.Γ.Π. μπορεί να διαχειρίζεται περισσότερες από μία βάσεις δεδομένων, αλλά η δυσκολία και ο χρόνος επεξεργασίας και συσχετισμού τους αυξάνουν αναλογικά με το πλήθος τους και το πλήθος της πληροφορίας που είναι αποθηκευμένη σε καθεμία από αυτές.

- Επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων

Η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εργασιών, μερικές από τις οποίες είναι οι αναταξινομήσεις και ομαδοποιήσεις ποιοτικών στοιχείων, οι γεωμετρικές επεξεργασίες (μετατροπές κλίμακας, προβολικού συστήματος), οι μετρήσεις (αποστάσεων, εμβαδών, περιμέτρων) ή οι γεωγραφικές αναλύσεις (δημιουργία θεματικών χαρτών, δημιουργία ζωνών επιρροής).

- Παρουσίαση δεδομένων

Η παρουσίαση των δεδομένων, χωρικών ή ποσοτικών, επιτυγχάνεται με ένα ευρύ φάσμα ενεργειών και εργαλείων, είτε απευθείας στην οθόνη του υπολογιστή, είτε μέσω άλλων μέσων όπως είναι οι εκτυπωτές, οι plotters

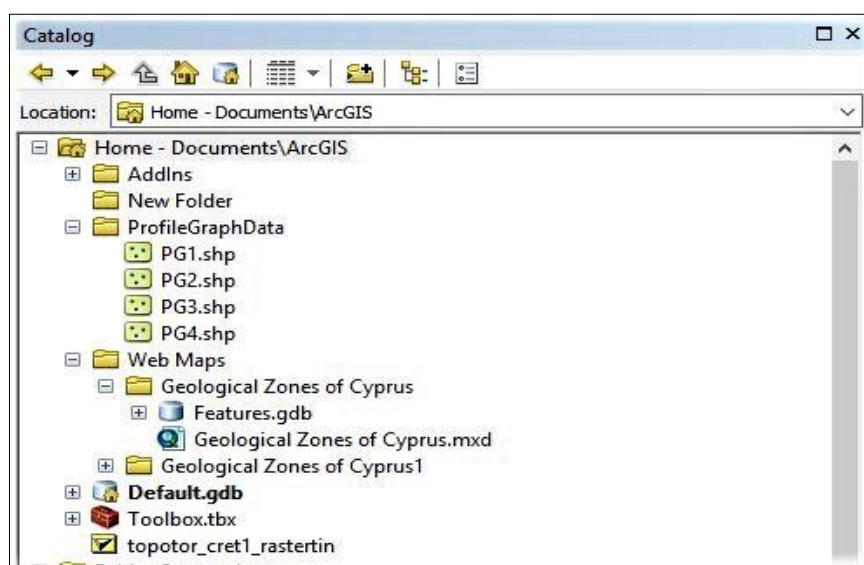
(σχεδιογράφοι για εκτυπώσεις μεγάλων μεγεθών), οι βιντεοπροβολείς ή το διαδίκτυο.

4.2.4 Περιγραφή του λογισμικού ArcGIS 10.3.1

Το ArcGIS είναι το πιο διαδεδομένο από τα λογισμικά Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Περιλαμβάνει ένα σύνολο από εφαρμογές που καλύπτουν όλες τις βασικές λειτουργίες της εισαγωγής, διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης γεωγραφικών δεδομένων. Οι σημαντικότερες εκ των εφαρμογών αυτών είναι οι ArcCatalog, ArcToolbox, Model Builder, ArcScene, ArcGlobe και ArcMap, οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

- ArcCatalog

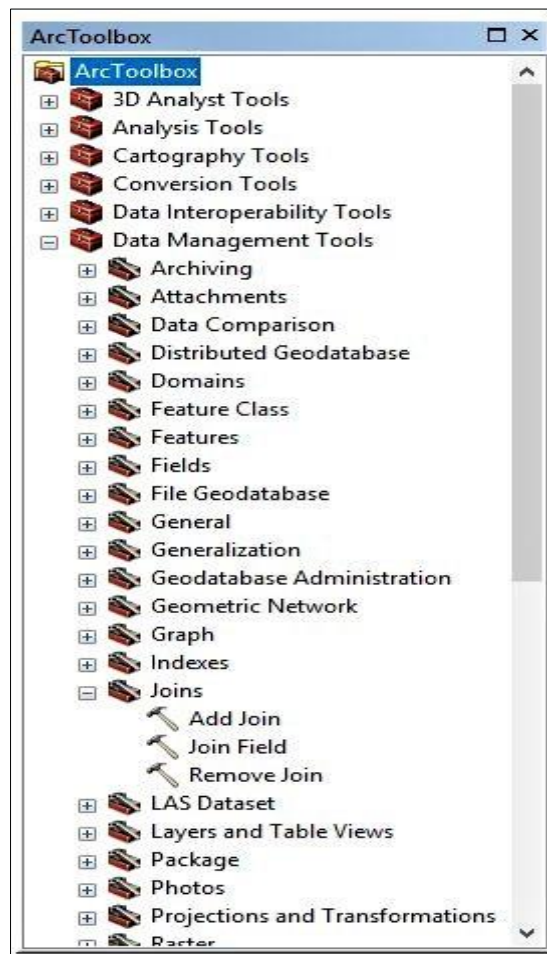
Η εφαρμογή ArcCatalog παρέχει ένα παράθυρο, που έχει τη μορφή καταλόγου, το οποίο χρησιμοποιείται για την οργάνωση και τη διαχείριση πολλών τύπων γεωγραφικών πληροφοριών, που χρησιμοποιούνται στο ArcGIS. Πιο συγκεκριμένα, οι τύποι των πληροφοριών αυτών μπορεί να είναι γεωβάσεις, raster αρχεία, χάρτες, έγγραφα παγκόσμιας εμβέλειας, 3D απεικονίσεις, αρχεία θεματικών επιπέδων (layers), εργαλειοθήκες γεωεπεξεργασίας, μοντέλα, κώδικες Python ή μεταδεδομένα για γεωγραφικές πληροφορίες. Όλες οι παραπάνω πληροφορίες τοποθετούνται σε μια διάταξη που έχει τη μορφή δέντρου, ώστε ο χρήστης να μπορεί να επιλέξει οποιαδήποτε από αυτές, να δει τις ιδιότητες της και να την επεξεργαστεί. Σημειώνεται, ότι αντί της εφαρμογής ArcCatalog ο χρήστης μπορεί εναλλακτικά να ανοίξει και να χρησιμοποιήσει το παράθυρο Catalog, που είναι ενσωματωμένο στις εφαρμογές ArcMap, ArcScene και ArcGlobe.



Εικόνα 4.3: Το παράθυρο Catalog εντός της εφαρμογής ArcMap

- ArcToolbox

Το ArcToolbox αποτελείται από μια ολοκληρωμένη συλλογή εργαλείων, απαραίτητων για την εκτέλεση μιας προηγμένης εργασίας σε έναν συγκεκριμένο τομέα. Τα εργαλεία είναι ταξινομημένα σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος της λύσης που παρέχουν. Το παράθυρο του ArcToolbox ενεργοποιείται μέσα από το περιβάλλον των εφαρμογών ArcCatalog και ArcMap.



Εικόνα 4.4: Το παράθυρο Arc Toolbox

- Model Builder

Η εφαρμογή Model Builder χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και την τροποποίηση μοντέλων γεωεπεξεργασίας. Με τον όρο μοντέλο νοείται ένα διάγραμμα ροής (workflow) στο οποίο απεικονίζεται η αλληλουχία των διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν για την παραγωγή ενός τελικού αποτελέσματος. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα δεδομένα που

εισήχθησαν προς επεξεργασία, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για να επεξεργαστούν τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων. Η αλληλουχία επιτυγχάνεται καθώς το αποτέλεσμα που προκύπτει από την χρήση του κάθε εργαλείου χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου του επόμενου εργαλείου. Το πλεονέκτημα που προσφέρει η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ότι ο χρήστης είναι σε θέση να τρέξει ολόκληρο ή τμήμα του μοντέλου οποιαδήποτε στιγμή, έχοντας την δυνατότητα να αλλάζει όποιο από τα δεδομένα ή εργαλεία θέλει, χωρίς να χρειάζεται να κάνει κάθε φορά όλες τις διαδικασίες από την αρχή.

- ArcScene

Το ArcScene είναι μια εφαρμογή που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των χωρικών δεδομένων σε τρεις διαστάσεις. Τα δεδομένα απεικονίζονται με την μορφή επιπέδων πληροφορίας, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση των δύο διαστάσεων. Η τρίτη διάσταση προκύπτει από υψομετρικά δεδομένα που αντλούνται από τα καταγεγραμμένα χαρακτηριστικά των διαφόρων οντοτήτων ή από μια ήδη καθορισμένη τρισδιάστατη επιφάνεια.

- ArcGlobe

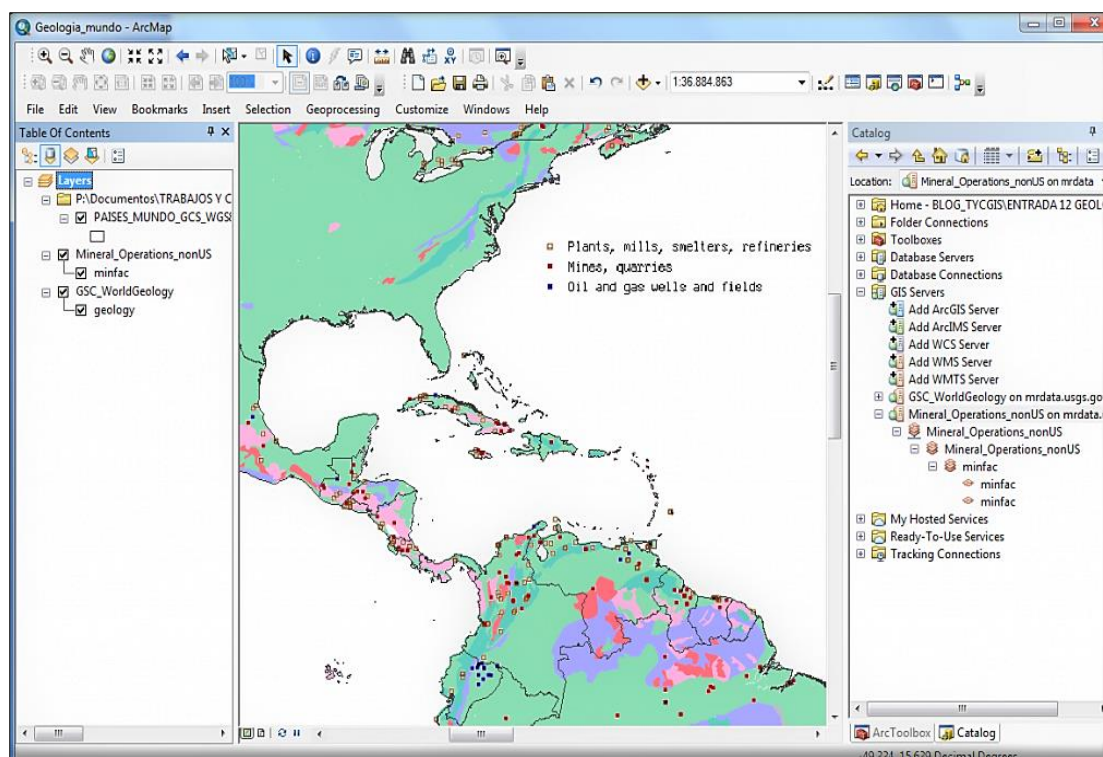
Το ArcGlobe αποτελεί την δεύτερη από τις δύο εφαρμογές τρισδιάστατης απεικόνισης που υποστηρίζει το ArcGIS. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή τα δεδομένα τοποθετούνται στην πραγματική γεωδαιτική τους θέση επάνω στην τρισδιάστατη επιφάνεια της Γής. Ο χρήστης μπορεί να εξερευνήσει τον κόσμο στο σύνολο του, καθώς και να επεξεργαστεί τα δεδομένα που απεικονίζονται, εστιάζοντας ανάλογα κάθε φορά (Χατζηχρήστος & Μαρσέλη, 2013).

- ArcMap

Το περιβάλλον του ArcMap αποτελεί την κεντρική εφαρμογή του λογισμικού ArcGIS. Οι προδιαγραφές του δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιεί ένα πολύ μεγάλο εύρος διαδικασιών, που συμπεριλαμβάνουν την απεικόνιση, την επεξεργασία, τη δημιουργία και την ανάλυση των γεωχωρικών δεδομένων. Επιπλέον, οι εφαρμογές ArcCatalog, ArcToolbox και Model Builder, εκτός από την ανεξάρτητη λειτουργία τους, είναι εγκατεστημένες και εντός αυτού, έτσι ώστε να μπορούν να ενεργοποιηθούν άμεσα και να διευκολύνουν τις διαδικασίες, που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Κύρια τμήματα του περιβάλλοντος εργασίας του ArcMap είναι ο πίνακας περιεχομένων (Table of Contents), η περιοχή εμφάνισης του χάρτη, το παράθυρο Catalog ή η εργαλειοθήκη Toolbox, ανάλογα με τη βούληση του χρήστη, καθώς και η ράβδος μηνυμάτων. Το παράθυρο Catalog και η εργαλειοθήκη Toolbox έχουν ήδη αναλυθεί στις προηγούμενες παραγράφους.

Από τα υπόλοιπα, ο πίνακας περιεχομένων είναι στην ουσία ένα παράθυρο στο οποίο συγκεντρώνονται όλα τα επίπεδα πληροφορίας (layers) που ο χρήστης έχει επιλέξει να απεικονίζονται στην περιοχή εμφάνισης του χάρτη. Κάθε επίπεδο πληροφορίας κατατάσσεται εκεί με ένα όνομα και ένα σύμβολο. Επιπλέον, ο εν λόγω πίνακας δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τα επίπεδα πληροφορίας που τοποθετεί σε αυτόν, αλλά και να έχει πρόσβαση στις ιδιότητες τους, προκειμένου να μπορεί να τα επεξεργαστεί. Στην ουσία, ο πίνακας περιεχομένων παρέχει πρόσβαση στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) των επιπέδων πληροφορίας που αποτελούνται από διανυσματικά δεδομένα. Στον πίνακα αυτόν (attribute table) κάθε στήλη περιλαμβάνει ένα διαφορετικό είδος πληροφορίας (πεδίο), ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε διαφορετική οντότητα του επιπέδου πληροφορίας. Τα διάφορα είδη πληροφορίας που καταγράφονται στις στήλες ενός πίνακα ιδιοτήτων μπορεί να αφορούν το μέγεθος, τη γεωμετρία ή τον μοναδικό αύξοντα αριθμό (ID) που αποδίδεται σε κάθε οντότητα του εκάστοτε επιπέδου πληροφορίας, καθώς και άλλες περιγραφικές πληροφορίες σχετικά με αυτές.



Εικόνα 4.5: Επιφάνεια εργασίας του ArcMap, στην οποία αριστερά διακρίνεται το παράθυρο Table Of Contents, στο κέντρο η περιοχή εμφάνισης του χάρτη και δεξιά το παράθυρο Catalog. (Πηγή: giscourse.com)

OBJECTID *	Shape *	FID_Natura2000_End2011_Projected	SITECODE	SITENAME
1	Polygon	7112	GR4310004	DYTIKA ASTEROUSIA (APO AGIOFARANGO EOS KOKKINO PYRGO)
2	Polygon	7118	GR4310012	EKVOLI GEROPOTAMOU MESARAS
3	Polygon	7119	GR4310013	ASTEROUSIA ORI (KOFINAS)
4	Polygon	7133	GR4330002	OROS KEDROS
5	Polygon	7135	GR4330004	PRASSANO FARANGI - PATSOS - SFAKORYAKO REMA - PARALIA RETHYMNOU KAI
6	Polygon	7136	GR4330005	OROS IDI (VORIZIA, GERANOI, KALI MADARA)
7	Polygon	7137	GR4330006	SOROS - AGKATHI - KEDROS
8	Polygon	7138	GR4330007	KOURTALIOTIKO FARANGI, FARANGI PREVELI
9	Polygon	7148	GR4340008	LEFKA ORI KAI PARAKTIA ZONI
10	Polygon	7149	GR4340010	DRAPANO (VOREIDANATOLIKES AKTES) - PARALIA GEORGIOPOLIS - LIMNI KOURNA
11	Polygon	7150	GR4340011	FRE - TZITZIFES - NIPOS
12	Polygon	7151	GR4340012	ASFENDOU - KALLIKRATIS KAI PARAKTIA ZONI
13	Polygon	7161	GR4340022	LIMNI KOURNA KAI EKVOLI ALMYROU
14	Polygon	7112	GR4310004	DYTIKA ASTEROUSIA (APO AGIOFARANGO EOS KOKKINO PYRGO)
15	Polygon	7118	GR4310012	EKVOLI GEROPOTAMOU MESARAS
16	Polygon	7115	GR4310009	KROUSONAS - VROMONERO IDIS
17	Polygon	7136	GR4330005	OROS IDI (VORIZIA, GERANOI, KALI MADARA)
18	Polygon	7133	GR4330002	OROS KEDROS
19	Polygon	7137	GR4330006	SOROS - AGKATHI - KEDROS
20	Polygon	7134	GR4330003	KOURTALIOTIKO FARANGI - MONI PREVELI - EVRYTERI PERIOCHI

Εικόνα 4.6: Πίνακας ιδιοτήτων (Attribute table)

Όσον αφορά τη ράβδο μηνυμάτων, αυτή είναι η περιοχή όπου εμφανίζονται μηνύματα, όπως για παράδειγμα οι συντεταγμένες του χάρτη, κατά την εκτέλεση των διαφόρων λειτουργιών. Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην περιοχή εμφάνισης του χάρτη, παρουσιάζονται τα επίπεδα πληροφορίας που είναι ενεργοποιημένα στον πίνακα περιεχομένων. Πιο συγκεκριμένα, το ArcMap δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης των δεδομένων σε δύο διαφορετικές προβολές, την Data View και την Layout View. Όπως και σε άλλα σχεδιαστικά προγράμματα, η Data View είναι η προβολή στην οποία γίνεται το σύνολο των επεξεργασιών, ενώ η Layout View χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της τελικής μορφής του χάρτη, πριν την εκτύπωση ή την εξαγωγή του.

Εκτός από όλα τα παραπάνω, ιδιαίτερα χρήσιμες για την διεκπεραίωση εργασιών είναι και οι παροχές του παραθύρου αναζήτησης (Search window), καθώς και των γραμμών εργαλείων (Toolbars), που δεν είναι τοποθετημένες στη βασική γραμμή εργαλείων στο επάνω μέρος της επιφάνειας εργασίας του ArcMap. Όσον αφορά το παράθυρο αναζήτησης, αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναζητήσει χάρτες, δεδομένα, εργαλεία ή εικόνες, πληκτρολογώντας απλώς το όνομα τους στο κατάλληλο πλαίσιο. Η δυνατότητα αυτή τον απαλλάσσει από την χρονοβόρα αναζήτηση των παραπάνω στα παράθυρα Catalog και ArcToolbox.

Από την άλλη, οι γραμμές εργαλείων βοηθούν τον χρήστη να εκτελέσει μια ομάδα συναφών εργασιών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως

οι γραμμές εργαλείων Editor, Georeferencing και 3D Analyst. Η γραμμή εργαλείων Editor περιλαμβάνει ένα σύνολο εντολών και εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία δεδομένων. Με τη βοήθεια αυτών ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει την έναρξη και τη λήξη της επεξεργασίας του εκάστοτε δεδομένου, να δημιουργήσει νέες οντότητες (ψηφιοποίηση), να τροποποιήσει τις υπάρχουσες, ως προς τη χωρική ή περιγραφική συνιστώσα τους, και να αποθηκεύσει κάθε αλλαγή που πραγματοποιεί. Η γραμμή εργαλείων Georeferencing περιέχει εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την γεωαναφορά των raster και cad αρχείων. Τέλος, η γραμμή εργαλείων 3D Analyst περιέχει ένα σύνολο εργαλείων, τα οποία εφαρμόζονται σε επιφάνειες με γνωστή υψομετρική διάσταση. Τα εργαλεία αυτά εξυπηρετούν τον υπολογισμό του υψομέτρου ψηφιοποιημένων σημείων, γραμμών ή πολυγώνων, μέσα από διαδικασίες παρεμβολής, τη δημιουργία ισούψων καμπυλών ή μηκοτομών, καθώς και πολλές άλλες εργασίες.

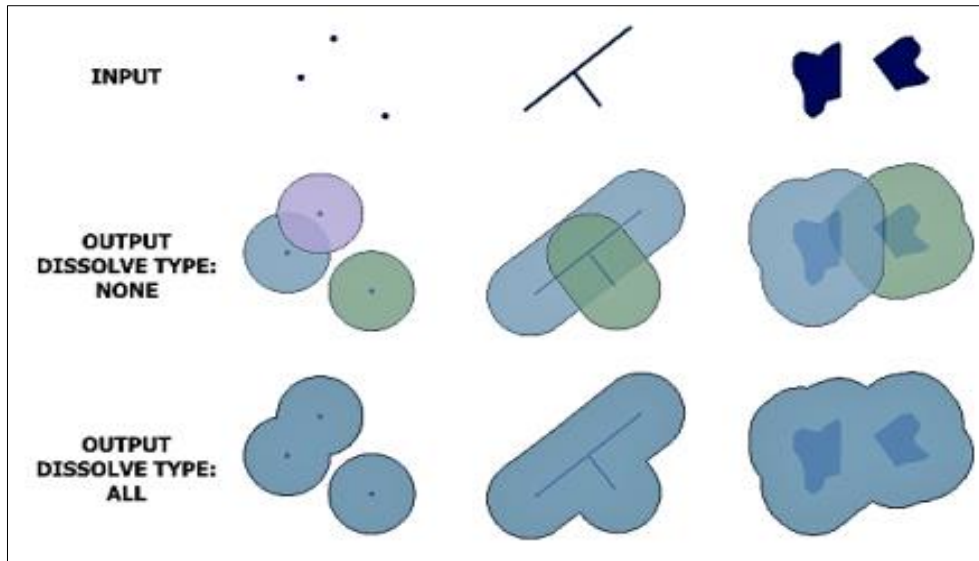
4.2.5 Βασικά εργαλεία του λογισμικού ArcGIS που χρησιμοποιήθηκαν

- Add Field

Το εργαλείο Add Field χρησιμοποιείται για την προσθήκη ενός πεδίου, δηλαδή μιας στήλης, στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) ενός επιπέδου πληροφορίας, όταν κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη κάποιας επιπρόσθετης περιγραφικής πληροφορίας.

- Buffer

Με τη βοήθεια του εργαλείου Buffer δημιουργούνται ζώνες επιρροής, δηλαδή νέα πολύγωνα, γύρω από κάθε οντότητα ενός επιπέδου πληροφορίας. Αν πρόκειται για σημειακή οντότητα, η ζώνη επιρροής είναι ένας κύκλος με κέντρο την οντότητα αυτή. Αντίστοιχα, αν πρόκειται για γραμμικές ή πολυγωνικές οντότητες, οι ζώνες επιρροής προκύπτουν εάν χαραχθεί η παράλληλη της κάθε πλευράς, σε μια συγκεκριμένη απόσταση από αυτήν. Το εύρος των ζωνών, δηλαδή το μέτρο της ακτίνας ή η απόσταση στην οποία θα χαραχθούν οι παράλληλες γραμμές, αντίστοιχα, καθορίζεται από το χρήστη, ανάλογα με το σκοπό της εργασίας.



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση της μορφής της ζώνης επιρροής ανάλογα με τη γεωμετρία των εισαγόμενων οντοτήτων (Πηγή: desktop.arcgis.com)

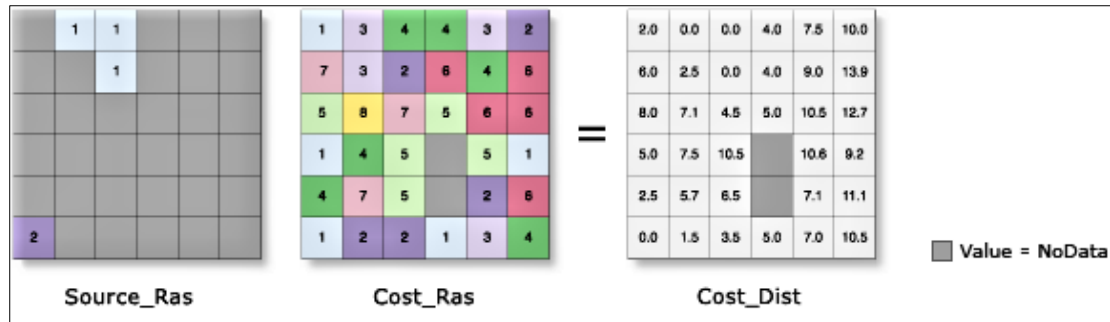
- Calculate Field

Μέσω του εργαλείου Calculate Field συμπληρώνονται οι τιμές μιας στήλης στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) ενός επιπέδου πληροφορίας (layer). Προκειμένου να επιτευχθεί η συμπλήρωση, δηλαδή να υπολογιστεί η τιμή της μεταβλητής που αντιπροσωπεύει την πληροφορία που παρέχει η στήλη σε κάθε γραμμή, ο χρήστης καλείται να παράγει απλές εκφράσεις κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού SQL. Στην περίπτωση που για τον υπολογισμό της μεταβλητής απαιτούνται πιο σύνθετες εκφράσεις, ο κώδικας γράφεται συνήθως σε γλώσσα Python.

- Cost Distance

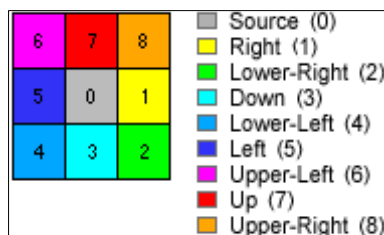
Το εργαλείο Cost Distance παράγει ένα ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας και υπολογίζει για κάθε κελί του το ελάχιστο συνολικό κόστος που απαιτείται για τη μετακίνηση από αυτό το κελί σε κάποια συγκεκριμένη τοποθεσία (source). Το κόστος μπορεί να μετράται σε μονάδες χρόνου, χρήματος, ενέργειας που δαπανείται για τη μετακίνηση, αρνητικής επίπτωσης στο φυσικό περιβάλλον, αρνητικής επίπτωσης στο ανθρώπινο περιβάλλον ή και σε συνδυασμό των παραπάνω. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση του κόστους, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει στο εργαλείο ένα επίπεδο πληροφορίας που να περιέχει την τοποθεσία ή τις τοποθεσίες (source locations), που αποτελούν τον προορισμό της μετακίνησης από το κάθε κελί, καθώς και μια επιφάνεια κόστους (cost surface). Η επιφάνεια κόστους είναι στην ουσία ένα ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας, στο οποίο η τιμή του κάθε κελιού αντιπροσωπεύει το

συνολικό σταθμισμένο κόστος που απαιτείται για τη μετακίνηση ως προς οποιαδήποτε κατεύθυνση εντός της επιφάνειας που καλύπτει. Στην παρούσα εργασία ως επιφάνειες κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του εργαλείου raster calculator, που αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 4.8: Απεικόνιση της διαδικασίας που ακολουθεί το εργαλείο Cost Distance. Αριστερά παρατηρούνται τα εισαγόμενα επίπεδα πληροφορίας και δεξιά το εξαγόμενο. (Πηγή: desktop.arcgis.com)

Εκτός από το παραπάνω εξαγόμενο ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας, το εργαλείο παράγει προαιρετικά και το ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας backlink, προκειμένου να υποδείξει και την κατεύθυνση προς την τοποθεσία που εξετάζεται κάθε φορά (source). Στο επίπεδο αυτό, κάθε κελί λαμβάνει μία τιμή από το 0 έως το 8, η οποία υποδηλώνει την κατεύθυνση προς το γειτονικό κελί με το μικρότερο κόστος. Στην ουσία, το ψηφιδωτό backlink προσδιορίζει τη διαδρομή ελαχίστου κόστους που πρέπει να ακολουθηθεί από οποιοδήποτε κελί για την προσέγγιση της τοποθεσίας-πηγής (source).



Εικόνα 4.9: Κωδικοποίηση των διευθύνσεων με αριθμούς από το 0 έως το 8 (Πηγή: pro.arcgis.com)

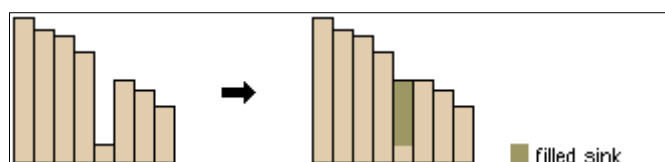
- Cost Path

Το εργαλείο Cost Path χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της διαδρομής ελαχίστου κόστους ανάμεσα σε δύο καθορισμένα σημεία, το σημείο έναρξης

(source) και το σημείο προορισμού (destination). Για την επίτευξη του καθορισμού αυτού, θα πρέπει πρώτα να έχουν προηγηθεί οι εργασίες με το εργαλείο *cost distance*, όπως ακριβώς περιγράφονται στην αντίστοιχη παράγραφο. Έπειτα, στο εργαλείο *cost path* εισάγεται ένα επίπεδο πληροφορίας που περιλαμβάνει το σημείο προορισμού (destination), καθώς και τα δύο εξαγόμενα ψηφιδωτά επίπεδα πληροφορίας του εργαλείου *cost distance*, δηλαδή το επίπεδο που περιλαμβάνει το ελάχιστο κόστος για κάθε κελί και το επίπεδο *backlink*. Από την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου, και πιο συγκεκριμένα την ένωση των κέντρων των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους, παράγεται το επίπεδο πληροφορίας που περιέχει τη διαδρομή ελαχίστου κόστους ανάμεσα στο σημείο έναρξης και το σημείο προορισμού.

- **Fill**

Το εργαλείο *Fill* στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το εργαλείο *Topo to Raster*. Πιο συγκεκριμένα, κατά την παραγωγή των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM) από το εργαλείο *Topo to Raster*, ανάλογα με την ανάλυση των εισαγόμενων δεδομένων, πολλές φορές δημιουργούνται απότομες βυθίσεις (*sinks*) στο ανάγλυφο, οι οποίες δεν είναι ρεαλιστικές. Το πρόβλημα των βυθίσεων μπορεί να εξαλειφθεί με τη βοήθεια του εργαλείου *Fill*, το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να τις γεμίζει, αποδίδοντας τους ένα πιο ρεαλιστικό υψόμετρο.



Εικόνα 4.10: Μηκοτομή στην οποία απεικονίζεται μια βύθιση (sink) πριν και μετά τη χρήση του εργαλείου Fill (Πηγή: pro.arcgis.com)

- **Interpolate Line & Profile Graph**

Τα δύο αυτά εργαλεία είναι μέρος της γραμμής εργαλείων *3D Analyst* (*3D Analyst Toolbar*). Με τη βοήθεια τους μπορεί να παραχθεί η μηκοτομή μιας συγκεκριμένης γραμμικής οντότητας ή γενικότερα η μηκοτομή που αντιστοιχεί σε κάποια γραμμή που θα σχηματίσει ο χρήστης, πάνω σε μια καθορισμένη επιφάνεια. Η διαδικασία, που πρέπει να ακολουθηθεί, ξεκινάει με τη χρήση του εργαλείου *Interpolate Line* και το σχηματισμό μιας ευθείας γραμμής στην περιοχή ενδιαφέροντος. Σημειώνεται, ότι ο σχηματισμός της γραμμής θα πρέπει να γίνει πάνω σε κάποια επιφάνεια που να διαθέτει υψομετρική πληροφορία, όπως είναι για παράδειγμα τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM).

Έπειτα, επιλέγοντας τη γραμμή αυτή και πατώντας το κουμπί Profile Graph προκύπτει το διάγραμμα της μηκοτομής, σε ξεχωριστό παράθυρο στο περιβάλλον του ArcMap. Με τη βοήθεια των ιδιοτήτων του παραθύρου, ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει το διάγραμμα και να επεξεργαστεί τα γραφικά στοιχεία του. Αυτό που στην ουσία υλοποιεί το εργαλείο Interpolate Line είναι να λαμβάνει την υψομετρική πληροφορία της εκάστοτε επιφάνειας και μέσω παρεμβολής να υπολογίζει το υψόμετρο για κάθε σημείο της σχηματιζόμενης γραμμής. Συνήθως χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των υψομέτρων.

- Intersect

Το εν λόγω εργαλείο δέχεται σαν δεδομένο εισόδου ένα σύνολο επιπέδων πληροφορίας και παράγει και αποθηκεύει σε ένα νέο επίπεδο πληροφορίας την γεωμετρική τομή τους. Ουσιαστικά, στο νέο επίπεδο (layer) καταγράφονται όσες οντότητες επικαλύπτονται με άλλες, σε όλα τα εισαγόμενα επίπεδα πληροφορίας.

- Polygon to raster

Το εργαλείο Polygon to Raster χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τα διανυσματικά χωρικά δεδομένα σε ψηφιδωτά. Καθώς τα διανυσματικά χωρικά δεδομένα συνδέονται με διάφορες περιγραφικές πληροφορίες στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table), ενώ τα ψηφιδωτά αντιπροσωπεύουν μόνο ένα είδος πληροφορίας, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει ποια από τις περιγραφικές πληροφορίες θέλει να διατηρηθεί μετά τη μετατροπή, δηλαδή ποιο θα είναι το περιεχόμενο του εξαγόμενου ψηφιδωτού επιπέδου πληροφορίας. Η διαδικασία με την οποία θα αποδοθεί σε κάθε κελί μια τιμή, που θα αντιπροσωπεύει την περιγραφική πληροφορία που επιλέχθηκε, μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικές μεθόδους, τη μέθοδο της κεντρικής ανάθεσης (cell center), τη μέθοδο της μέγιστης επιφάνειας (maximum area) και τη μέθοδο της μέγιστης συνδυαζόμενης επιφάνειας (maximum combined area). Στην παρούσα εργασία, κατά τις μετατροπές διανυσματικών δεδομένων σε ψηφιδωτή μορφή, επιλέχθηκε η μέθοδος της κεντρικής ανάθεσης, σύμφωνα με την οποία σε κάθε κελί αποδίδεται η τιμή της οντότητας εκείνης που διέρχεται από το κέντρο του.

- Project

Το εργαλείο Project χρησιμοποιείται για την αναγωγή των χωρικών δεδομένων από ένα σύστημα συντεταγμένων σε ένα άλλο. Η διαδικασία αυτή είναι κυρίως απαραίτητη, όταν τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό έχουν αποτυπωθεί σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων και πρέπει να

συσχετιστούν μεταξύ τους προκειμένου ο χρήστης να μπορεί να τα επεξεργαστεί ορθά.

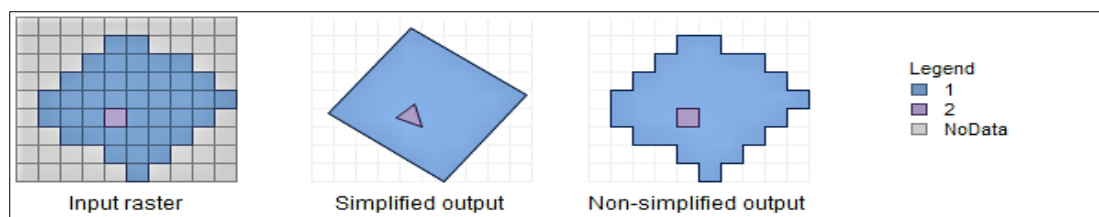
- Raster calculator

Με τη βοήθεια του εργαλείου Raster Calculator συντάσσονται και εκτελούνται αλγεβρικές εκφράσεις μεταξύ ψηφιδωτών επιπέδων πληροφορίας. Οι εκφράσεις αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν αριθμητικές πράξεις ή και συναρτήσεις. Προκειμένου να διευκολυνθεί η διατύπωση τους, το εργαλείο παρέχει στο χρήστη αριθμομηχανή, με τα κύρια αριθμητικά και αλγεβρικά σύμβολα, καθώς και μια σειρά από έτοιμες συναρτήσεις.

Πέρα από τις ποικίλες χρήσεις του, το εργαλείο Raster Calculator μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτέλεση σταθμισμένων πολυκριτηριακών αναλύσεων, όπως συνέβη και στην παρούσα εργασία. Στις περιπτώσεις αυτές, καθένα από τα επίπεδα πληροφοριών που εισάγεται αντιπροσωπεύει ένα ξεχωριστό κριτήριο και για το λόγο αυτό πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή βαρύτητας που του αναλογεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Το άθροισμα των γινομένων, που προκύπτουν, δίνει το αποτέλεσμα της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Σημειώνεται, ότι πριν από την εισαγωγή τους στο εργαλείο, οι τιμές των ψηφιδωτών επιπέδων πληροφορίας αντιστοιχίζονται σε τιμές από μια συγκεκριμένη κλίμακα, με τη βοήθεια του εργαλείου Reclassify. Η αναταξινόμηση αυτή πραγματοποιείται, προκειμένου κάθε τιμή κάθε επιπέδου πληροφορίας να δηλώνει συγκεκριμένο μέγεθος της μεταβλητής που μελετάται. Αν για παράδειγμα μελετάται η καταλληλότητα μιας περιοχής για τη χωροθέτηση μιας εγκατάστασης και οι τιμές των διαφόρων οντοτήτων κάθε επιπέδου πληροφορίας αντιστοιχιστούν σε κάποια τιμή της κλίμακας 1 έως 10, τότε κάθε οντότητα που θα έχει την τιμή 1 θα θεωρείται ως λιγότερο κατάλληλη και κάθε τιμή που έχει την τιμή 10 ως περισσότερο, ή το αντίστροφο.

- Raster to polygon

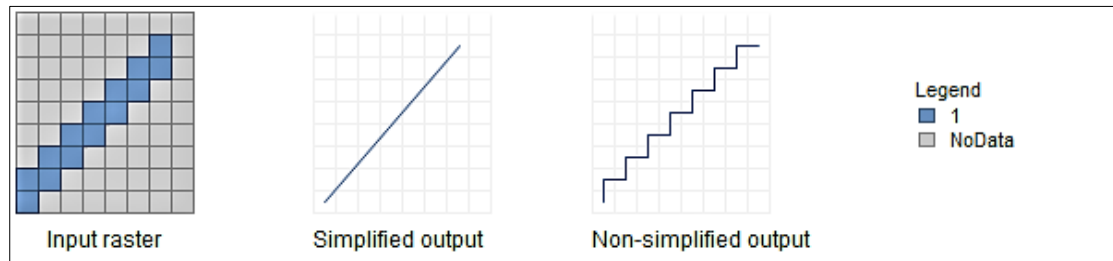
Το εργαλείο Raster to Polygon μετατρέπει τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής σε πολυγωνικές οντότητες.



Εικόνα 4.11: Διαδικασία μετατροπής του ψηφιδωτού αρχείου εισόδου σε διανυσματική, απλοποιημένη και μη απλοποιημένη, μορφή (Πηγή: pro.arcgis.com)

- Raster to polyline

Το εργαλείο Raster to Polyline είναι κατάλληλο για τη μετατροπή γραμμικών δεδομένων ψηφιδωτής μορφής σε γραμμικά δεδομένα διανυσματικής μορφής.



Εικόνα 4.12: Διαδικασία διανυσματοποίησης ενός γραμμικού δεδομένου ψηφιδωτής μορφής (Πηγή: pro.arcgis.com)

- Reclassify

Το εργαλείο Reclassify αναταξινομεί ή αλλάζει τις τιμές των κελιών των ψηφιδωτών δεδομένων. Η αναταξινόμηση μπορεί να γίνει σε κάθε τιμή ξεχωριστά ή ανά ομάδες τιμών, με βάση κάποιο κριτήριο. Οι διαθέσιμες μέθοδοι ταξινόμησης στο πρόγραμμα είναι πολλές. Ένας από τους πιο συνηθισμένους λόγους που καθιστά τη διαδικασία της αναταξινόμησης αναγκαία, και αποτέλεσε και την αιτία χρήσης του συγκεκριμένου εργαλείου στην παρούσα εργασία, είναι η αντιστοίχιση των υπαρχόντων τιμών με κάποια τιμή από ένα συγκεκριμένο εύρος, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο που αναλύεται το εργαλείο Raster Calculator. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται, όταν στο εξαγόμενο επίπεδο πληροφορίας τα μεγέθη της εξεταζόμενης μεταβλητής που αντιστοιχούν στις διάφορες οντότητες πρέπει να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, η κατώτερη τιμή του εύρους αντιστοιχεί στο κατώτερο μέγεθος της εξεταζόμενης μεταβλητής, ενώ αντίστοιχα η μεγαλύτερη στο μεγαλύτερο.

- Select

Στις περιπτώσεις που ο χρήστης επιθυμεί να αποσπάσει κάποιες από τις χωρικές οντότητες ενός επιπέδου πληροφορίας, προκειμένου να μπορεί να τις διαχειριστεί ανεξάρτητα, χρησιμοποιεί το εργαλείο Select. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης καλείται να εισάγει στο εργαλείο το επίπεδο πληροφορίας που περιέχει τις οντότητες που πρέπει να αποσπαστούν και να δημιουργήσει μια έκφραση σε γλώσσα προγραμματισμού SQL, μέσω της οποίας θα δηλώνει το κριτήριο, με βάση το οποίο το εργαλείο θα κάνει την επιλογή των οντοτήτων αυτών. Οι οντότητες που αποσπώνται αποθηκεύονται σε νέο επίπεδο πληροφορίας.

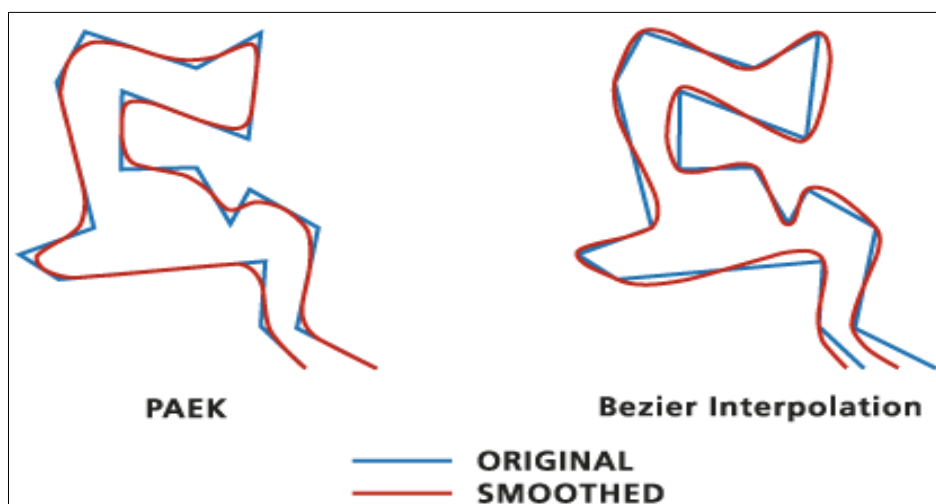
- Slope

Το εργαλείο Slope χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των κλίσεων μιας περιοχής. Για την επίτευξη της εκτίμησης αυτής, ο χρήστης καλείται να εισάγει στο εργαλείο κάποιο ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας, που να περιλαμβάνει υψομετρικές πληροφορίες των οντοτήτων που απεικονίζονται σε αυτό. Έπειτα, οι κλίσεις προκύπτουν μέσα από μια διαδικασία, όπου το εργαλείο για κάθε κελί εντοπίζει τη μέγιστη από τις τιμές των ρυθμών μεταβολής της μεταβλητής z, που προκύπτουν ανάμεσα στο κελί αυτό και τα οκτώ γειτονικά του. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει, εάν στα εξαγόμενα αποτελέσματα η τιμή, που θα αποδοθεί σε κάθε κελί, θα αντιπροσωπεύει το μέγεθος της γωνίας κλίσης σε μοίρες (Degree) ή το μέγεθος της εφαπτομένης της γωνίας κλίσης, πολλαπλασιασμένο με την τιμή 100 (Percent Rise). Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στην παρούσα εργασία, τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύουν τη γωνία κλίσης σε μοίρες και το κάθε κελί λαμβάνει τιμές από 0 έως 90.

- Smooth line

Το εργαλείο Smooth Line χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητη η εξομάλυνση των αιχμηρών γωνιών κάποιου γραμμικού πολυγωνικού στοιχείου, προκειμένου να βελτιωθεί η αισθητική και χαρτογραφική ποιότητα. Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω εργαλείο υποστηρίζει δύο αλγόριθμους εφαρμογής της εξομάλυνσης, τον αλγόριθμο πολυωνυμικής προσέγγισης με εκθετική συνάρτηση Kernel, που συνηθίζεται να αποκαλείται ΡΑΕΚ (Polynomial Approximation with Exponential Kernel), και τον αλγόριθμο παρεμβολής Bezier (Bezier Interpolation). Αρχικά, ο αλγόριθμος ΡΑΕΚ παράγει ομαλοποιημένες γραμμές, μετακινώντας τις κορυφές της αρχικής γραμμής. Σημειώνεται, ότι είναι πιθανόν μια νέα γραμμή να αποτελείται από περισσότερες κορυφές από ότι η αρχική. Οι συντεταγμένες κάθε σημείου της ομαλοποιημένης γραμμής υπολογίζονται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των συντεταγμένων όλων των υπολοίπων σημείων. Το βάρος που αποδίδεται στα υπόλοιπα σημεία, έτσι ώστε να προκύψει ο σταθμισμένος μέσος όρος, μειώνεται, όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο, του οποίου οι συντεταγμένες υπολογίζονται κάθε φορά. Επιπλέον, η ποιότητα της εξαγόμενης ομαλοποιημένης γραμμής εξαρτάται από την παράμετρο ανοχής (smoothing tolerance), που καθορίζει ο χρήστης. Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει το μήκος μεταξύ των νέων κορυφών, κατά μήκος της καμπύλης που σχηματίζεται στη θέση κάποιας αιχμηρής γωνίας. Όσο μικρότερο είναι το μήκος, τόσες περισσότερες πληροφορίες από την αρχική γραμμή διατηρούνται. Από την άλλη πλευρά, ο αλγόριθμος παρεμβολής Bezier διατηρεί τις κορυφές της αρχικής γραμμής στην εξαγόμενη ομαλοποιημένη γραμμή. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτόν σε κάθε γραμμικό τμήμα της εισαχθείσας πολυγωνικής γραμμής

προσαρμόζονται καμπύλες Bezier (Bezier curves). Έπειτα, χρησιμοποιούνται εφαπτόμενες Bezier (Bezier tangent), προκειμένου να συνδέσουν τις παραπάνω καμπύλες με ομαλό τρόπο στις κορυφές. Γενικά, ο αλγόριθμος PAEK δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον αλγόριθμο Bezier, και ως εκ τούτου είναι και αυτός που χρησιμοποιήθηκε κατά τις διαδικασίες εξομάλυνσης στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 4.13: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων εξομάλυνσης στην ίδια πολυγωνική γραμμή (Πηγή: pro.arcgis.com)

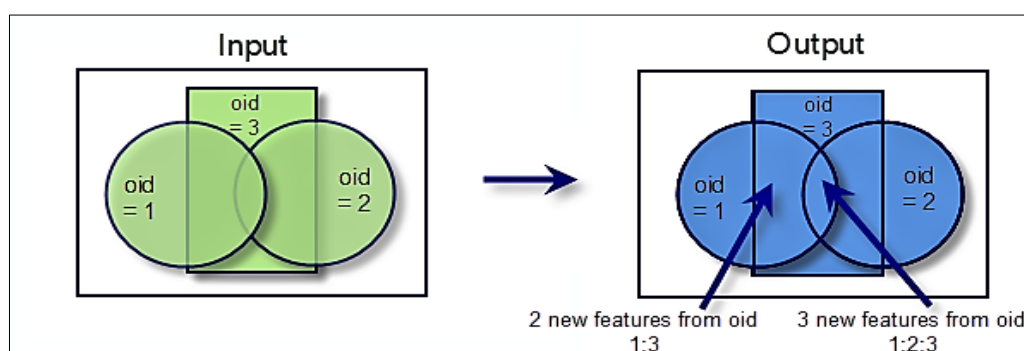
- Topo to raster

Με το εργαλείο Topo to Raster παράγονται ΨΜΕ (Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους) ή αλλιώς DEM (Digital Elevation Models), δομής κανάβου (ψηφιδωτής μορφής). Τα κύρια δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης, προκειμένου να λειτουργήσει το εργαλείο, είναι ισοϋψείς καμπύλες, υψομετρικά σημεία, καθώς και το πολύγωνο που καθορίζει τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Φυσικά, η προσθήκη επιπρόσθετων δεδομένων, όπως είναι τα ποτάμια ή οι λίμνες, εφόσον αυτά είναι διαθέσιμα, αυξάνουν την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Με δεδομένα αυτά, το εργαλείο στην ουσία υλοποιεί μια μέθοδο παρεμβολής, προκειμένου από τα υψομετρικά δεδομένα εισόδου να υπολογίσει το υψόμετρο για όλα τα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, το εργαλείο εφαρμόζει τη μέθοδο παρεμβολής ANUDEM, η οποία βασίζεται σε μια μορφολογική προσέγγιση, μέσω της οποίας μπορούν να παραχθούν υδρολογικά ορθά ΨΜΕ. Στην μέθοδο αυτή, ενσωματώνεται ένας αλγόριθμος με τον οποίο εντοπίζονται αυτόματα οι γραμμές ασυνέχειας της επιφάνειας του αναγλύφου, όπως είναι για παράδειγμα οι κορυφογραμμές ή οι μισγάγγειες, καθώς και ένας αλγόριθμος ενίσχυσης των στοιχείων του υδρολογικού δικτύου, με τον οποίο

απαλείφονται αυτόματα βυθίσματα ή τρύπες. Η διαδικασία παρεμβολής είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Στην αρχή, δημιουργείται ένας κানাβος χονδροειδούς ανάλυσης, ενώ στη συνέχεια, σε κάθε επανάληψη, βελτιώνεται η ανάλυση, μέχρι να επιτευχθεί το ιδανικό μέγεθος φατνίου (Τσούλος, Σκοπελίτη, & Στάμου, 2015), το οποίο καθορίζεται από το εργαλείο, ως προεπιλογή, αλλά μπορεί να μεταβληθεί από τον χρήστη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης του.

- Union

Η χρήση του εργαλείου union ενδείκνυται στις περιπτώσεις που δυο ή περισσότερα επίπεδα πληροφορίας χρειάζεται να ενωθούν σε ένα. Το εξαγόμενο επίπεδο πληροφορίας, που προκύπτει από την ένωση, συμπεριλαμβάνει τις γεωμετρικές και περιγραφικές πληροφορίες όλων των εισαγόμενων επιπέδων πληροφορίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση του εργαλείου είναι όλα τα χαρακτηριστικά εισόδου να είναι πολυγωνικής μορφής.



Εικόνα 4.14: Απεικόνιση της λογικής διαδικασίας που ακολουθεί το εργαλείο union. Οι τρεις, αρχικά διαφορετικές, πολυγωνικές οντότητες ενώνονται μεταξύ τους. Στο εξαγόμενο επίπεδο πληροφορίας οι οντότητες είναι επτά και καθεμία από αυτές φέρει τις περιγραφικές πληροφορίες εκείνων των αρχικών οντοτήτων, από την επικάλυψη των οποίων προέκυψε. (Πηγή: desktop.arcgis.com)

4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων και λογισμικό Abaqus

4.3.1 Εισαγωγή

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.) είναι μια αριθμητική μέθοδος, δηλαδή μια μέθοδος που εφαρμόζεται μέσω λογισμικών του ηλεκτρονικού υπολογιστή, η οποία δημιουργήθηκε με σκοπό τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων σε μερικές διαφορικές εξισώσεις. Η χρήση της είναι μεγάλη σε τομείς που προσανατολίζονται στη μελέτη κατασκευών, όπως είναι

για παράδειγμα ο τεχνικός ή ο γεωτεχνικός. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητα της μεθόδου να περιγράφει και να επιλύει ακόμα και προβλήματα που είναι εξαιρετικά περίπλοκα, δηλαδή διαθέτουν σύνθετη γεωμετρία, φόρτιση ή συνοριακές συνθήκες, και τα οποία συχνά δεν μπορούν να επιλυθούν με απλούστερες αναλυτικές μεθόδους.

Ζητούμενο στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η εύρεση της τιμής μιας άγνωστης μεταβλητής, συνήθως της μετατόπισης, σε κάθε σημείο του σώματος που μελετάται. Στην ουσία επιζητείται η συνεχής συνάρτηση της άγνωστης μεταβλητής με τη θέση του κάθε σημείου. Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της μεθόδου, πρωταρχικό βήμα για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού αποτελεί η διαίρεση του υπό μελέτη χώρου σε επιμέρους μικρά τμήματα, τα πεπερασμένα στοιχεία (elements), και η σύνδεση αυτών μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία, τους κόμβους (nodes). Σκοπός της διαίρεσης είναι να υπολογιστεί η εκάστοτε άγνωστη μεταβλητή πρώτα στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα, μέσω γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων παρεμβολής, στα υπόλοιπα σημεία του μέσου. Κατά αυτό τον τρόπο, η εξεύρεση μιας συνεχούς συνάρτησης που θα ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση του προβλήματος ανάγεται στην εξεύρεση των πεπερασμένων σε πλήθος τιμών που παίρνει η συνάρτηση αυτή στους κόμβους των στοιχείων (elements). Τέλος, με βάση τις τελικές τιμές της ζητούμενης μεταβλητής υπολογίζονται άλλα δευτερεύοντα μεγέθη, όπως τάσεις ή παραμορφώσεις.

4.3.2 Τα κύρια βήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

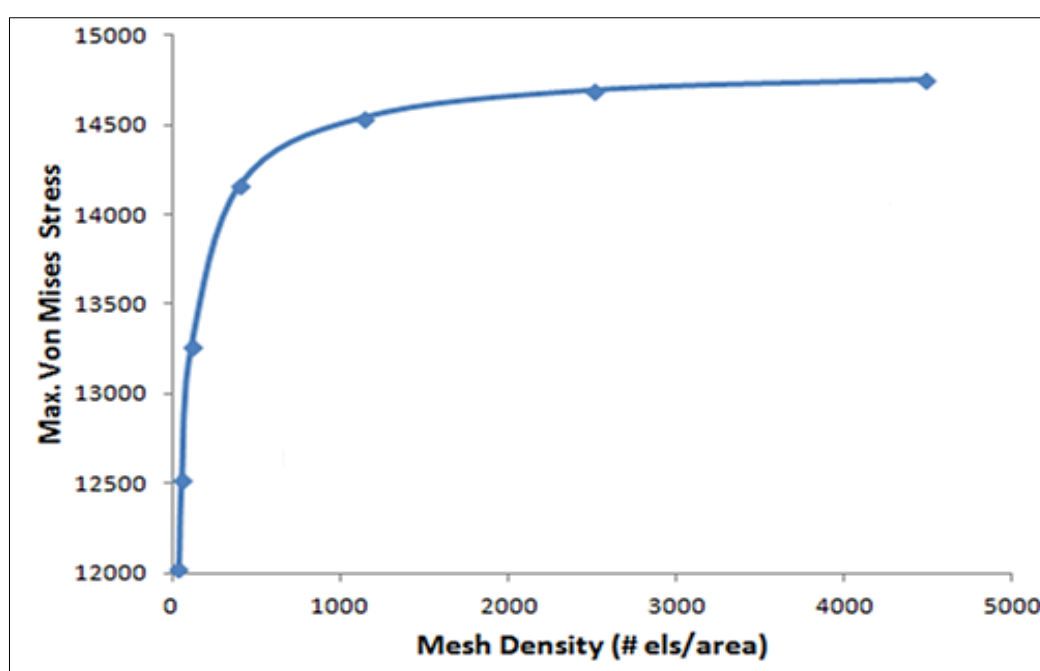
Σε όλα τα εμπορικά λογισμικά εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, για την αριθμητική επίλυση των πρακτικών εφαρμογών, ακολουθούνται πέντε βασικά βήματα (Μπουκοβάλας, 2006).

- Βήμα 1^ο: Διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε Πεπερασμένα Στοιχεία

Το πρώτο βήμα είναι η διαίρεση του συνεχούς μέσου σε ένα ισοδύναμο σύστημα στοιχείων (elements) από το ίδιο συνεχές μέσον. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διακριτοποίηση. Η επιλογή σωστού αριθμού και είδους πεπερασμένων στοιχείων είναι σημαντική, καθώς από αυτήν καθορίζεται η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

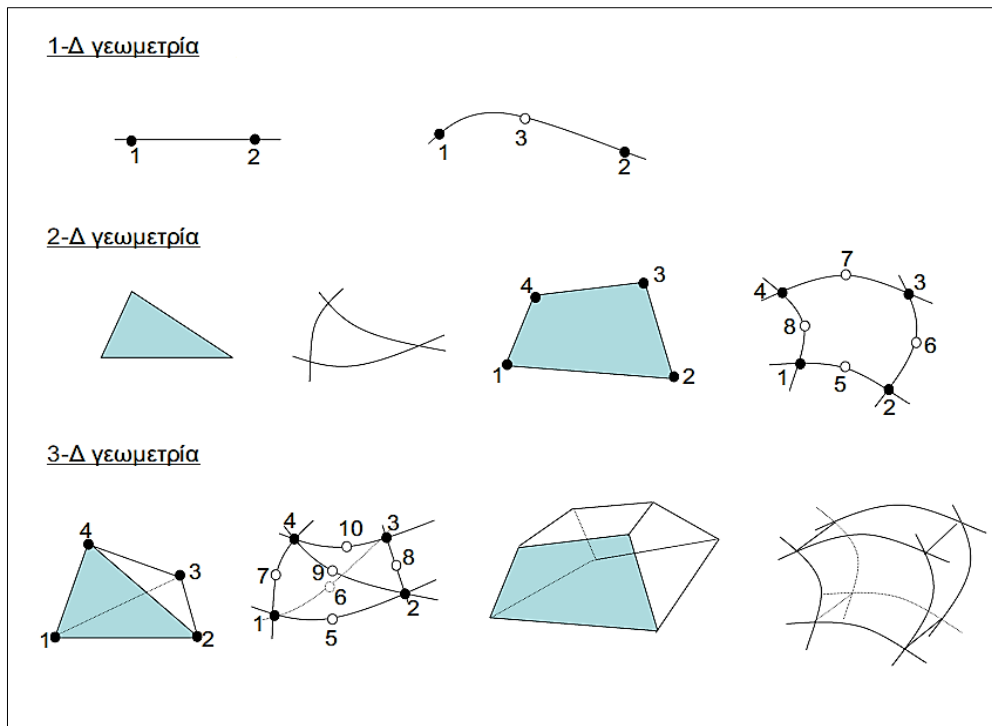
Όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, έχει παρατηρηθεί ότι όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα που προσομοιώνει το εκάστοτε σώμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουν τα τελικά αποτελέσματα. Από την άλλη, ένα πολύ πυκνό πλέγμα απαιτεί αρκετά μεγαλύτερη χωρητικότητα σε μνήμη, καθώς και περισσότερο χρόνο εκτέλεσης. Δεδομένων των παραπάνω συμπεραίνεται, ότι δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας που να υποδεικνύει το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που

είναι κατάλληλο σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, προκειμένου να ελεγχθεί η ποιότητα ενός πλέγματος, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές μέθοδοι. Από αυτές, η πιο ακριβής προτείνει την συνεχή αύξηση της πυκνότητας των στοιχείων, έως ότου τα παραγόμενα αποτελέσματα που εξετάζονται κάθε φορά (τάσεις, μετατοπίσεις κ.α.) συγκλίνουν σε κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Αυτό σημαίνει, πως μια επιπλέον αύξηση της πυκνότητας των στοιχείων δεν θα αλλάξει σημαντικά τις τιμές των τελικών αποτελεσμάτων. Φυσικά η μέθοδος αυτή, λόγω της επαναλαμβανόμενης αναταξινόμησης των στοιχείων, απαιτεί πολύ χρόνο, ειδικά στις περιπτώσεις που τα μοντέλα έχουν σύνθετη γεωμετρία.



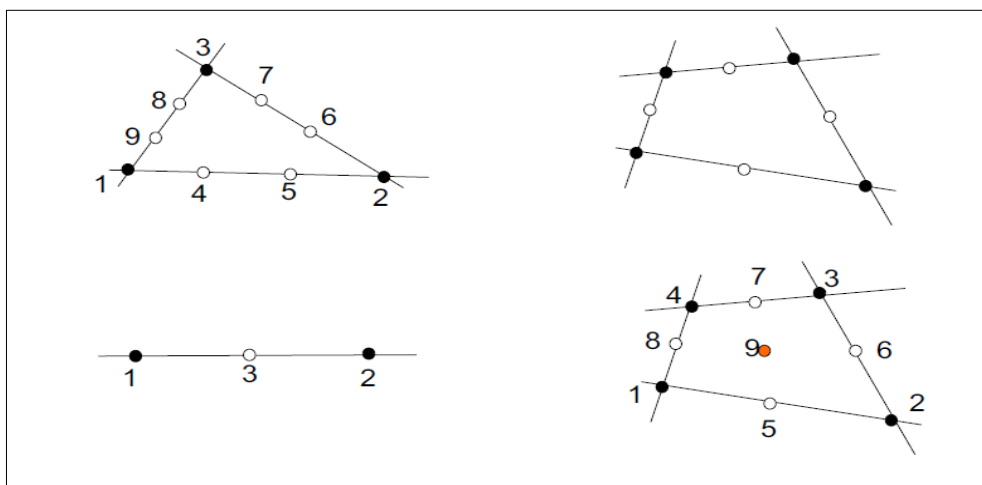
Εικόνα 4.15: Διάγραμμα απεικόνισης των υπολογιζόμενων τιμών των τάσεων (κάθετος άξονας) σε σχέση με την πυκνότητα του πλέγματος (οριζόντιος άξονας) (Πηγή: caeai.com)

Από την άλλη, όσον αφορά το είδος ενός πεπερασμένου στοιχείου, αυτό σχετίζεται μεταξύ άλλων με τη γεωμετρία και τον αριθμό των κόμβων που το συνθέτουν. Ως προς τη γεωμετρία τους, τα πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να είναι μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα, με ευθείες ή καμπύλες γραμμές. Εάν δεν συντρέχει ιδιαίτερος λόγος, η διακριτοποίηση γίνεται με στοιχεία συνηθισμένου-κανονικού σχήματος (ευθύγραμμα τμήματα, τρίγωνα, ορθογώνια παραλληλόγραμμα, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α.). Ωστόσο, πρακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε σχήμα, χάριν της τεχνικής των «ισοπαραμετρικών» πεπερασμένων στοιχείων, που είναι διαθέσιμη σε όλα τα εμπορικά πακέτα λογισμικών.



Εικόνα 4.16: Διαφορετικά είδη γεωμετρίας πεπερασμένων στοιχείων (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2006)

Τέλος, κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν στις κορυφές ενός στοιχείου, κατά μήκος των πλευρών του ή ακόμα και στο εσωτερικό του. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η αύξηση του αριθμού των κόμβων, που αναλογούν σε ένα στοιχείο, συνήθως αυξάνει την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων και μειώνει το πλήθος των απαιτούμενων πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 4.17: Πιθανές θέσεις τοποθέτησης κόμβων σε ένα πεπερασμένο στοιχείο (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2006)

- Βήμα 2^ο: Επιλογή συναρτήσεων παρεμβολής

Αντικείμενο του δεύτερου βήματος είναι ο καθορισμός της παρεμβολικής συνάρτησης, μέσω της οποίας θα υπολογιστούν οι τιμές της ζητούμενης μεταβλητής σε όλα τα σημεία των στοιχείων, βάσει των ήδη υπολογισμένων τιμών της ίδιας μεταβλητής στους κόμβους τους. Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές. Γραμμικές συναρτήσεις εφαρμόζονται στις περιπτώσεις όπου σε κάθε στοιχείο αναλογούν κόμβοι ίσοι σε αριθμό με τις ακμές του. Αντίθετα, στις περιπτώσεις όπου οι κόμβοι των στοιχείων υπερβαίνουν τον αριθμό των ακμών, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μη γραμμικές συναρτήσεις.

- Βήμα 3^ο: Κατάστρωση εξισώσεων σε επίπεδο Πεπερασμένου Στοιχείου

Σκοπός του τρίτου βήματος είναι να υπολογιστούν οι τιμές της άγνωστης μεταβλητής, που στην περίπτωση της παρούσας εργασίας είναι η μετατόπιση, στους κόμβους των στοιχείων. Για την επίτευξη αυτού, για κάθε στοιχείο υπολογίζεται ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με n αγνώστους, όπου n είναι το γινόμενο του αριθμού των κόμβων του κάθε στοιχείου με τον αριθμό των αγνώστων ανά κόμβο. Το σύστημα αυτό έχει τη γενική μορφή:

$$[K]_m \times \{q\}_m = \{F\}_m \quad (4.1)$$

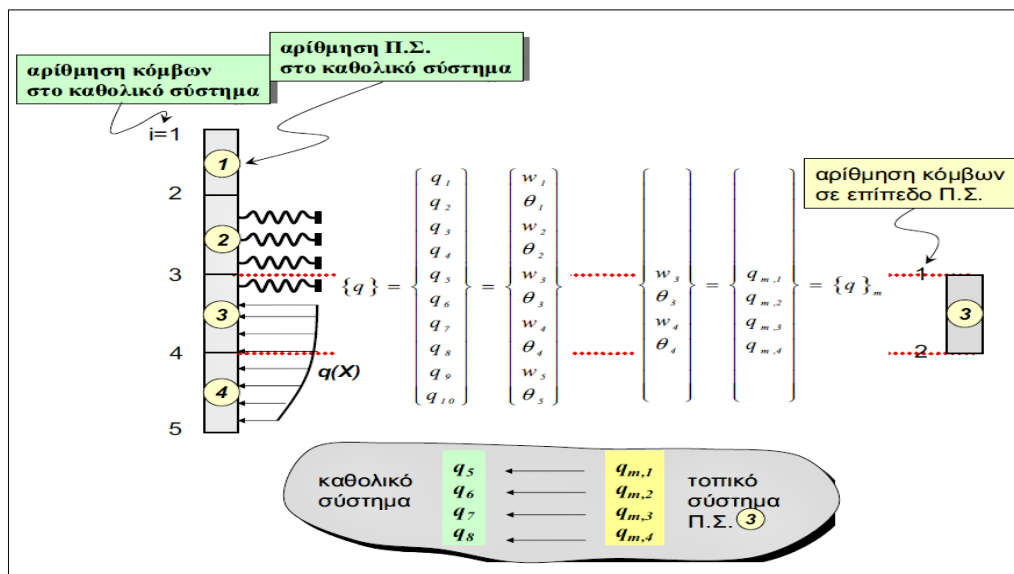
Στην παραπάνω σχέση,

- $[K]_m$ είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, γνωστός με το όνομα μητρώο ακαμψίας. Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει πληροφορίες για τις γεωμετρικές και τις μηχανικές ιδιότητες του πεπερασμένου στοιχείου.
- $\{q\}_m$ είναι το διάνυσμα των τιμών της άγνωστης μεταβλητής στους κόμβους
- $\{F\}_m$ είναι το διάνυσμα «φόρτισης» των κόμβων (διάνυσμα δυνάμεων σε προβλήματα φορτίου-μετατόπισης)

- Βήμα 4^ο: Κατάστρωση εξισώσεων σε καθολικό επίπεδο

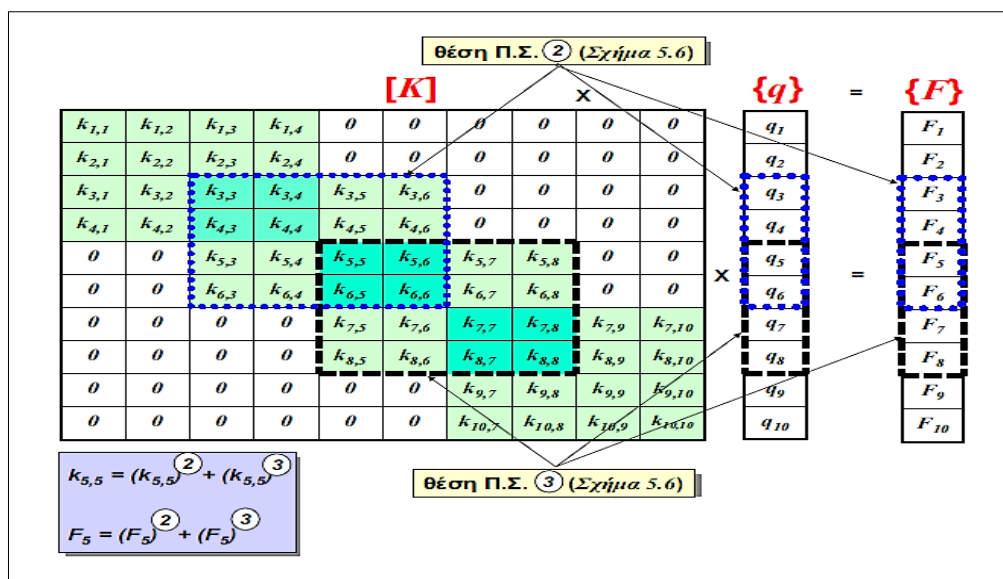
Στο τέταρτο βήμα πραγματοποιείται ο σχηματισμός του συστήματος των εξισώσεων όλου του μοντέλου, προκειμένου να περιγραφεί πλήρως το πρόβλημα. Για την επίτευξη αυτού, τα συστήματα εξισώσεων σε επίπεδο πεπερασμένου στοιχείου, που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο βήμα, τοποθετούνται σε διαδοχική σειρά, με οδηγό την αντιστοιχία μεταξύ των τοπικών (σε επίπεδο Π.Σ.) και των καθολικών (για ολόκληρο το δίκτυο Π.Σ.)

εξεταζόμενων μεταβλητών (q). Η διαδικασία αυτή καταγράφεται καλύτερα στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 4.18: Αντιστοιχία μεταβλητών σε τοπικό και καθολικό επίπεδο (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2006)

Σημειώνεται ότι τα στοιχεία των μητρώων $[K]_m$ και $\{F\}_m$, τα οποία αντιστοιχούν σε κόμβο που είναι κοινός σε δύο ή περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία, προστίθενται μεταξύ τους. Από την επαλληλία των συστημάτων εξισώσεων επιπέδου πεπερασμένου στοιχείου προκύπτει τελικά το σύστημα εξισώσεων του σώματος, που έχει τη γενική μορφή $[K] \times \{q\} = \{F\}$.



Εικόνα 4.19: Σύνθεση συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων στοιχείων σε καθολικό επίπεδο (Πηγή: Μπουκοβάλας, 2006)

- Βήμα 5^ο: Επίλυση-Υπολογισμός κύριων και δευτερογενών αποτελεσμάτων

Στο τελευταίο βήμα, επιλύεται το σύστημα εξισώσεων καθολικού επιπέδου. Πρωταρχικό βήμα για την επίτευξη της επίλυσης είναι η αντιστροφή του μητρώου $[K]$. Το μητρώο $[K]$ είναι συνήθως συμμετρικό ως προς τη διαγώνιο του, πάνω και κάτω από την οποία συγκεντρώνονται τα μη μηδενικά στοιχεία, υπό μορφή διαγώνιας ζώνης. Όσο μικρότερο είναι το εύρος αυτής της ζώνης, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντιστροφής του εν λόγω μητρώου και κατ' επέκταση και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος.

Από τη στιγμή που θα επιλυθεί το σύστημα και θα βρεθούν οι τιμές της άγνωστης μεταβλητής (q) σε κάθε κόμβο, είναι εύκολος και ο υπολογισμός δευτερογενών αποτελεσμάτων, όπως είναι οι τάσεις ή οι παραμορφώσεις, σε κάθε στοιχείο και στη συνέχεια και σε όλο το σώμα.

4.3.3 Προ-επεξεργασία, Επεξεργασία και Μετά-Επεξεργασία δεδομένων κατά την εφαρμογή της ΜΠΣ

Η διαδικασία της εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, με τη βοήθεια ενός λογισμικού, μπορεί να διακριθεί και σε τρία άλλα στάδια. Πρόκειται για τα στάδια της προ-επεξεργασίας, της επεξεργασίας και της μετά-επεξεργασίας δεδομένων. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι καθένα από τα βήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα εντάσσεται σε κάποιο από αυτά τα στάδια. Πιο αναλυτικά,

- Η προ-επεξεργασία αποτελεί το στάδιο σύνθεσης του προς επίλυση μοντέλου από το χρήστη. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την διακριτοποίηση του υπό εξέταση χώρου (Βήμα 1^ο), την επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και κατ' επέκταση και την επιλογή των συναρτήσεων παρεμβολής (Βήμα 2^ο), τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία αποτελείται ο χώρος και την επιβολή των συνοριακών συνθηκών.
- Η επεξεργασία αποτελεί το καθαρά μαθηματικό μέρος της μεθόδου, το οποίο κατά κύριο λόγο εκτελείται από τον υπολογιστή, με τη βοήθεια του λογισμικού. Στο στάδιο αυτό σχηματίζονται τα μητρώα ακαμψίας, τα διανύσματα φόρτισης και τα διανύσματα της άγνωστης μεταβλητής, και κατά συνέπεια συντίθενται τα συστήματα εξισώσεων προς επίλυση, πρώτα για κάθε στοιχείο ξεχωριστά και έπειτα για ολόκληρο το μοντέλο. Στη συνέχεια, αφού ληφθούν υπόψη οι συνοριακές συνθήκες, πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων και ο υπολογισμός των άγνωστων μεταβλητών στους κόμβους (3^ο, 4^ο και 5^ο Βήμα).

- Το στάδιο της μετά-επεξεργασίας περιλαμβάνει την οπτική απεικόνιση, την αναπαραγωγή και τη δημιουργία αναφορών ή εικόνων από τα αποτελέσματα του σταδίου της επεξεργασίας. Οι διαδικασίες αυτές πραγματοποιούνται από το χρήστη, κατά τη βούληση του.

4.3.4 Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ABAQUS

Το Abaqus είναι ένα από τα πολλά εμπορικά πακέτα λογισμικού που έχουν δημιουργηθεί για την επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το εν λόγω λογισμικό χρησιμοποιείται πολύ από τα ακαδημαϊκά και ερευνητικά ιδρύματα, λόγω της αυξημένης προσαρμοστικότητας του και της ικανότητας του να προσομοιώνει μεγάλο εύρος υλικών. Πέρα όμως από τα ιδρύματα, η προσφορά του είναι σημαντική και στις βιομηχανίες αυτοκινήτων και αεροδιαστημικής.

Το λογισμικό πακέτο Abaqus αποτελείται από τρία βασικά προϊόντα, το Abaqus/Standard, το Abaqus/Explicit και το Abaqus/CAE, καθένα από τα οποία αναλύεται ακολούθως.

- Το Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment) είναι ένα ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να συνθέσει το μοντέλο του εκάστοτε προβλήματος, αλλά και να οπτικοποιήσει τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης. Στην ουσία, το περιβάλλον αυτό αποτελεί το μέσο υλοποίησης των σταδίων της προ-επεξεργασίας και της μετά-επεξεργασίας, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.
- Το Abaqus/Standard είναι ένας αναλυτής γενικής χρήσης, που χρησιμοποιεί παραδοσιακές μεθόδους ολοκλήρωσης, για την επίλυση προβλημάτων με πεπερασμένα στοιχεία. Με τη βοήθεια του προϊόντος αυτού, υλοποιείται το στάδιο της επεξεργασίας.
- Το Abaqus/Explicit είναι ένας ειδικός αναλυτής, που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μη γραμμικών, δυναμικών ή ψευδοστατικών προβλημάτων, που προκύπτουν από παροδικά φορτία. Αντίστοιχα με το Abaqus/Standard, χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του σταδίου της επεξεργασίας.

Οι αναλυτές Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit μπορούν να ενεργοποιηθούν τόσο μέσω του περιβάλλοντος του Abaqus/CAE, όσο και ανεξάρτητα από αυτό.

4.3.5 Ορισμός μοντέλων στο λογισμικό ABAQUS

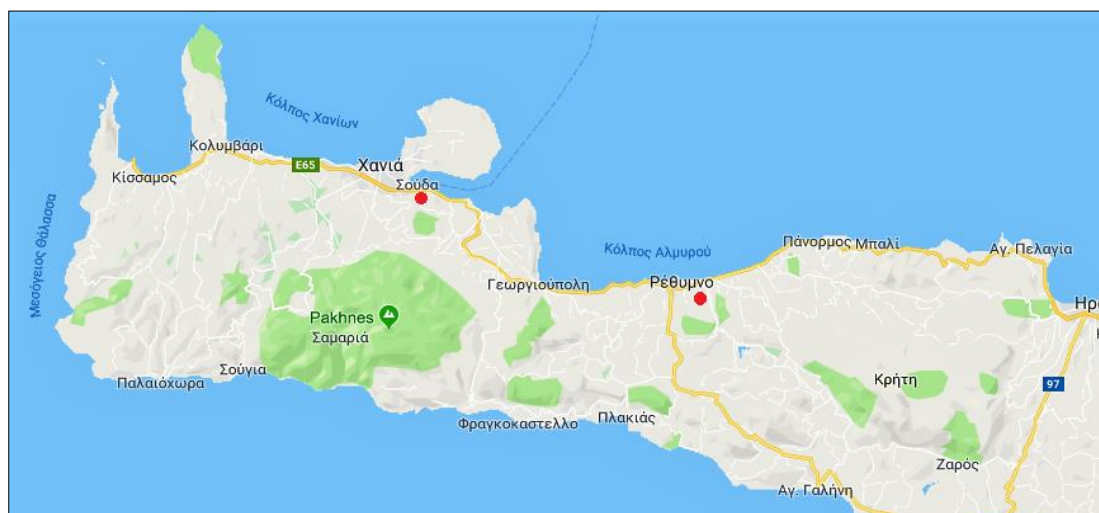
Ο καθορισμός του προς επίλυση μοντέλου, κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας, στο λογισμικό Abaqus γίνεται μέσω ενός αρχείου εισόδου (input file). Πρόκειται για ένα αρχείο δεδομένων, το οποίο έχει τη μορφή κειμένου και δημιουργείται από το χρήστη, είτε άμεσα με τη βοήθεια ενός προγράμματος επεξεργασίας κειμένου, είτε έμμεσα με τη βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος του Abaqus/CAE. Στην πρώτη περίπτωση ο χρήστης καλείται να μάθει τις εντολές που διαβάζονται από το λογισμικό και να τις καταγράψει σε ένα κείμενο. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση ο χρήστης μπορεί να στήσει το μοντέλο, πατώντας απλώς τα κατάλληλα πλήκτρα στο περιβάλλον του Abaqus/CAE, το οποίο ταυτόχρονα μεταφράζει και καταγράφει την κάθε κίνηση σε κείμενο. Σημειώνεται, ότι στην παρούσα εργασία ο καθορισμός των μοντέλων έγινε άμεσα. Πιο συγκεκριμένα, για την καταγραφή των εντολών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα notebook και κατά την αποθήκευση των κειμένων δόθηκε στα αρχεία η κατάληξη .inp.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο που δημιουργούνται, όλα τα αρχεία εισόδου έχουν μια κοινή και βασική δομή. Η δομή αυτή αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

1. Τίτλος (*Heading). Ο τίτλος δίνει ένα όνομα στην ανάλυση, το οποίο εμφανίζεται στην αρχή κάθε εξαγόμενου αρχείου.
2. Ενότητα καθορισμού των δεδομένων του μοντέλου (model data section). Στην ενότητα αυτή, καθορίζεται απαραίτητα η γεωμετρία του μοντέλου, δηλαδή οι κόμβοι και τα στοιχεία (πλήθος και είδος), καθώς και οι ιδιότητες των υλικών. Εκτός από τα παραπάνω, προαιρετικά μπορούν να οριστούν και οι αρχικές συνθήκες του υπό μελέτη χώρου, όπως είναι για παράδειγμα οι αρχικές τάσεις, οι θερμοκρασίες ή οι ταχύτητες, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες. Επιπλέον, εάν το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί ως η συναρμολόγηση πολλών δομικών στοιχείων, τα δεδομένα του μοντέλου πρέπει να εντάσσονται σε ένα από τα βασικά επίπεδα, part, assembly, instance ή model.
3. Ενότητα καθορισμού των ιστορικών δεδομένων (history data section). Η ενότητα αυτή χωρίζεται σε βήματα (steps), καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα χρονικό διάστημα, στο οποίο ίσχυαν διαφορετικές συνθήκες για τον υπό μελέτη χώρο-κατασκευή, σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η καταγραφή του πρώτου βήματος διαχωρίζει τα ιστορικά δεδομένα από τα δεδομένα του μοντέλου. Σε κάθε βήμα καθορίζονται οι φορτίσεις, οι συνοριακές συνθήκες, καθώς και το ποια αποτελέσματα χρειάζεται να καταγραφούν σε αρχείο εξόδου.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1^Η: ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Στα πλαίσια της πρώτης εφαρμογής μελετάται το σενάριο διασύνδεσης δύο σημαντικών πόλεων της Κρήτης, των Χανίων και του Ρεθύμνου, μέσω ενός χερσαίου αγωγού μεγάλου μήκους. Αρχικά, παρουσιάζονται τα βήματα διαμόρφωσης της προκαταρκτικής διαδρομής του αγωγού, βάσει του κριτηρίου της επιβεβλημένης αποφυγής ορισμένων περιοχών, και ειδικότερα των αστικών/ημιαστικών περιοχών και των περιοχών του δικτύου Natura 2000. Στη συνέχεια, διερευνάται το κατά πόσο η προκαταρκτική διαδρομή μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής, έναντι του γεωκινδύνου των σεισμικά επαγόμενων μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων των δυνητικά ασταθών πρανών. Σημειώνεται, ότι ως δυνητικά ασταθή θεωρήθηκαν τα πρανή που έχουν τις μεγαλύτερες από τις κλίσεις που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης. Τέλος, ανάλογα με τα αποτελέσματα της διερεύνησης, αποφασίζεται αν η προκαταρκτική αποτελεί τη βέλτιστη διαδρομή του αγωγού ή αν πρέπει να προταθεί κάποια άλλη.



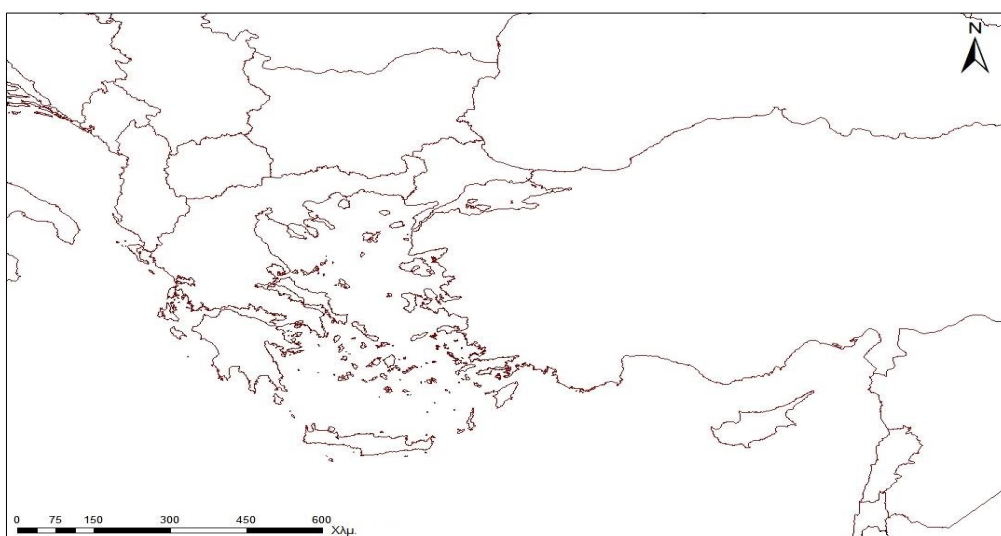
Εικόνα 5.1: Θέση των πόλεων Σούδας Χανίων και Ρεθύμνου που αποτελούν τα σημεία έναρξης και τερματισμού του αγωγού. (Πηγή: Google Maps)

5.1 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό ArcGIS

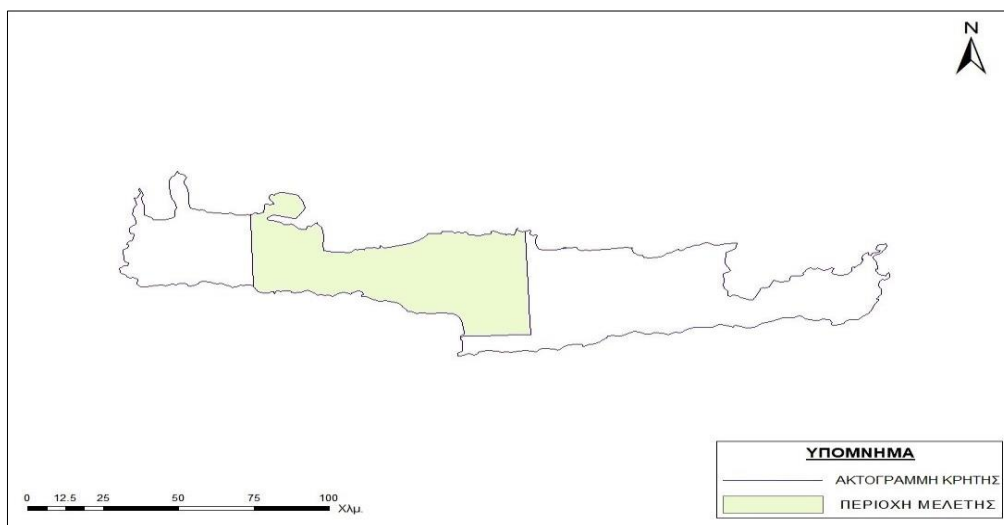
Η πρώτη ενέργεια που απαιτείται, για την εκκίνηση της λειτουργίας του εργαλείου, είναι η συλλογή όλων των δεδομένων, που είναι αναγκαία για την απεικόνιση των απαραίτητων οντοτήτων ή πληροφοριών στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής ArcMap.

Αρχικά, για να έχει νόημα η απεικόνιση του κάθε δεδομένου, πρέπει πρώτα να έχει διαμορφωθεί ένα επίπεδο πληροφορίας (layer) που θα αναπαριστά τα γεωγραφικά όρια της περιοχής μελέτης και θα παίζει το ρόλο του υποβάθρου.

Για τη διαμόρφωση του επιπέδου αυτού, σε πρώτη φάση συλλέχθηκε από την επίσημη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας, «ec.europa.eu/eurostat», ένα επίπεδο πληροφορίας, που αναπαριστά τα διοικητικά όρια των χωρών σε παγκόσμιο επίπεδο, ως γραμμικές οντότητες. Από τις οντότητες του παραπάνω επιπέδου, επιλέχθηκε και αποθηκεύτηκε σε ξεχωριστό επίπεδο πληροφορίας εκείνη που αποδίδει το νησί της Κρήτης. Έπειτα, η εν λόγω οντότητα περιορίστηκε περαιτέρω, έτσι ώστε να προσεγγίζει ακόμα περισσότερο την περιοχή μελέτης, δηλαδή την ευρύτερη περιοχή ανάμεσα στα Χανιά και το Ρέθυμνο. Η γραμμική οντότητα, που προέκυψε από την παραπάνω ενέργεια, μεταβλήθηκε, έτσι ώστε να έχει πολυγωνική μορφή και στο εξής αποτέλεσε το υπόβαθρο πάνω στο οποίο αναπτύχθηκαν όλα τα υπόλοιπα δεδομένα.



Εικόνα 5.2: Χάρτης απεικόνισης των διοικητικών ορίων των χωρών



Εικόνα 5.3: Χάρτης απεικόνισης της περιοχής μελέτης

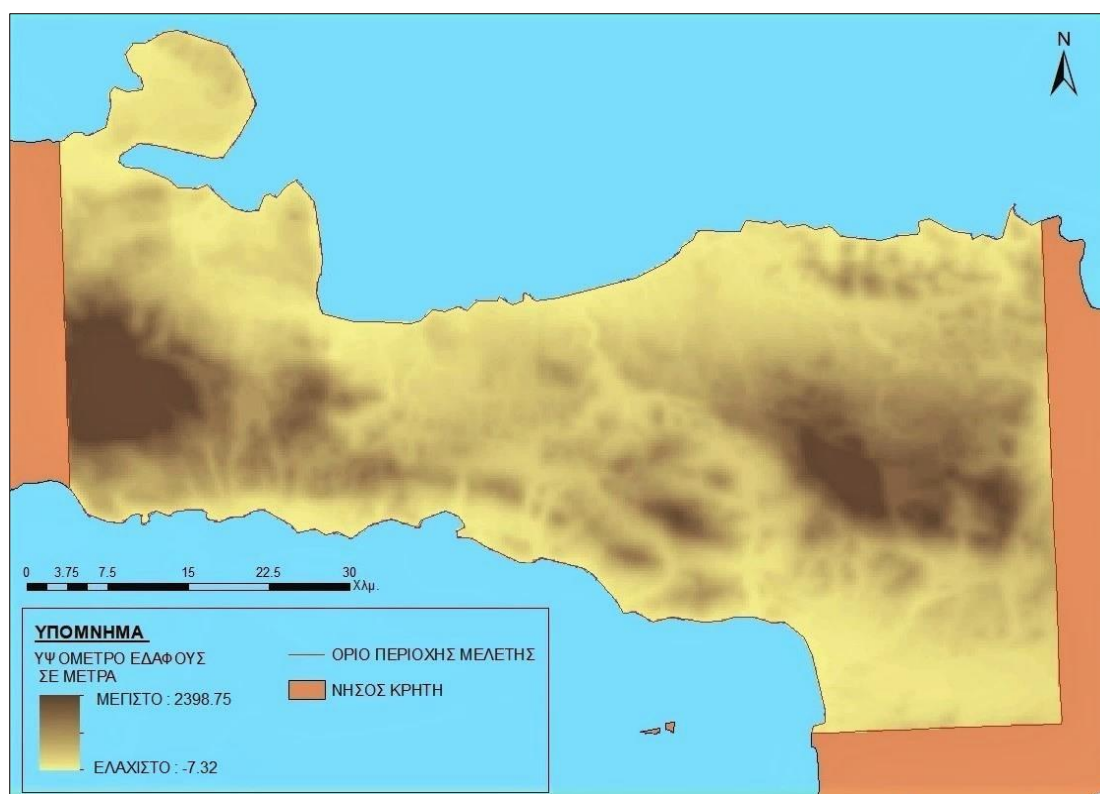
Ύστερα από τον καθορισμό των γεωγραφικών ορίων της περιοχής μελέτης, ακολούθησε η αναζήτηση των επιπέδων πληροφορίας, τα οποία αναπαριστούν περιοχές, οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης ή επιβάλλεται να αποφευχθούν κατά τη διαμόρφωση της διαδρομής του αγωγού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων περιοχών είναι οι αστικές ή ημιαστικές περιοχές, οι περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, οι περιοχές πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως οι αρχαιολογικοί χώροι και τα μνημεία, οι περιοχές εξόρυξης, τα ποτάμια, οι λίμνες, καθώς και οι αυτοκινητόδρομοι, οι σιδηροδρομικές γραμμές και άλλοι υπάρχοντες αγωγοί ή καλώδια. Ωστόσο, λόγω έλλειψης ελεύθερων δεδομένων καλής ποιότητας στο διαδίκτυο, από τις παραπάνω περιοχές, εντοπίστηκαν μόνο οι αστικές και ημιαστικές, δηλαδή οι περιοχές με πληθυσμό μεγαλύτερο από 2.000 κατοίκους, και το οικολογικό δίκτυο Natura 2000. Τα εν λόγω δεδομένα αντλήθηκαν, υπό τη μορφή επιπέδων πληροφορίας, από την ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency-ΕΕΑ).



Εικόνα 5.4: Χάρτης απεικόνισης αστικών/ημιαστικών περιοχών και περιοχών Natura 2000

Εκτός όμως από τα επίπεδα πληροφορίας που αναπαριστούν περιοχές, οι οποίες επιβάλλεται να αποφευχθούν κατά τη διαμόρφωση της διαδρομής του αγωγού, απολύτως απαραίτητη για την εκπόνηση της εφαρμογής ήταν και η

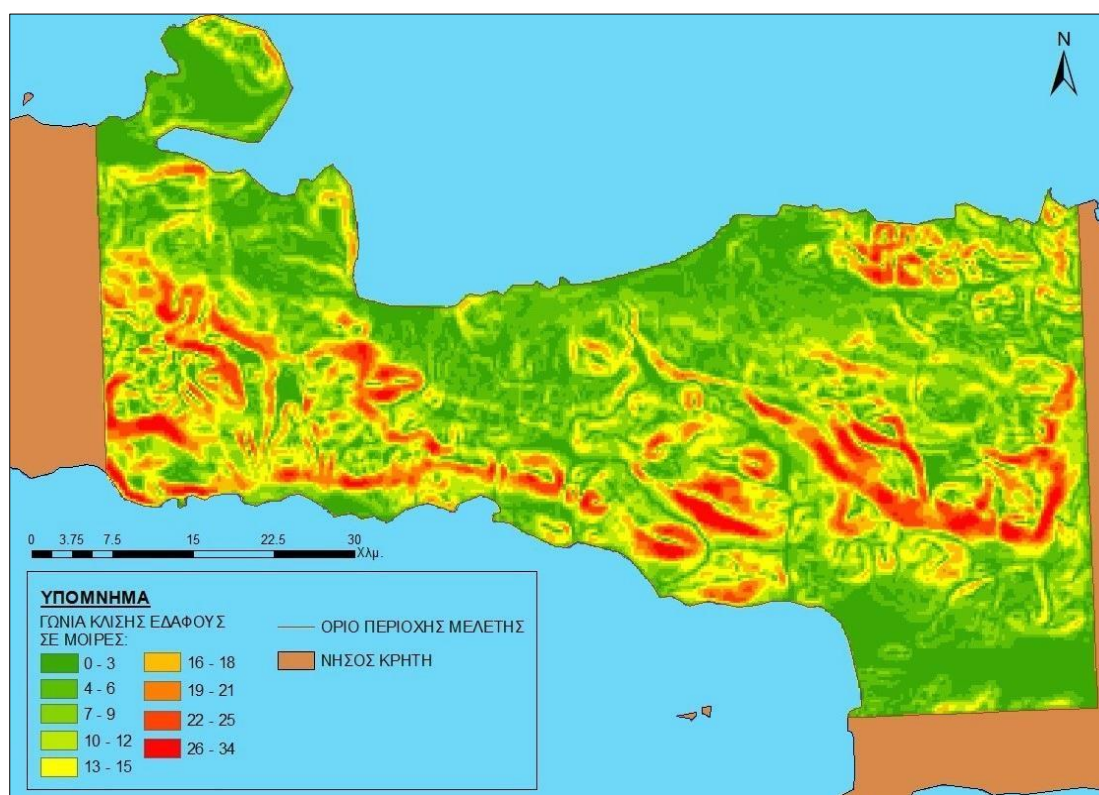
δημιουργία ενός επιπέδου πληροφορίας που θα απεικονίζει το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Για το λόγο αυτό, παράχθηκε ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM). Για την παραγωγή του ΨΜΕ, συλλέχθηκε από την ιστοσελίδα «www.opendem.info» ένα επίπεδο πληροφορίας ισουψών καμπυλών, ισοδιάστασης 25 μέτρων. Έπειτα, το επίπεδο πληροφορίας των ισουψών, καθώς και εκείνο που απεικονίζει την περιοχή μελέτης ως πολυγωνική οντότητα (Εικόνα 5.3), αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου του εργαλείου Τορο το Raster. Με τη βοήθεια του εργαλείου αυτού, προέκυψε μια πρώτη μορφή του ΨΜΕ της περιοχής μελέτης, με διαστάσεις κελιού 261×261 μέτρα. Τέλος, με τη βοήθεια του εργαλείου Fill το ΨΜΕ, που προέκυψε από το εργαλείο Τορο το Raster, διορθώθηκε ως προς ενδεχόμενες μη ρεαλιστικές βυθίσεις και έλαβε την τελική του μορφή. Κατά αυτό τον τρόπο, κάθε σημείο της περιοχής μελέτης απέκτησε υψομετρική πληροφορία.



Εικόνα 5.5: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης

Τέλος, σε συνδυασμό με τη δημιουργία του ΨΜΕ, πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός των κλίσεων του εδάφους τη περιοχής μελέτης, προκειμένου στη συνέχεια να μπορούν να εντοπιστούν τα δυνητικά ασταθή πρανή. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Slope, το οποίο έλαβε ως δεδομένο εισόδου το ΨΜΕ και εξήγαγε ένα ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας,

το οποίο απεικονίζει τη γωνία κλίσης που αντιστοιχεί στο κάθε εικονοστοιχείο, εκφρασμένη σε μοίρες.



Εικόνα 5.6: Χάρτης απεικόνισης των γωνιών κλίσης του εδάφους

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι καθώς η συλλογή των δεδομένων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, έγινε από διαφορετικές διαδικτυακές πηγές, καθένα από αυτά ήταν ενταγμένο και σε ένα διαφορετικό σύστημα αναφοράς. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια του εργαλείου Project, το οποίο ανήγαγε όλα τα δεδομένα σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, και πιο συγκεκριμένα στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς WGS'84 UTM, της ζώνης 34N. Για κάθε δεδομένο που προστέθηκε στο λογισμικό, η διαδικασία της αναγωγής προηγήθηκε όλων των υπόλοιπων επεξεργασιών. Κατά συνέπεια, όλα τα δεδομένα εξόδου που προέκυψαν στη συνέχεια από τη χρήση των διάφορων εργαλείων ήταν αυτόματα ενταγμένα στο ίδιο σύστημα αναφοράς (WGS'84 UTM Zone 34N).

5.2 Διαμόρφωση προκαταρκτικής διαδρομής

Έχει ήδη αναφερθεί, ότι η διαμόρφωση της προκαταρκτικής διαδρομής γίνεται με κριτήριο την αποφυγή περιοχών, οι οποίες δύναται να επηρεάσουν ή να επηρεαστούν αρνητικά από τη διέλευση του αγωγού, καθώς επίσης και ότι

στις περιοχές αυτές, σε πρώτη φάση, επιλέγεται συνειδητά να μην ανήκουν τα εδαφικά πρανή. Επιπλέον, όπως περιγράφεται και στην προηγούμενη ενότητα, παρά την ύπαρξη ενός πλήθους διαφορετικών περιοχών που επιβάλλεται να αποφευχθούν, λόγω έλλειψης ελεύθερων δεδομένων στο διαδίκτυο, συλλέχθηκαν δεδομένα μόνο για τις αστικές/ημιαστικές περιοχές και το οικολογικό δίκτυο Natura 2000. Κατά συνέπεια, στην προκειμένη περίπτωση η διαμόρφωση της προκαταρκτικής διαδρομής έγινε βάσει δύο κριτηρίων, της αποφυγής των αστικών/ημιαστικών περιοχών και της αποφυγής περιοχών που εμπίπτουν στο οικολογικό δίκτυο Natura 2000.

Η λογική στην οποία βασίζεται η διαμόρφωση της προκαταρκτικής διαδρομής στο λογισμικό ArcGIS, είναι ότι ο αγωγός θα πρέπει να περάσει από τις περιοχές, δηλαδή τα εικονοστοιχεία, που συγκεντρώνουν τη μικρότερη τιμή «κόστους». Σημειώνεται, ότι στην προκειμένη περίπτωση ο όρος κόστος δεν έχει οικονομική υπόσταση, αλλά αντιπροσωπεύει το πόσο ζημιογόνο είναι να διέλθει ο αγωγός από το εκάστοτε εικονοστοιχείο, συνυπολογίζοντας δυο παράγοντες, το είδος της περιοχής, δηλαδή το αν πρόκειται για αστική/ημιαστική περιοχή, περιοχή Natura ή ουδέτερη περιοχή, καθώς και την απόσταση από το σημείο έναρξης του αγωγού. Προκειμένου να διαμορφωθεί ο χάρτης που θα αποδίδει σε κάθε εικονοστοιχείο την αντίστοιχη τιμή κόστους, έτσι ώστε από αυτόν να προκύψει τελικά και η ζητούμενη προκαταρκτική διαδρομή, ακολουθήθηκαν οι εξής ενέργειες:

- Με τη βοήθεια του Editor Toolbar, ψηφιοποιήθηκαν τα σημεία έναρξης και τερματισμού του αγωγού.
- Καθώς, υπό ιδανικές συνθήκες, ο αγωγός δεν πρέπει μόνο να αποφεύγει τις αστικές περιοχές, αλλά και να διέρχεται σε επαρκή απόσταση από αυτές, δημιουργήθηκαν ζώνες ασφαλείας ενός χιλιομέτρου γύρω από κάθε πολύγωνο που αντιπροσωπεύει κάποια αστική/ημιαστική περιοχή. Οι ζώνες αυτές αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστό επίπεδο πληροφορίας, ενώ για τη δημιουργία τους έγινε χρήση του εργαλείου Buffer.
- Με τη βοήθεια του εργαλείου Union, καθένα από τα επίπεδα πληροφορίας των ζωνών ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών και του οικολογικού δικτύου Natura 2000 ενώθηκε με το επίπεδο πληροφορίας που απεικονίζει την περιοχή μελέτης ως πολυγωνική οντότητα.
- Προκειμένου να είναι σε μορφή αποδεκτή από τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, τα διανυσματικά επίπεδα πληροφοριών, που προέκυψαν από το εργαλείο Union, μετατράπηκαν σε ψηφιδωτή μορφή, μέσω του εργαλείου Polygon to Raster. Καθώς, τα ψηφιδωτά δεδομένα συνδέονται μόνο με ένα είδος πληροφορίας, κατά την μετατροπή από διανυσματική σε ψηφιδωτή μορφή, από τις διάφορες περιγραφικές

πληροφορίες που ήταν καταγεγραμμένες στους πίνακες ιδιοτήτων (attribute table) επιλέχθηκε να διατηρηθεί μόνο ο αύξοντας αριθμός της κάθε οντότητας.

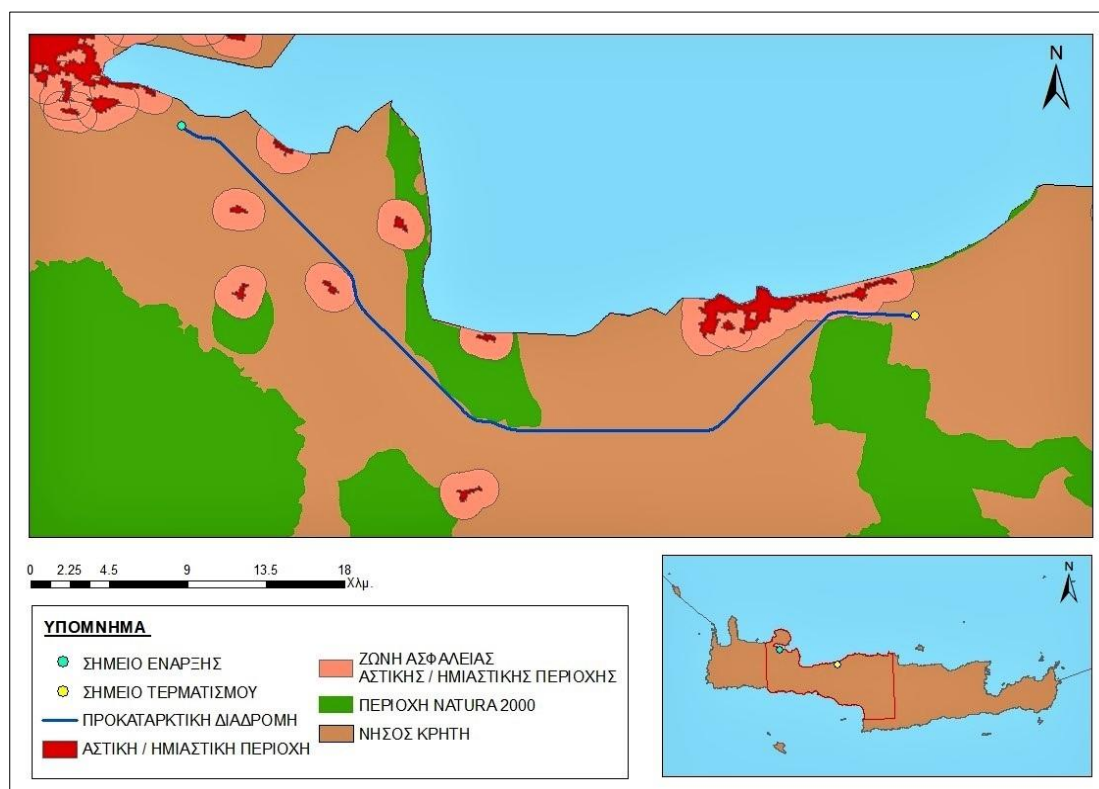
- Οι τιμές των εικονοστοιχείων των ψηφιδωτών επιπέδων πληροφορίας, που προέκυψαν από το προηγούμενο βήμα, αναταξινομήθηκαν, με τη βοήθεια του εργαλείου Reclassify. Πιο συγκεκριμένα, στο επίπεδο πληροφορίας που απεικονίζει την ένωση του υποβάθρου με τις ζώνες ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών, ο αύξοντας αριθμός της οντότητας που αντιστοιχεί σε ουδέτερο έδαφος της περιοχής μελέτης αντικαταστάθηκε με τον αριθμό 1, ενώ ο αύξοντας αριθμός κάθε οντότητας που απεικονίζει ζώνη ασφαλείας αντικαταστάθηκε με τον αριθμό 2. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για το επίπεδο πληροφορίας υποβάθρου-οικολογικού δικτύου Natura 2000, με τη διαφορά ότι ο αριθμός 2 αποδόθηκε στις οντότητες που αντιστοιχούν σε περιοχές που εμπίπτουν στο οικολογικό δίκτυο Natura 2000. Με τον τρόπο αυτό, υποδηλώθηκε ότι η διέλευση του αγωγού από μια αστική/ημιαστική περιοχή ή μια περιοχή του δικτύου Natura είναι δυσχερέστερη, σε σχέση με τη διέλευση από θεωρητικά ουδέτερο έδαφος της περιοχής μελέτης.
- Έγινε χρήση του εργαλείου Raster Calculator και πραγματοποιήθηκε σταθμισμένη υπέρθεση των δύο αναταξινομημένων επιπέδων πληροφορίας. Πιο συγκεκριμένα, σε καθένα από τα αναταξινομημένα επίπεδα πληροφορίας αποδόθηκε ένας συντελεστής βαρύτητας, ο οποίος πολλαπλασιάστηκε με την τιμή του κάθε εικονοστοιχείου του. Ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε επιπέδου (layer) αντιπροσωπεύει το πόσο σημαντική είναι η αποφυγή των περιοχών που απεικονίζονται σε αυτό, σε σχέση με την αποφυγή των περιοχών των υπόλοιπων επιπέδων πληροφορίας. Δεδομένου αυτού, έπειτα από επισκόπηση της κατανομής των σημείων έναρξης και τερματισμού του αγωγού και των προς αποφυγή περιοχών στο χώρο, αποδόθηκε ποσοστό 30% στις αστικές/ημιαστικές περιοχές και 70% στις περιοχές του δικτύου Natura 2000. Έπειτα, τα επίπεδα πληροφορίας που προέκυψαν από τους αντίστοιχους πολλαπλασιασμούς, προστέθηκαν μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ένα ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας, στο οποίο η τιμή κάθε εικονοστοιχείου αντιπροσωπεύει το σταθμισμένο «κόστος», δηλαδή το πόσο ζημιογόνο, με βάση το είδος της περιοχής στην οποία εμπίπτει το εικονοστοιχείο, είναι να διέλθει ο αγωγός από αυτό.
- Προκειμένου να συνυπολογιστεί και ο παράγοντας της απόστασης, καθώς επιδιώκεται η χάραξη με το μικρότερο δυνατό μήκος, έγινε χρήση του εργαλείου Cost Distance. Στο εργαλείο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου το σημείο έναρξης του αγωγού και η επιφάνεια κόστους που προέκυψε από τη χρήση του εργαλείου Raster Calculator. Από τη

χρήση του εργαλείου προέκυψε η τελική επιφάνεια κόστους, που απεικονίζει το πόσο ζημιόγνο είναι να διέλθει ο αγωγός από το κάθε εικονοστοιχείο, συνυπολογίζοντας τόσο το είδος της περιοχής, όσο και την απόσταση από το σημείο έναρξης. Εκτός όμως από την επιφάνεια αυτή, δεδομένο εξόδου υπήρξε και το ψηφιδωτό επίπεδο πληροφορίας backlink, στο οποίο η τιμή του κάθε κελιού υποδεικνύει την κατεύθυνση προς το γειτονικό κελί με το μικρότερο κόστος.

- Καθορίστηκε η διαδρομή ελαχίστου κόστους, δηλαδή η ζητούμενη προκαταρκτική διαδρομή, με τη βοήθεια του εργαλείου Cost Path. Πιο συγκεκριμένα, το εργαλείο αυτό δέχτηκε ως δεδομένα εισόδου το σημείο τερματισμού του αγωγού, καθώς και την τελική επιφάνειας κόστους και το ψηφιδωτό επίπεδο backlink, που δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του Cost Distance. Από την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου, και πιο συγκεκριμένα την ένωση των κέντρων των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους, δημιουργήθηκε τελικά το επίπεδο πληροφορίας που περιέχει τη διαδρομή ελαχίστου κόστους ανάμεσα στο σημείο έναρξης και το σημείο τερματισμού.
- Η προκαταρκτική διαδρομή μετατράπηκε από ψηφιδωτή μορφή σε διανυσματική, πολυγωνική γραμμή, μέσω του εργαλείου Raster to Polyline.
- Τέλος, με στόχο την καλύτερη χαρτογραφική ποιότητα και τη ρεαλιστικότερη απόδοση της κατασκευής, οι αιχμηρές γωνίες της διανυσματικής πολυγωνικής γραμμής, που προέκυψε από το εργαλείο Raster to Polyline, εξομαλύνθηκαν. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρήση του εργαλείου Smooth Line και του αλγορίθμου PAEK.

Η προκαταρκτική διαδρομή που προέκυψε από το σύνολο των παραπάνω ενεργειών παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.7. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της έπαιξε η τιμή του συντελεστή βαρύτητας που αποδόθηκε σε καθένα από τα επίπεδα πληροφορίας των ζωνών ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών και των περιοχών του δικτύου Natura 2000. Η απόδοση των τιμών δεν έγινε τυχαία, αλλά έπειτα από την εξέταση διαφόρων συνδυασμών συντελεστών βαρύτητας. Από τους συνδυασμούς αυτούς, ως περισσότερο ικανοποιητική θεωρήθηκε η απόδοση του ποσοστού 30% στο επίπεδο πληροφορίας των ζωνών ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών και του ποσοστού 70% στο επίπεδο των περιοχών Natura 2000. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η διαδρομή, που προκύπτει από την παραπάνω κατανομή συντελεστών, αποφεύγει όλες τις περιοχές του δικτύου Natura 2000 και σχεδόν όλες τις ζώνες ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η διασταύρωση με τη ζώνη ασφαλείας της πόλης του Ρεθύμνου, λίγο πριν τον τερματισμό του αγωγού. Ωστόσο, η

διασταύρωση του αγωγού με τα όρια μιας ζώνης ασφαλείας (και όχι με την αστική περιοχή) προτιμήθηκε, έναντι μιας ή δύο διασταυρώσεων με περιοχές Natura, που θα προέκυπταν αναπόφευκτα, σε περίπτωση αύξησης του συντελεστή βαρύτητας του επιπέδου πληροφορίας των ζωνών ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών.

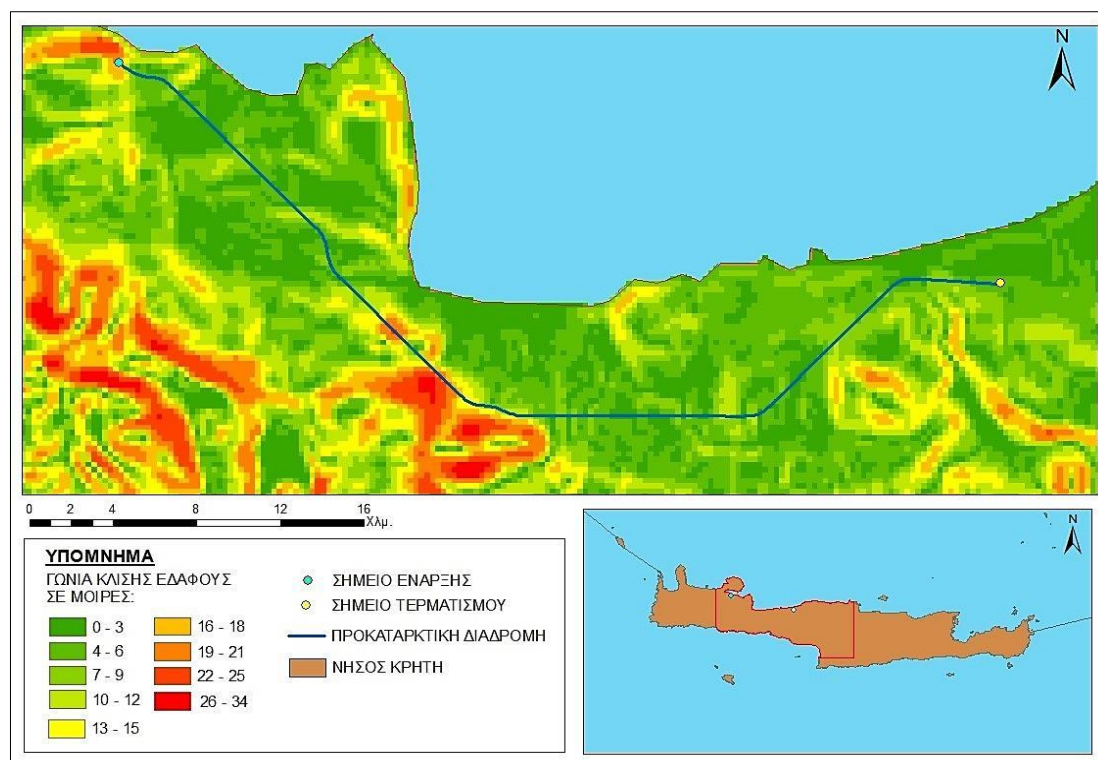


Εικόνα 5.7: Χάρτης απεικόνισης της προκαταρκτικής διαδρομής του χερσαίου αγωγού διασύνδεσης της πόλης των Χανίων και του Ρεθύμνου

5.3 Εντοπισμός των δυνητικά ασταθών περιοχών προς ανάλυση

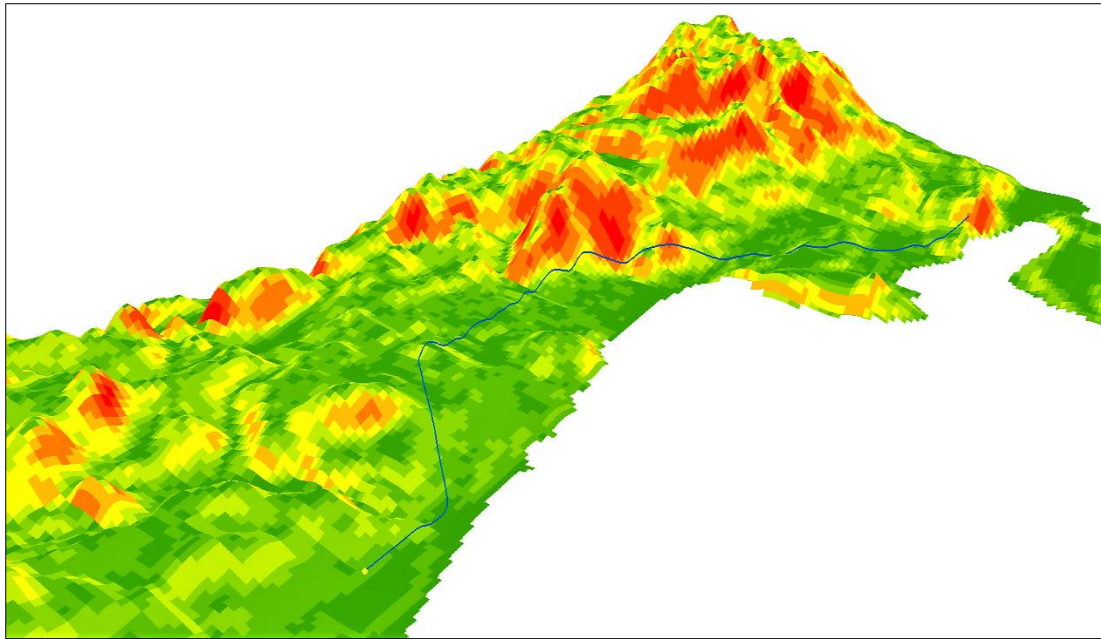
Έπειτα από τη διαμόρφωση της προκαταρκτικής διαδρομής, εντοπίστηκαν τα σημεία διασταύρωσης αυτής με επικλινείς περιοχές, προκειμένου αυτές να εξεταστούν ως προς την ευστάθεια τους υπό σεισμικές συνθήκες και να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί να έχουν αρνητικές συνέπειες στην ακεραιότητα του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε υπέρθεση του επιπέδου (layer) της προκαταρκτικής διαδρομής και του επιπέδου που απεικονίζει τις γωνίες κλίσης του εδάφους (Εικόνα 5.8) και παρατηρήθηκαν οι τιμές των γωνιών κλίσης, που σημειώνονται κατά την πορεία που ακολουθεί η προκαταρκτική διαδρομή. Ιδανικά, θα έπρεπε να εξεταστεί ως προς την ευστάθεια της όλη η περιοχή που διατρέχει ο αγωγός. Ωστόσο, καθώς η ανάλυση της ευστάθειας όλων των επικλινών περιοχών, με τις οποίες

διασταυρώνεται ο αγωγός, είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, αποφασίστηκε να εξεταστούν μόνο όσες από αυτές θεωρούνται περισσότερο επιρρεπείς σε σεισμικά επαγόμενη μετατόπιση ή κατολίσθηση. Στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής, ως τέτοιες θεωρήθηκαν οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από τις μεγαλύτερες κλίσεις της περιοχής μελέτης, δηλαδή όσες έχουν γωνία κλίσης μεγαλύτερη από 19 μοίρες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8, η προκαταρκτική διαδρομή του αγωγού διασταυρώνεται με δύο τέτοιες περιοχές.



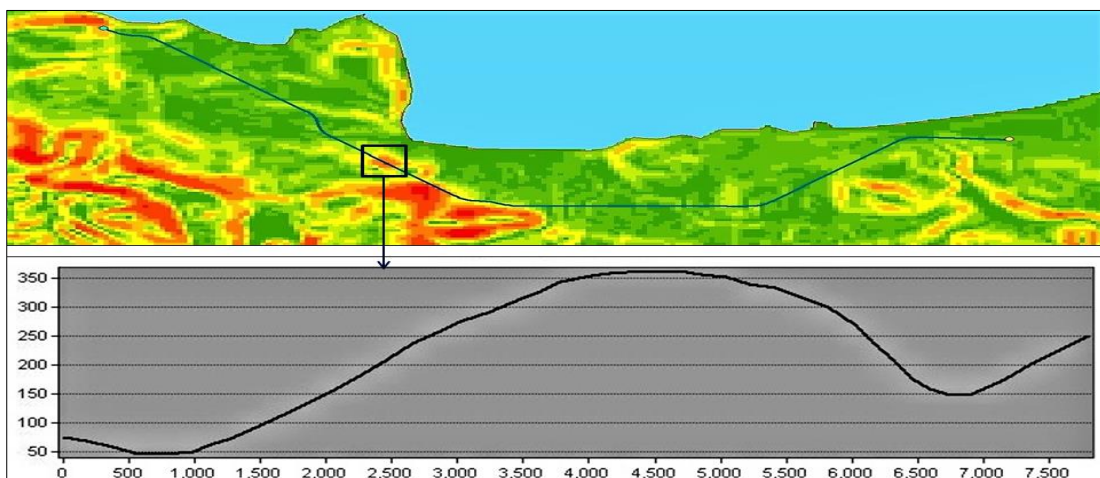
Εικόνα 5.8: Χάρτης απεικόνισης των διασταυρώσεων της προκαταρκτικής διαδρομής με δυνητικά ασταθείς περιοχές

Προκειμένου να διαμορφωθεί μια καλύτερη αντίληψη της μορφής του αναγλύφου των δυνητικά ασταθών περιοχών που διασταυρώνονται με την προκαταρκτική διαδρομή, δημιουργήθηκε μια τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό, τα επίπεδα πληροφορίας της προκαταρκτικής διαδρομής και των γωνιών κλίσης του εδάφους μεταφέρθηκαν στην εφαρμογή ArcScene, του λογισμικού ArcGIS. Στην εφαρμογή αυτή μεταφέρθηκε επίσης και το ΨΜΕ, που περιέχει την υψομετρική πληροφορία της περιοχής μελέτης, προκειμένου να αποτελέσει το τρισδιάστατο υπόβαθρο, πάνω στο οποίο θα προσαρμοστούν τα δύο άλλα επίπεδα πληροφορίας. Τέλος, προκειμένου να δοθεί έμφαση στην υψομετρική πληροφορία, η z-διάσταση των οντοτήτων πολλαπλασιάστηκε με τον συντελεστή 3,3. Το αποτέλεσμα που προέκυψε παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.

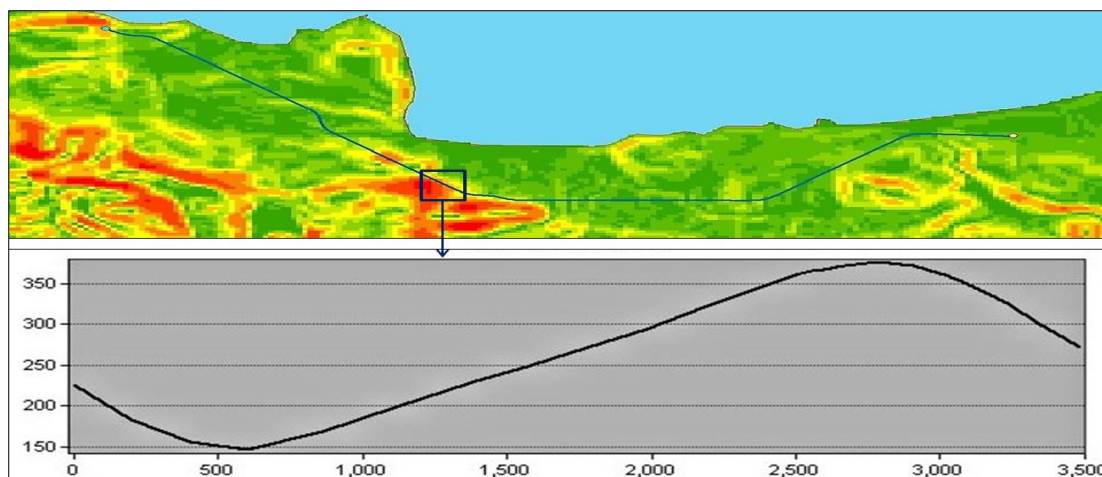


Εικόνα 5.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση της προκαταρκτικής διαδρομής και της περιοχής που διατρέχει, από βορειοανατολική όψη

Πέρα όμως από την γενικότερη μορφή του αναγλύφου των δυνητικά ασταθών περιοχών που διασταυρώνονται με την προκαταρκτική διαδρομή, ήταν απαραίτητος και ο υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Για την επίτευξη αυτού, σε καθεμία από τις δυνητικά ασταθείς περιοχές, που εντοπίστηκαν, δημιουργήθηκε κατακόρυφη τομή του άξονα της προκαταρκτικής διαδρομής με το υποκείμενο έδαφος (μηκοτομή). Πιο συγκεκριμένα, έγινε χρήση του 3D Analyst Toolbar της εφαρμογής ArcMap, και ειδικότερα των εργαλείων Interpolate Line και Profile Graph.



Εικόνα 5.10: Μηκοτομή πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής



Εικόνα 5.11: Μηκοτομή δεύτερης δυνητικά ασταθούς περιοχής

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω εικόνες, η πρώτη δυνητικά ασταθής περιοχή συντίθεται από δύο εδαφικά πρανή, ενώ η δεύτερη από ένα. Τα πρανή αυτά, στο εξής θα αποκαλούνται πρώτο, δεύτερο και τρίτο πρανές, αντίστοιχα.

5.4 Διερεύνηση της ευστάθειας των δυνητικά ασταθών πρανών και της αλληλεπίδρασης αυτών με τον αγωγό στο λογισμικό Abaqus

Η ανάλυση της ευστάθειας κάθε δυνητικά ασταθούς πρανούς, καθώς και η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης αυτού με το τμήμα του αγωγού, που το διασχίζει, πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του λογισμικού Abaqus. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε περίπτωση πρανούς-αγωγού ακολουθήθηκαν οι εξής ενέργειες:

- Σύνθεση πρώτου αρχείου εισόδου (input file), το οποίο περιλαμβάνει την περιγραφή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του εκάστοτε πρανούς και την επιβολή της σεισμικής δύναμης σε αυτό.
- Εκτέλεση της ανάλυσης του πρώτου αρχείου εισόδου στο λογισμικό και εξαγωγή των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων της ελεύθερης επιφάνειας του πρανούς (U_1 και U_2).
- Σύνθεση δεύτερου αρχείου εισόδου (input file), το οποίο περιλαμβάνει την περιγραφή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του εκάστοτε τμήματος του αγωγού και την επιβολή των μετατοπίσεων, που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα, σε αυτό.

- Εκτέλεση της ανάλυσης του δεύτερου αρχείου εισόδου στο λογισμικό και εξαγωγή των αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του αγωγού.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία σύνθεσης καθενός από τα δύο αρχεία εισόδου, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ή υπολογίστηκαν για τη συμπλήρωση των αρχείων εισόδου και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

A. Σύνθεση πρώτου αρχείου εισόδου

Για τη σύνθεση του αρχείου εισόδου του εκάστοτε πρανούς ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Αντλήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρανούς, και πιο συγκεκριμένα το μήκος της κεκλιμένης επιφάνειας και της στέψης του, από την αντίστοιχη μηκοτομή του προγράμματος ArcGIS. Σημειώνεται ότι η ελεύθερη επιφάνεια του κάθε πρανούς απλοποιήθηκε σε αλληλουχία ευθειών, έτσι ώστε να μπορεί να μοντελοποιηθεί ευκολότερα. Έπειτα, βάσει των διαστάσεων που υπολογίστηκαν, ορίστηκαν οι συντεταγμένες των ακραίων κόμβων των ευθυγράμμων τμημάτων που συνθέτουν την τομή του πρανούς που αναλύεται, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του λογισμικού. Ακολούθησε η διακριτοποίηση, για την επίτευξη της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία (elements) τύπου CPE4, δηλαδή στερεά (solid), δισδιάστατα (bilinear), τετραπλευρικά και αποτελούμενα από 4 κόμβους στοιχεία. Επιπλέον, κάθε στοιχείο επιλέχθηκε να έχει διαστάσεις 10×10 μέτρα.
- Ορίστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού του πρανούς, για το οποίο έγιναν δύο παραδοχές, ότι είναι ομοιογενές και ότι η συμπεριφορά του μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά μέσω του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Πιο συγκεκριμένα, καταχωρήθηκαν οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου Poisson (ν), καθώς και οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ), της γωνίας διασταλτικότητας (ψ) και της συνοχής (c).
- Ορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες (initial conditions) του πρανούς, και πιο συγκεκριμένα οι γεωστατικές ολικές τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό λόγω του ίδιου βάρους του.

Αρχικά, όσον αφορά τις κατακόρυφες τάσεις, καταχωρήθηκαν δύο αντιπροσωπευτικές τιμές, αυτή που αντιστοιχεί στη στέψη του πρανούς και αυτή που αντιστοιχεί στον πυθμένα του. Οι τιμές αυτές προέκυψαν, έπειτα από εφαρμογή του τύπου $\sigma_v = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \times h_i)$, και ειδικότερα της απλοποιημένης μορφής του, $\sigma_v = \gamma \times h$, καθώς όπως ήδη αναφέρθηκε,

έγινε η παραδοχή ότι το εδαφικό υλικό είναι ομοιογενές και κατά συνέπεια δεν αποτελείται από στρώσεις διαφορετικού υλικού. Στον παραπάνω τύπο, σ_v είναι η κατακόρυφη ολική τάση, γ είναι το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού και h είναι το βάθος, μετρημένο από την επιφάνεια της στέψης του πρανούς.

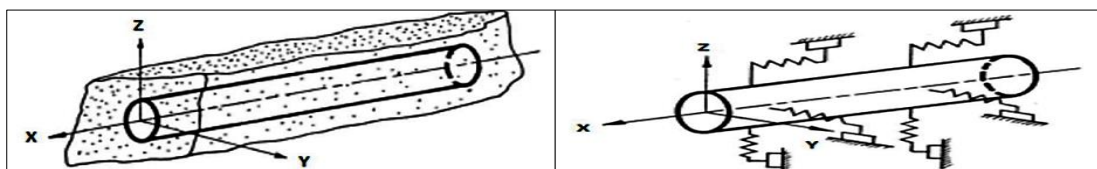
Έπειτα, όσον αφορά τις οριζόντιες τάσεις, καταχωρήθηκε η τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων, k_0 , έτσι ώστε με τη βοήθεια αυτού το λογισμικό να μπορέσει να εφαρμόσει τον τύπο $\sigma_h = k_0 \times \sigma_v$. Στον παραπάνω τύπο, σ_h είναι η τιμή της οριζόντιας ολικής τάσης και σ_v η τιμή της ήδη υπολογισμένης κατακόρυφης ολικής τάσης.

- Δημιουργήθηκε το πρώτο βήμα (step) της ανάλυσης, στο οποίο περιγράφεται η κατάσταση του πρανούς, πριν την εκδήλωση του σεισμού. Πιο συγκεκριμένα, ορίστηκε ότι κατά την εν λόγω χρονική περίοδο, στο πρανές επικρατεί γεωστατική κατάσταση και ότι κατά συνέπεια τα φορτία που αυτό δέχεται οφείλονται στο βάρος του. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν και οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες στήριξης του πρανούς κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ειδικότερα, καταγράφηκε ότι στη βάση του πρανούς εφαρμόζεται άρθρωση, η οποία περιορίζει την κίνηση τόσο κατά τον άξονα των x όσο και κατά τον άξονα των y , ενώ στις κατακόρυφες πλευρές της τομής του πρανούς εφαρμόζεται κύλιση, η οποία περιορίζει την κίνηση κατά τον άξονα των x . Σημειώνεται, ότι στην ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς δεν εφαρμόζεται κάποιος τύπος στήριξης.
- Διαμορφώθηκε το δεύτερο βήμα (step) της ανάλυσης, στο οποίο περιγράφεται η επιβολή της σεισμικής δύναμης στο πρανές. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκε ότι η σεισμική δύναμη αντιπροσωπεύεται από μια ψευδοστατική οριζόντια δύναμη, ανηγμένη στον όγκο του πρανούς και με μέτρο $k \times \gamma$, όπου k είναι ο συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης και γ είναι το ειδικό βάρος του εδαφικού υλικού.

B. Σύνθεση δεύτερου αρχείου εισόδου

Σκοπός της δημιουργίας του δεύτερου αρχείου εισόδου είναι η διερεύνηση της επίδρασης των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του εκάστοτε πρανούς στο αντίστοιχο τμήμα του αγωγού. Κατά συνέπεια, στο περιεχόμενο του αρχείου θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται τόσο η περιγραφή του αγωγού, όσο και του εδάφους που τον περιβάλλει. Από τα παραπάνω, η περιγραφή του αγωγού έγινε κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που έγινε και η περιγραφή του πρανούς στο πρώτο αρχείο εισόδου. Ωστόσο, η περιγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους, που περιβάλλει τον αγωγό, έγινε με τη χρήση ισοδύναμων εδαφικών, διακριτών, μη γραμμικών και κατάλληλης ακαμψίας

ελατηρίων. Σημειώνεται, ότι θεωρείται, πως τα ελατήρια είναι κατανεμημένα κατά μήκος του άξονα του αγωγού, στις τρεις ορθογώνιες διευθύνσεις, προκειμένου η αναπαράσταση της αντίστασης του εδάφους να είναι ρεαλιστική (Psyrras & Sextos, 2018). Ειδικότερα, τοποθετούνται αξονικά και κάθετα στον άξονα του αγωγού ελατήρια, με τα τελευταία να διακρίνονται σε πλευρικά, καθώς και προς τα άνω και κάτω κάθετα.



Εικόνα 5.12: Στο αριστερό σχήμα παρουσιάζονται οι περιορισμοί που επιβάλλονται στον αγωγό λόγω του εδάφους, ενώ στο δεξιό σχήμα απεικονίζεται η προσομοίωση των περιορισμών αυτών, μέσω των εδαφικών ελατηρίων (Πηγή: American Lifelines Alliance, 2001).

Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την διαμόρφωση του αρχείου είναι τα εξής:

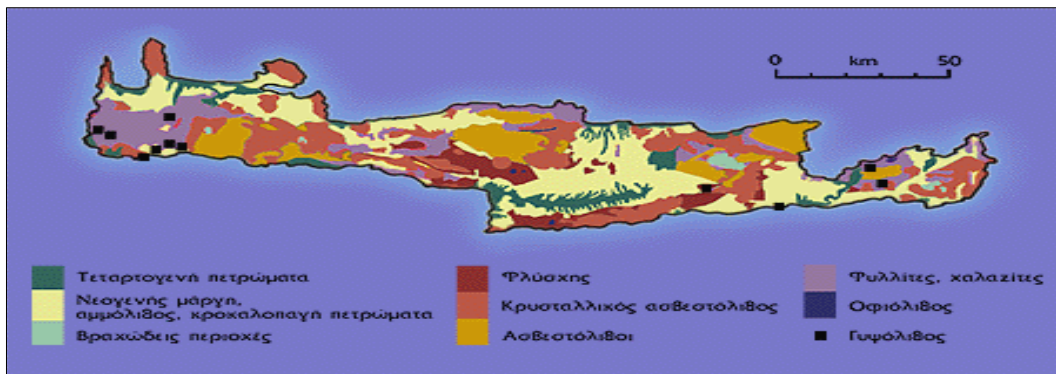
- Αρχικά, όσον αφορά τη μοντελοποίηση του αγωγού, αυτός αντιμετωπίστηκε ως γραμμική οντότητα που έχει το ίδιο σχήμα και τις ίδιες διαστάσεις με την ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς, από το οποίο διέρχεται. Δεδομένων των διαστάσεων αυτών, ορίστηκαν οι συντεταγμένες των ακραίων κόμβων των ευθυγράμμων τμημάτων που συνθέτουν το τμήμα του αγωγού που μελετάται και κατά συνέπεια ολοκληρώθηκε ο ορισμός του μοντέλου του αγωγού. Ακολούθησε η διακριτοποίηση του, για την επίτευξη της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία τύπου PIPE21, δηλαδή στοιχεία που έχουν τα χαρακτηριστικά μιας δοκού (beam elements), είναι γραμμικά και αποτελούνται από δύο κόμβους. Η πυκνότητα των κόμβων ορίστηκε ίδια με αυτή των κόμβων του πρανούς, δηλαδή ένας κόμβος ανά 10 μέτρα.

Στο ίδιο στάδιο, πραγματοποιήθηκε και η μοντελοποίηση του εδάφους που περιβάλλει τον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα, το έδαφος σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να εφάπτεται με την επάνω πλευρά της γραμμικής οντότητας του αγωγού και να έχει ύψος 10 μέτρα. Για την διακριτοποίηση του χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία τύπου PSI24, δηλαδή στοιχεία που είναι σχεδιασμένα για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των αγωγών με το έδαφος, είναι δισδιάστατα και αποτελούνται από 4 κόμβους. Η πυκνότητα των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε ήταν επίσης ένας κόμβος ανά 10 μέτρα.

- Ορίστηκαν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, καταχωρήθηκε η εξωτερική του ακτίνα, το πάχος του τοιχώματος του, καθώς και το υλικό κατασκευής του και οι μηχανικές ιδιότητες αυτού, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας (E), ο λόγος Poisson (ν) και η τάση διαρροής (yield stress).
- Ορίστηκε η αντοχή των ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε και καταγράφηκε η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί στο κάθε ελατήριο και η αντίστοιχη μετατόπιση, σύμφωνα με τις εξισώσεις που προτείνει ο διεθνής Κανονισμός του φορέα ALA (American Lifelines Alliance, 2001). Οι εξισώσεις αυτές παρατίθενται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.
- Δημιουργήθηκε το βήμα (step) της ανάλυσης, στο οποίο περιγράφεται η επιβολή των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων, που σημειώθηκαν στην ελεύθερη επιφάνεια του πρανούς, στους αντίστοιχους κόμβους του τμήματος που προσομοιώνει το έδαφος που περιβάλλει τον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα, οι κατά x και κατά y συνιστώσες των μετατοπίσεων (U1 και U2, αντίστοιχα) επιβλήθηκαν ξεχωριστά στους αντίστοιχους κόμβους του εδάφους, υπό τη μορφή συνοριακών συνθηκών. Επιπλέον, περιορίστηκε η κίνηση των ακριανών κόμβων του αγωγού και του τμήματος που προσομοιώνει το έδαφος, κατά τους άξονες x και y.

Γ. Συγκέντρωση απαραίτητων δεδομένων για τη συμπλήρωση των αρχείων

Αρχικά, για τη συμπλήρωση του πρώτου αρχείου εισόδου ήταν απαραίτητη η συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με το εδαφικό υλικό της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκε ο γεωλογικός χάρτης της νήσου Κρήτης (Εικόνα 5.13), προκειμένου σε πρώτη φάση να αναγνωρισθεί το είδος του εδαφικού υλικού. Από επισκόπηση του χάρτη αυτού, διαπιστώθηκε ότι η περιοχή μελέτης καλύπτεται στο μεγαλύτερο μέρος της από νεογεννή μάργα.



Εικόνα 5.13: Γεωλογικός χάρτης Κρήτης (Πηγή: Rackham & Moody, 1997)

Ακολούθησε η αναζήτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές της συνοχής (c), του ειδικού βάρους (γ) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (φ) υποδείχτηκαν από τον κ. Ψαρρόπουλο, η τιμή της γωνίας διασταλτικότητας (ψ) αντλήθηκε από μελέτες του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου της Γιούτα, (Bartlett, 2012), η τιμή του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων (k_0) υπολογίστηκε από τον τύπο $k_0 = 1 - \sin \varphi$, η τιμή του λόγου Poisson (ν) υπολογίστηκε από τον τύπο $k_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ και τέλος η τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E) υπολογίστηκε από τον τύπο (Σακελλαρίου, 2008):

$$E = 2 \times G \times (1 + \nu) \quad (5.1)$$

Όπου,

$$G = \text{μέτρο ακαμψίας} = \rho \times V_s^2$$

$$\rho = \text{πυκνότητα υλικού} = \frac{\gamma}{g}$$

V_s = ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων, η οποία για το υλικό της μάργας θεωρήθηκε ίση με 700 m/s

Το σύνολο των χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού της περιοχής μελέτης συγκεντρώνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Μάργας

Χαρακτηριστικά Μάργας	
Συνοχή (c)	35 kPa
Ειδικό Βάρος (γ)	20 kN/m ³
Γωνία Εσωτερικής Τριβής (φ)	22°
Γωνία Διασταλτικότητας (ψ)	0,1°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	27 x 10 ⁵ kPa
Συντελεστής Πλευρικών Ωθήσεων (k_0)	0,625
Λόγος Poisson (ν)	0.38

Εκτός από τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού της περιοχής μελέτης, για την συμπλήρωση και την εκτέλεση της ανάλυσης του πρώτου αρχείου εισόδου ήταν απαραίτητος και ο προσδιορισμός του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης (k). Για την επίτευξη αυτού, έγινε χρήση του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας και διαπιστώθηκε ότι η περιοχή μελέτης ανήκει στη Ζώνη II, η οποία αντιστοιχεί σε συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης 0,24. Ωστόσο, καθώς έχει επιλεγεί η ψευδοστατική μέθοδος ως μέθοδος ανάλυσης της ευστάθειας, αποφασίστηκε ως τιμή του συντελεστή επιτάχυνσης να χρησιμοποιηθεί το ένα δεύτερο της τιμής που προτείνει ο Κανονισμός, δηλαδή η τιμή 0,12.

Ακολούθησε ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του αγωγού και ο υπολογισμός της αντοχής των εδαφικών ελατηρίων, τα οποία ήταν απαραίτητα για τη συμπλήρωση του δεύτερου αρχείου εισόδου. Όσον αφορά τον αγωγό, σε αυτόν αποδόθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του αγωγού

Χαρακτηριστικά Αγωγού	
Υλικό Κατασκευής	Χάλυβας
Μέτρο Ελαστικότητας Χάλυβα (E)	$206,8 \times 10^6$ kPa
Λόγος Poisson Χάλυβα (ν)	0.3
Τάση διαρροής Χάλυβα (Yield Stress)	413.7×10^6 kPa
Υλικό Επένδυσης	Σκυρόδεμα
Εξωτερική Ακτίνα (r)	0.61 m
Πάχος τοιχώματος (t)	0,0254 m
Βάθος Ταφής (H)	$1,5 \text{ m} + r = 2,11 \text{ m}$

Τέλος, με βάση τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού και του αγωγού, καθώς και τις εξισώσεις του διεθνή Κανονισμού του ALA, υπολογίστηκαν οι τιμές της αντοχής των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

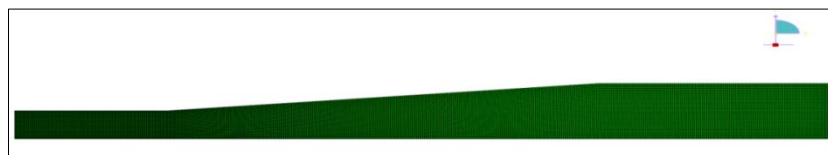
Πίνακας 5.3: Μέγιστες τιμές δύναμης και μετατόπισης των εδαφικών ελατηρίων

Αξονικά Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (T_u)	158,994 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_t)	0.008 m
Οριζόντια/Πλευρικά Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (P_u)	338,888 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_p)	0,109 m
Κάθετα (προς τα άνω) Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (Q_u)	169,961 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_{qu})	0,211 m
Κάθετα (προς τα κάτω) Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (Q_d)	986,375 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_{qd})	0,244 m

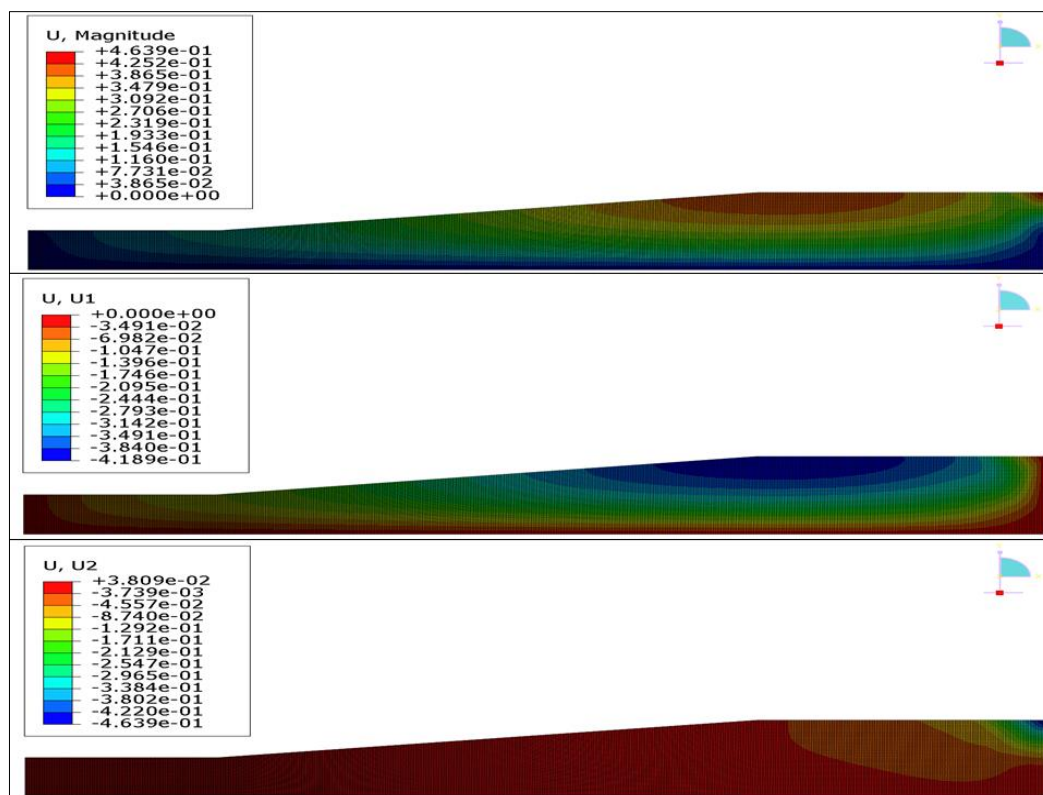
Δ. Αποτελέσματα αναλύσεων

Θα πρέπει να διευκρινιστεί, ότι τα δύο πρηνή της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής εξετάστηκαν τόσο μεμονωμένα, όσο και ενιαία. Στην περίπτωση αντιμετώπισης του κάθε πρηνούς μεμονωμένα, η ανάλυση της ευστάθειας

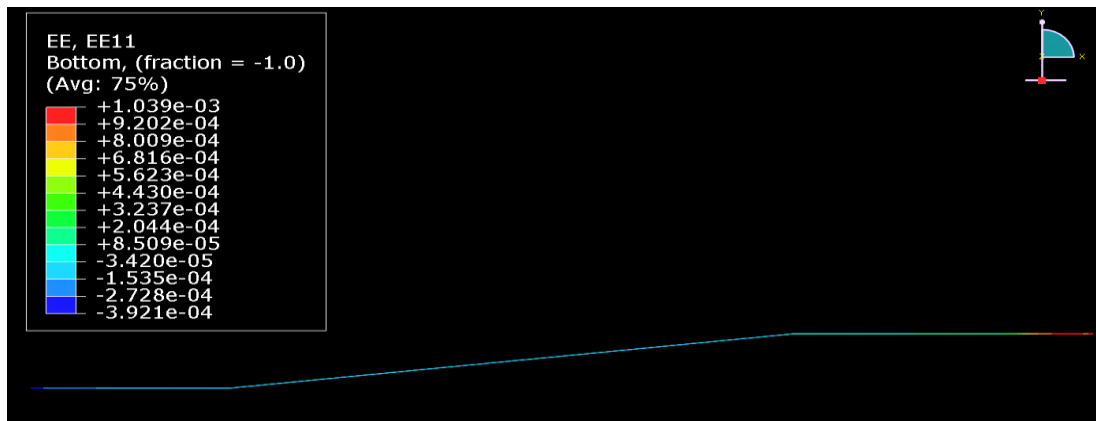
καθενός από αυτά πραγματοποιήθηκε μόνο για εκείνη τη φορά της ψευδοστατικής δύναμης που μπορεί να επιφέρει δυσμενείς συνέπειες στην ισορροπία του. Αντίθετα, στην περίπτωση αντιμετώπισης των δυο πρανών ως ενιαία περιοχή, η ανάλυση της ευστάθειας έγινε και για τις δύο πιθανές φορές ψευδοστατικής δύναμης. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση μεμονωμένης μελέτης των πρανών, για την μοντελοποίηση του πρώτου, χρησιμοποιήθηκαν 26166 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 25584 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, στο πρανές εφαρμόστηκε ψευδοστατική δύναμη με αρνητική φορά. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 1068 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 1066 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.14: Μοντέλο πρώτου πρανούς

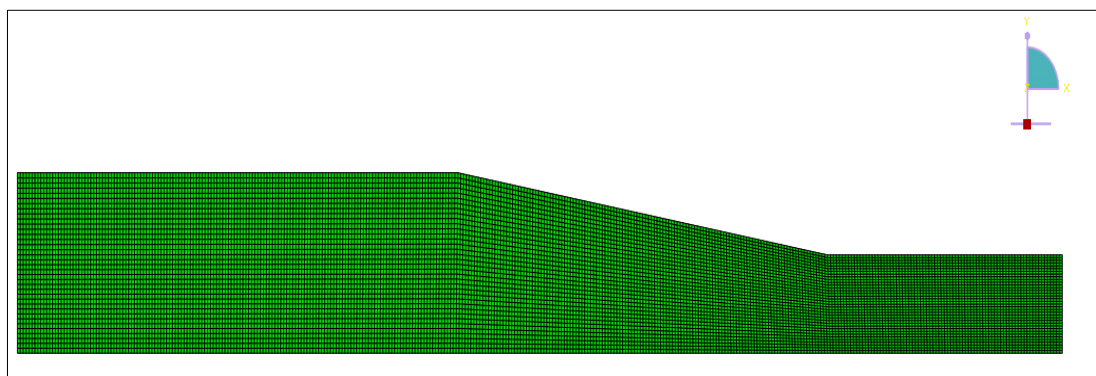


Εικόνα 5.15: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y (U_1 και U_2), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του πρώτου πρανούς

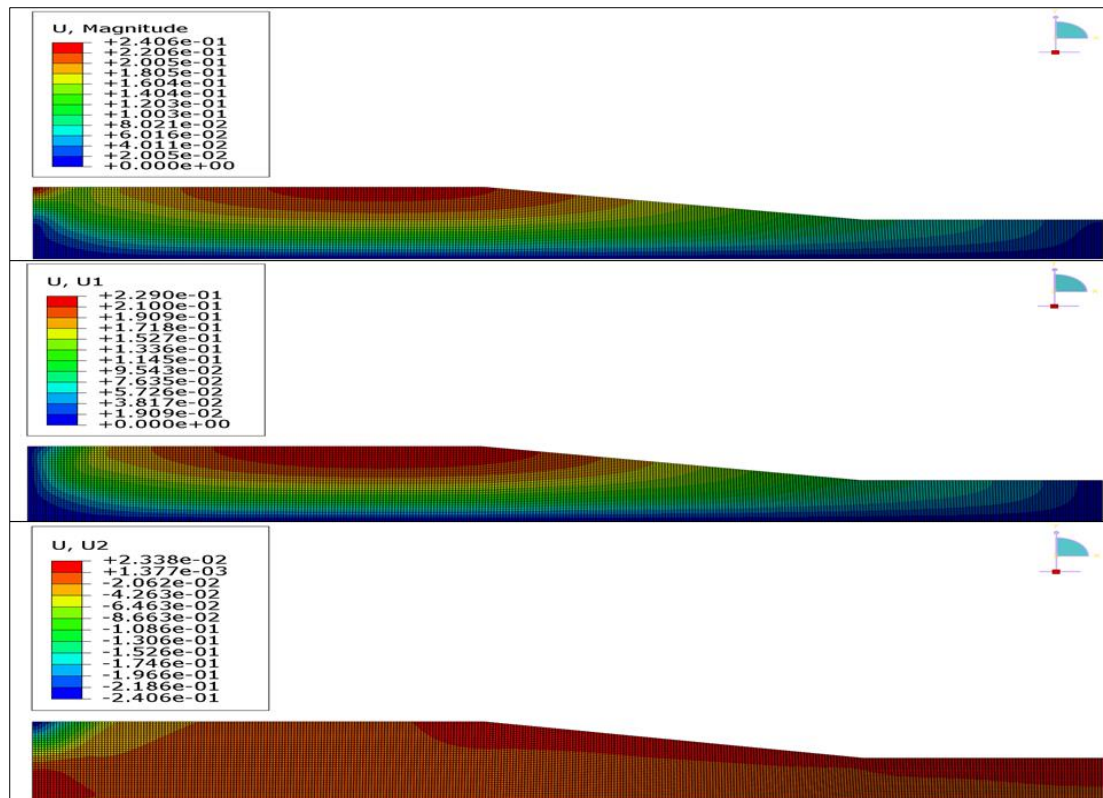


Εικόνα 5.16: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το πρώτο πρανές.

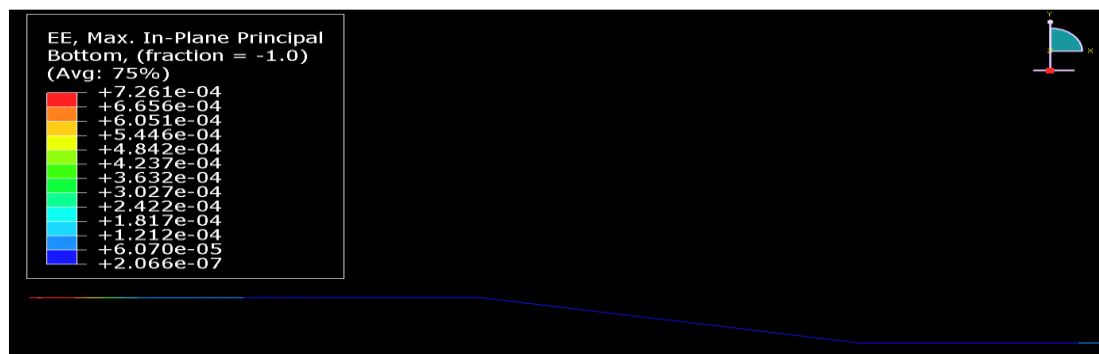
Για τη μοντελοποίηση του δεύτερου πρανούς χρησιμοποιήθηκαν 13246 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 12852 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς έγινε για θετική φορά της ψευδοστατικής δύναμης. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 716 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 714 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.17: Μοντέλο δεύτερου πρανούς



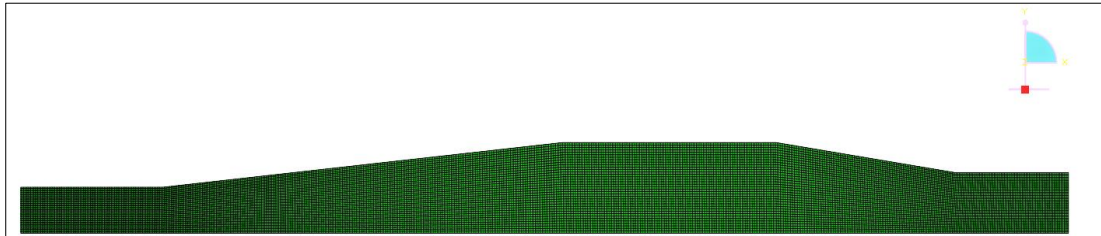
Εικόνα 5.18: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του δεύτερου πρανούς



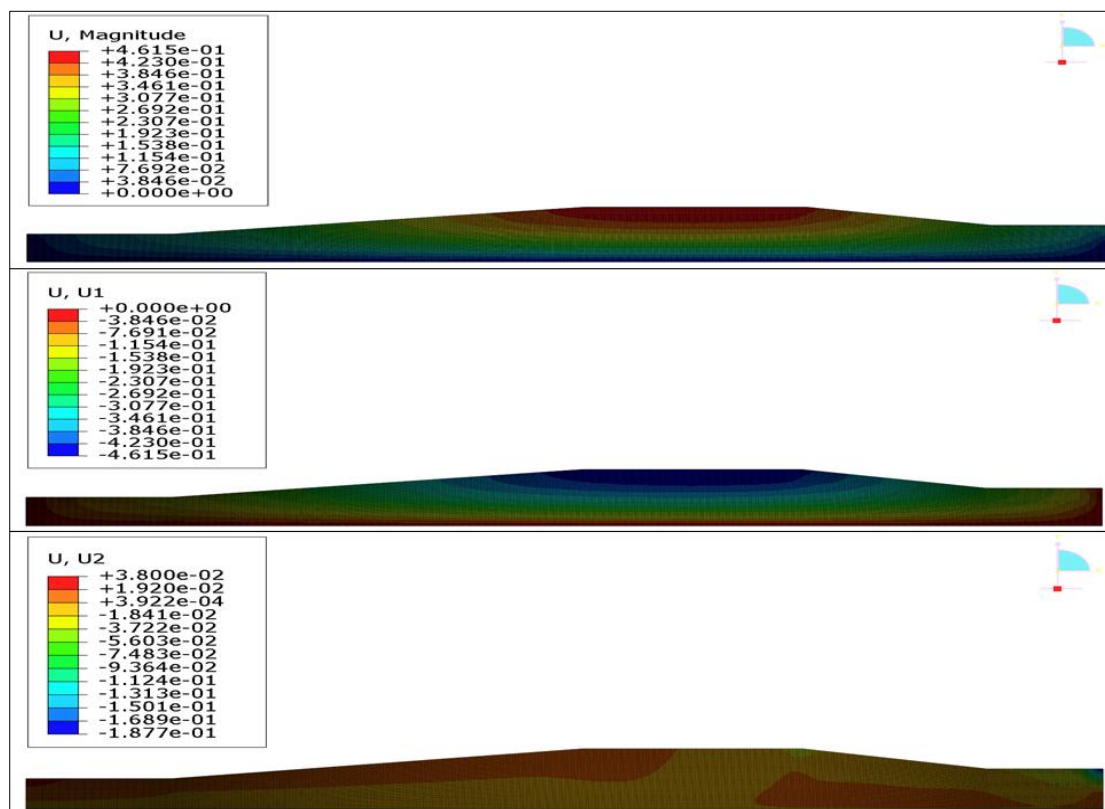
Εικόνα 5.19: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE_{11}) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το δεύτερο πρανές.

Για τη μοντελοποίηση των δύο πρώτων πρανών ως μια ενιαία περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν 28120 κόμβοι και 27343 στοιχεία, τύπου CPE4. Η ευστάθεια της περιοχής εξετάστηκε τόσο για αρνητική, όσο και για θετική φορά της ψευδοστατικής (σεισμικής) δύναμης. Επιπλέον, όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει τη συγκεκριμένη περιοχή, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 1480

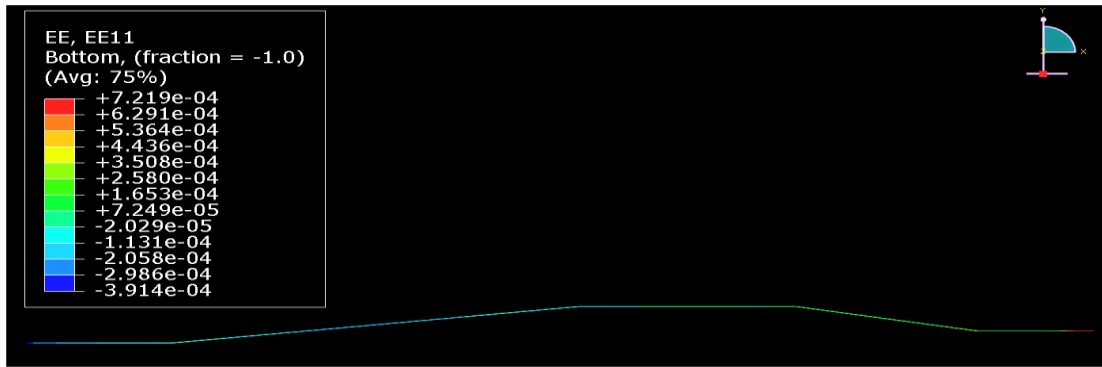
κόμβους και 1478 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Η πυκνότητα των κόμβων και στις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης επιλέχθηκε να είναι ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται το μοντέλο των δύο πρηνών ως ενιαία περιοχή, καθώς και οι μετατοπίσεις των πρηνών και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις του αγωγού, αρχικά λόγω αρνητικής και στη συνέχεια λόγω θετικής ψευδοστατικής δύναμης.



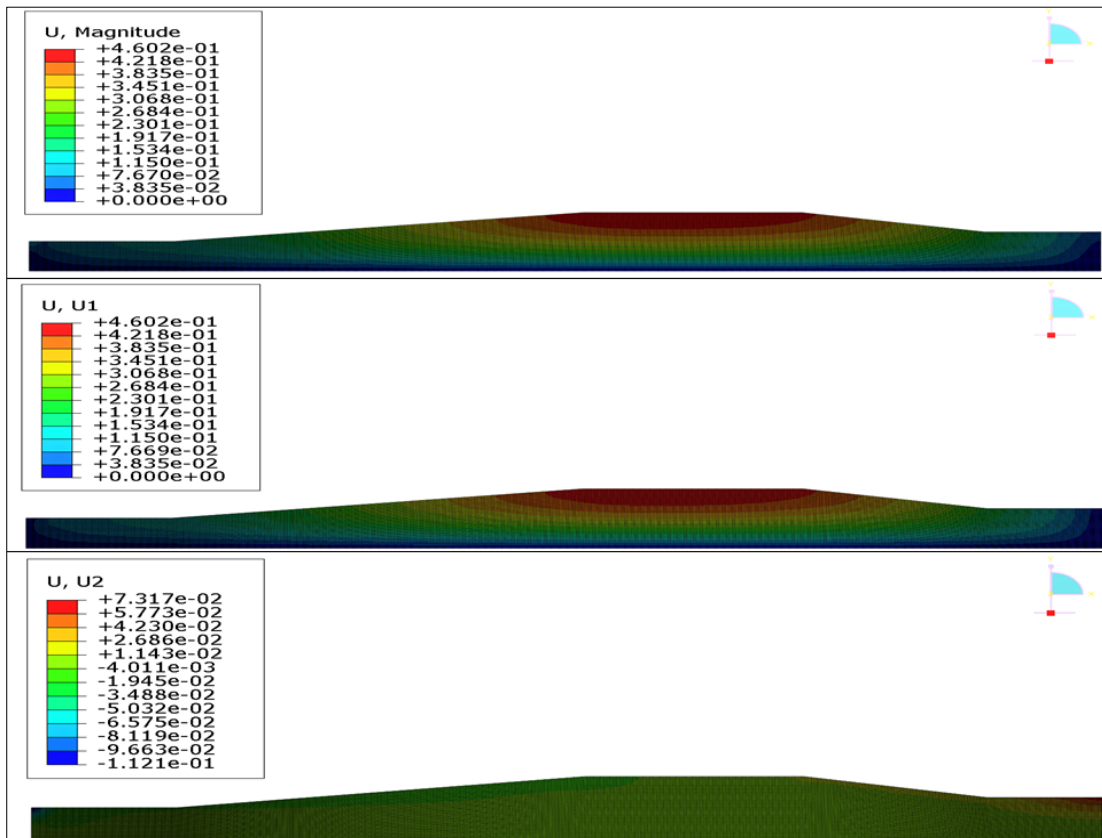
Εικόνα 5.20: Μοντέλο πρώτου και δεύτερου πρηνούς της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής



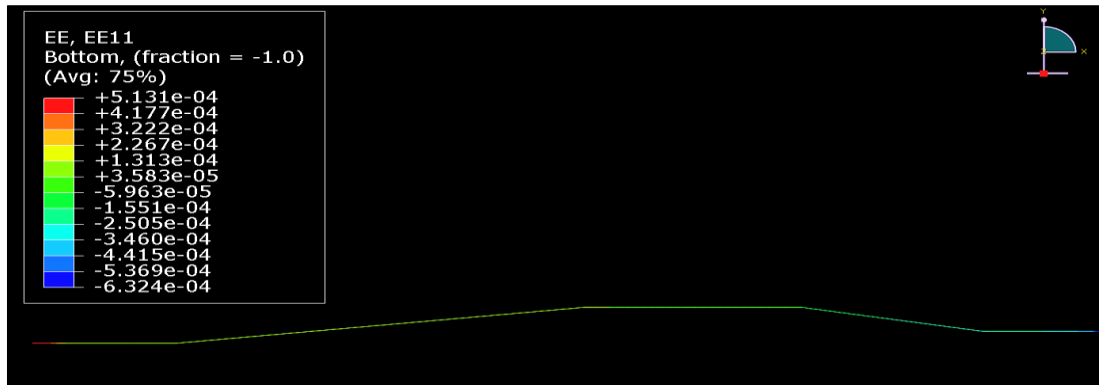
Εικόνα 5.21: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y (U_1 και U_2), των μετατοπίσεων της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής, που προέκυψαν έπειτα από επιβολή αρνητικής ψευδοστατικής δύναμης.



Εικόνα 5.22: Απεικόνιση των προκαλούμενων από αρνητική ψευδοστατική δύναμη αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από την πρώτη δυναμικά ασταθή περιοχή.

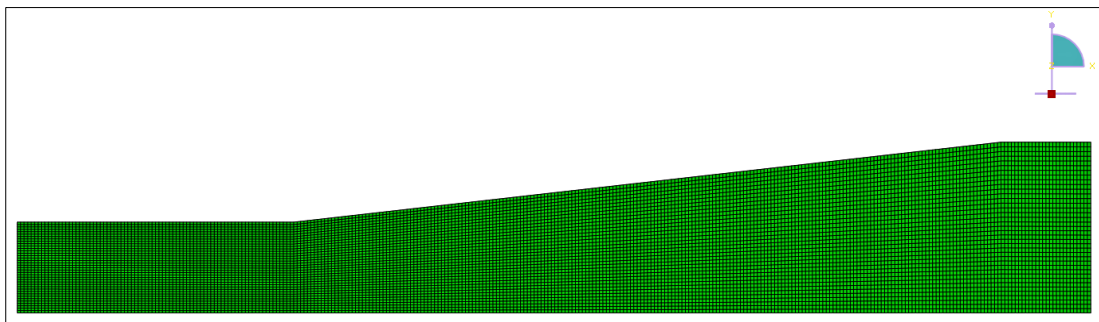


Εικόνα 5.23: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y (U_1 και U_2), των μετατοπίσεων της πρώτης δυναμικά ασταθούς περιοχής, που προέκυψαν έπειτα από επιβολή θετικής ψευδοστατικής δύναμης.

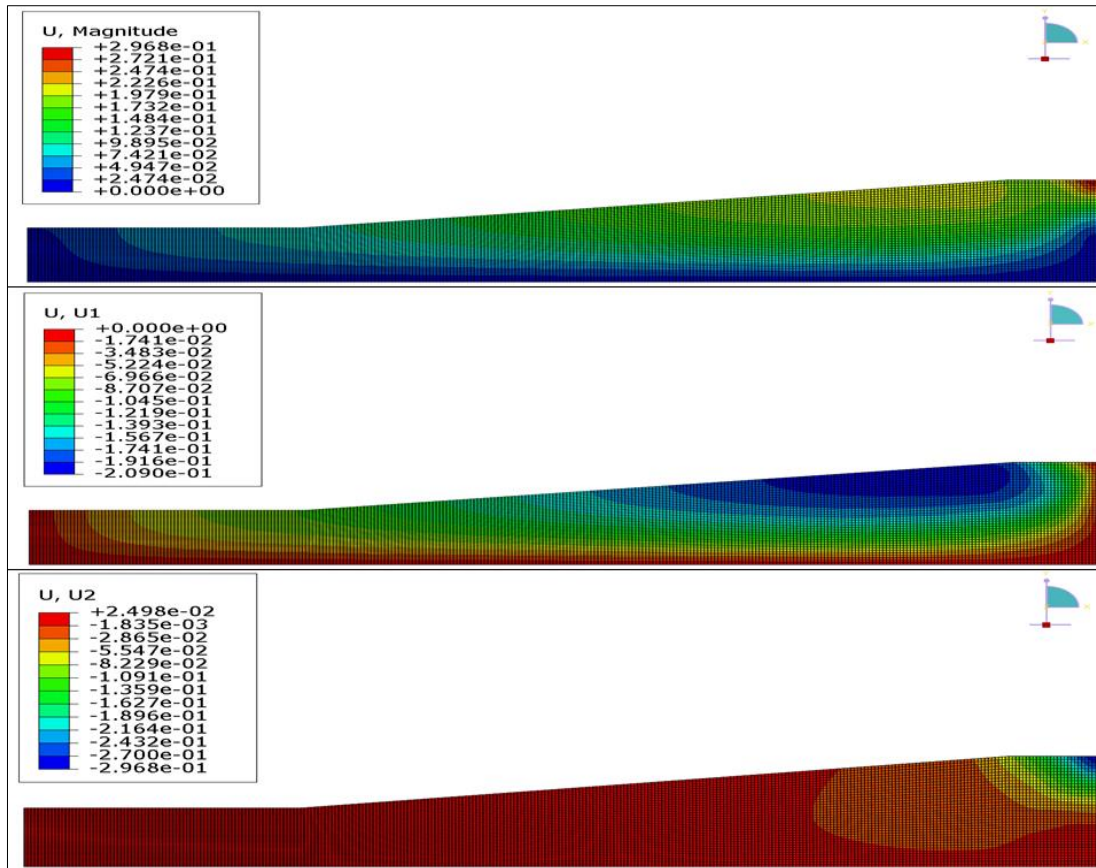


Εικόνα 5.24: Απεικόνιση των προκαλούμενων από θετική ψευδοστατική δύναμη αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από την πρώτη δυναμικά ασταθή περιοχή.

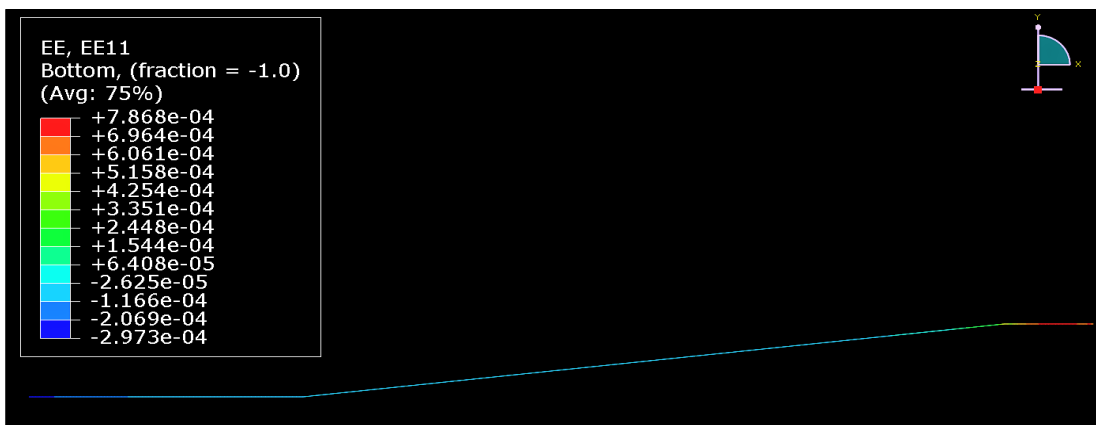
Τέλος, για τη μοντελοποίηση του τρίτου πρανούς χρησιμοποιήθηκαν 12207 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 11856 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς έγινε για αρνητική φορά της ψευδοστατικής δύναμης. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 626 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 724 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.25: Μοντέλο τρίτου πρανούς



Εικόνα 5.26: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του τρίτου πρανούς



Εικόνα 5.27: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων ($EE11$) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το τρίτο πρανές.

Έπειτα από τη μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων, προέκυψε το συμπέρασμα ότι όλες οι περιπτώσεις πρανών-αγωγών ακολουθούν

αντίστοιχη συμπεριφορά. Αρχικά, όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πρανών κατά τον άξονα των x , αυτές έχουν σχετικά μικρή τιμή, δηλαδή από μερικές μονάδες έως μερικές δεκάδες εκατοστών. Επιπλέον σε όλες τις περιπτώσεις, το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της x -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται μεταξύ του επάνω μέρους της κεκλιμένης πλευράς και της στέψης του πρανούς. Έπειτα, όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πρανών κατά τον άξονα των y , αυτές έχουν επίσης τιμές της τάξεως των μερικών μονάδων έως μερικών δεκάδων εκατοστών. Το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της y -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται κάθε φορά σε εκείνη την άκρη της τομής του πρανούς, που λόγω της επίδρασης της ψευδοστατικής δύναμης και των συνοριακών συνθηκών εφελκύεται. Σε αυτό το σημείο της τομής παρατηρείται γενικά αρκετά μεγάλη αρνητική y -μετατόπιση (βύθιση) του εδάφους, η οποία από την μια μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω των συνοριακών συνθηκών, αλλά από την άλλη θεωρείται πλασματική. Για το λόγο αυτό, οι τιμές της y -συνιστώσας στα σημεία αυτά δεν λήφθηκαν υπόψη, αλλά διορθώθηκαν, έτσι ώστε να είναι περισσότερο ρεαλιστικές. Τέλος, όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, αυτές προέκυψαν επίσης μικρές, με τιμές μικρότερες του 1%. Οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών και θλιπτικών αξονικών παραμορφώσεων για την κάθε περίπτωση παρατίθενται στον Πίνακα 5.4. Τα σημεία εφαρμογής των παραμορφώσεων αυτών εντοπίζονται στα άκρα του εκάστοτε τμήματος του αγωγού.

Πίνακας 5.4: Μέγιστες, εφελκυστικές και θλιπτικές, αξονικές παραμορφώσεις που προκάλεσαν τα διάφορα πρανά στον αγωγό.

	1° πρανές	2° πρανές	1° και 2° πρανές		3° πρανές
			Αρνητική ψευδοστατική δύναμη	Θετική ψευδοστατική δύναμη	
Μέγιστη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση	0,1 %	0,07 %	0,07 %	0,05 %	0,08 %
Μέγιστη αξονική θλιπτική παραμόρφωση	0,04 %	0,03 %	0,04 %	0,06 %	0,03 %

5.5 Έλεγχος των μέγιστων παραμορφώσεων του αγωγού στο λογισμικό ArcGIS

Μετά τον υπολογισμό των τιμών των παραμορφώσεων, ακολούθησε η εισαγωγή των μεγαλύτερων από αυτές στο λογισμικό ArcGIS, προκειμένου να

διαπιστωθεί, εάν ξεπερνάνε το επιτρεπτό όριο και κατά συνέπεια εάν η προκαταρκτική διαδρομή μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής. Διευκρινίζεται, ότι για την πρώτη δυνητικά ασταθή περιοχή χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων που προέκυψαν από τις αναλύσεις των δύο πρώτων πρανών ως ενιαία περιοχή. Η επιλογή αυτή έγινε, καθώς θεωρήθηκε ότι τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων επηρεάζονται λιγότερο από την επίδραση των συνοριακών συνθηκών και επομένως μπορούν να χαρακτηριστούν και ως περισσότερο ρεαλιστικά. Επιπλέον, επειδή ο έλεγχος και των τεσσάρων αξονικών παραμορφώσεων, που προκύπτουν από τις εν λόγω αναλύσεις, για θετική και αρνητική ψευδοστατική δύναμη αντίστοιχα, θα ήταν άσκοπος, επιλέχθηκαν να εισαχθούν στο λογισμικό η μέγιστη εφελκυστική και η μέγιστη θλιπτική αξονική παραμόρφωση.

Πίνακας 5.5: Μέγιστες τιμές παραμόρφωσης που μεταφέρθηκαν στο ArcGIS

	Μέγιστη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση	Μέγιστη αξονική θλιπτική παραμόρφωση
1 ^ο και 2 ^ο πρανές	0,07 %	0,06 %
3 ^ο πρανές	0,08 %	0,03 %

Όσον αφορά τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές αξονικής, εφελκυστικής και θλιπτικής, παραμόρφωσης, αυτές ορίστηκαν βάσει των Προτύπων του Ευρωκώδικα 8, για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών (British Standards Institution, 2006). Πιο συγκεκριμένα, ο Ευρωκώδικας προβλέπει, ότι στις περιπτώσεις χαλύβδινων συγκολλημένων αγωγών η μέγιστη επιτρεπόμενη εφελκυστική παραμόρφωση είναι 3%, ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση δίνεται από τον τύπο $\min\{1\%, 20\frac{t}{r} (\%)\}$, όπου t είναι το πάχος τοιχώματος και r είναι η ακτίνα του αγωγού. Στην προκειμένη περίπτωση, βάσει των διαστάσεων του αγωγού, η μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση είναι ίση με 0,8%.

Για την επίτευξη του ελέγχου, σε πρώτη φάση ήταν απαραίτητη η ένταξη καθεμιάς από τις δυνητικά ασταθείς περιοχές σε ένα ξεχωριστό επίπεδο πληροφορίας, στο λογισμικό ArcGIS. Για το σκοπό αυτό, ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Έγινε η παραδοχή ότι η γεωμετρία και οι ιδιότητες του εδάφους, πάνω στο οποίο εναπόκειται η προκαταρκτική διαδρομή, παραμένουν οι ίδιες σε απόσταση ενός χιλιομέτρου εκατέρωθεν αυτής. Στην ουσία, θεωρήθηκε ότι το πλάτος κάθε δυνητικά ασταθούς περιοχής είναι δύο χιλιόμετρα. Δεδομένου αυτού, δημιουργήθηκε ζώνη επιρροής, ακτίνας ενός

χιλιομέτρου, γύρω από την προκαταρκτική διαδρομή, με τη βοήθεια του εργαλείου Buffer.

- Προκειμένου να είναι σε μορφή αποδεκτή από τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, το επίπεδο πληροφορίας των κλίσεων του εδάφους έπρεπε να έχει ως τιμές ακέραιους αριθμούς. Για την επίτευξη αυτού, οι τιμές του επιπέδου αναταξινομήθηκαν με τη βοήθεια του εργαλείου Reclassify. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε κλάση κλίσεων αποδόθηκε ένας αριθμός από το 1 έως το 9, βάσει του αύξοντα αριθμού της.
- Η μορφή του αναταξινομημένου επιπέδου πληροφορίας των κλίσεων του εδάφους μετατράπηκε από ψηφιδωτή σε διανυσματική, μέσω του εργαλείου Raster to Polygon. Η μετατροπή αυτή έγινε με σκοπό το επίπεδο να διασπαστεί σε μικρές οντότητες, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο.
- Πραγματοποιήθηκε τομή του διανυσματικού επιπέδου πληροφορίας των κλίσεων και του επιπέδου πληροφορίας της ζώνης επιρροής της προκαταρκτικής διαδρομής, μέσω του εργαλείου Intersect. Από την τομή προέκυψε ένας διάδρομος πλάτους 2 χιλιομέτρων, ο οποίος είναι διαιρεμένος σε μικρά πολύγωνα, καθένα από τα οποία αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη τιμή κλίσης.
- Για καθεμία από τις δυνητικά ασταθείς περιοχές, από το επίπεδο πληροφορίας του διαδρόμου, που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα, επιλέχθηκε και απομονώθηκε το σύνολο των πολύγωνων που την συνθέτουν.

Έπειτα, για την εισαγωγή των μέγιστων παραμορφώσεων στο λογισμικό και την πραγματοποίηση της σύγκρισης αυτών με τα επιτρεπόμενα όρια που θέτει ο Ευρωκώδικας, ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

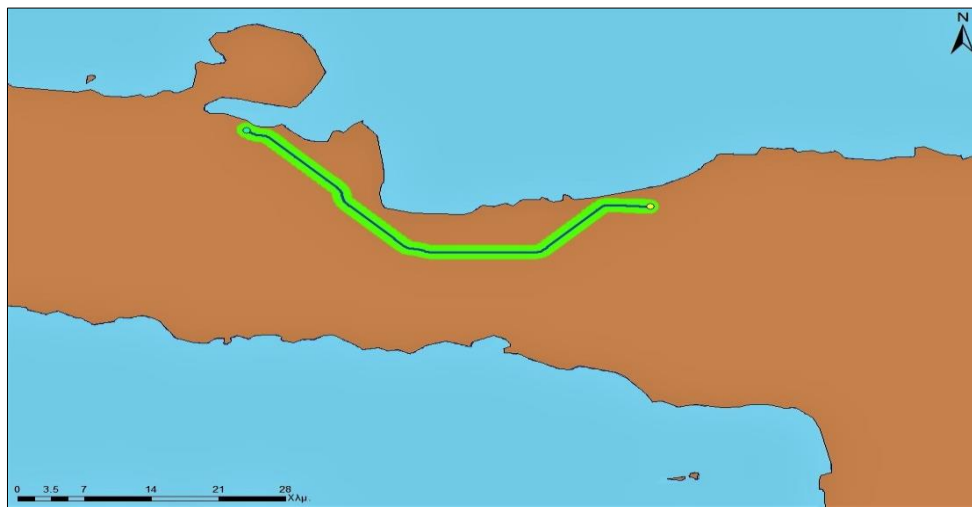
- Με τη βοήθεια του Editor Toolbar, στο επίπεδο πληροφορίας του διαδρόμου που προέκυψε από το εργαλείο Intersect, προστέθηκαν τα πεδία tensile_EE11 και compressive_EE11, που αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες τιμές εφελκυστικής και θλιπτικής παραμόρφωσης, αντίστοιχα.
- Σε κάθε οντότητα του διαδρόμου, ανάλογα με τη θέση της, εκχωρήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές μέγιστης εφελκυστικής και θλιπτικής παραμόρφωσης. Στις οντότητες που δεν εντάσσονται σε κάποια δυνητικά ασταθή περιοχή εκχωρήθηκε η τιμή μηδέν.

- Πραγματοποιήθηκε δυο φορές η διαδικασία μετατροπής της μορφής του επιπέδου πληροφορίας του διαδρόμου από διανυσματική σε ψηφιδωτή, μέσω του εργαλείου Polygon to Raster. Κατά την πρώτη μετατροπή διατηρήθηκαν οι τιμές του πεδίου tensile_EE11, ενώ κατά τη δεύτερη οι τιμές του compressive_EE11.
- Διατυπώθηκε η συνθήκη ελέγχου των παραμορφώσεων μέσω του εργαλείου Raster Calculator, και πιο συγκεκριμένα μέσω της συνάρτησης Con. Δεδομένα εισόδου του εργαλείου ήταν τα ψηφιδωτά επίπεδα πληροφορίας που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Ειδικότερα, το εργαλείο ρυθμίστηκε έτσι, ώστε να ελέγχει αν τόσο οι εφελκυστικές όσο και οι θλιπτικές τιμές παραμόρφωσης είναι μικρότερες ή ίσες με τα ποσοστά 3% και 0,8%, αντίστοιχα. Στην περίπτωση που η λογική συνθήκη επιβεβαιώνεται, το εργαλείο αποδίδει στα κελιά του εξαγόμενου επιπέδου πληροφορίας του διαδρόμου την τιμή 1 και πράσινο χρώμα. Σε αντίθετη περίπτωση, τα κελιά του εξαγόμενου επιπέδου πληροφορίας έχουν την τιμή 2 και κόκκινο χρώμα.

```
Output_Raster=Con(("tensile_EE11" <= 3%) & ("compressive_EE11" <= 0.8%),1,2)
```

Εικόνα 5.28: Διατύπωση συνθήκης ελέγχου στο εργαλείο Raster Calculator

Έπειτα από την εκτέλεση των παραπάνω ενεργειών, το εργαλείο επιβεβαίωσε ότι στην προκειμένη περίπτωση οι μέγιστες αξονικές παραμορφώσεις του αγωγού δεν ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια. Κατά συνέπεια, η προκαταρκτική διαδρομή μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής και δεν απαιτείται η πρόταση κάποιας εναλλακτικής διαδρομής προς χάραξη. Το επίπεδο πληροφορίας που προέκυψε παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.

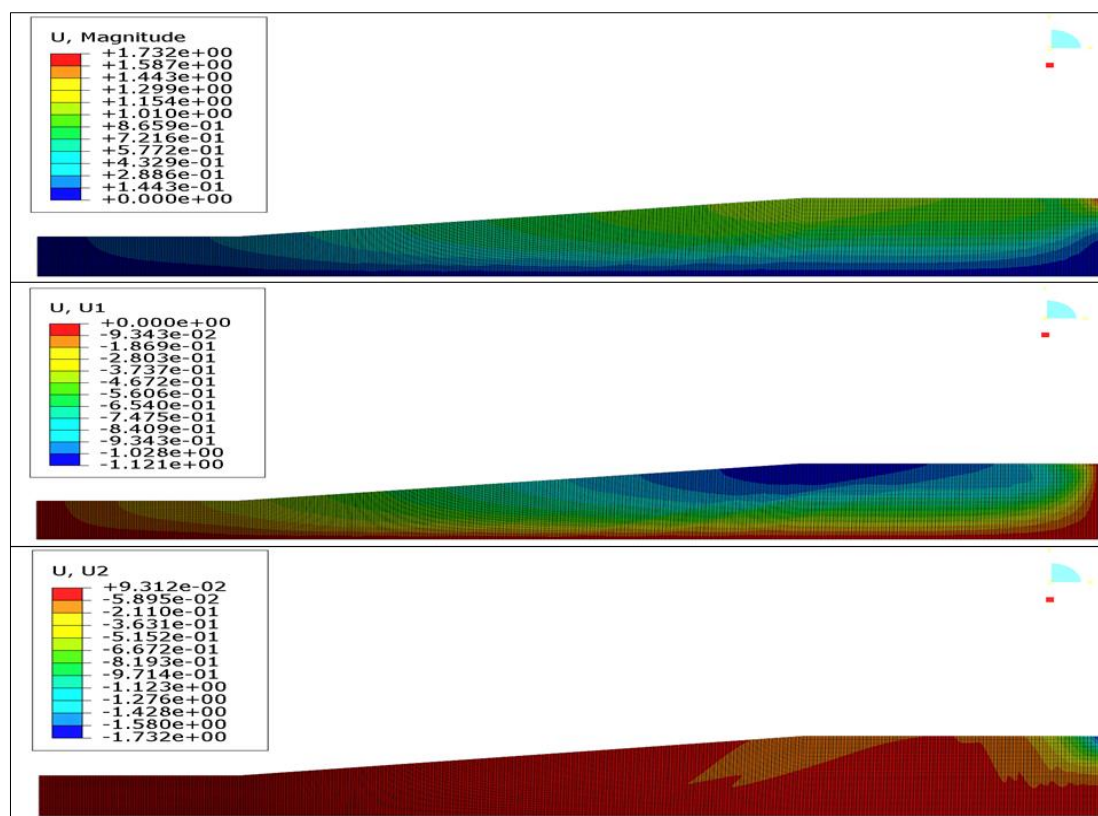


Εικόνα 5.29: Έγκριση της προκαταρκτικής διαδρομής

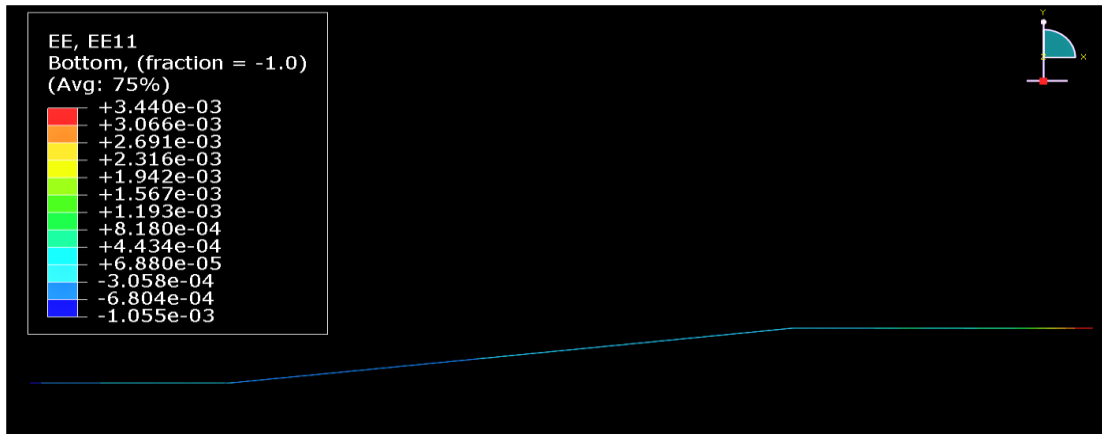
5.6 Έλεγχος των παραμορφώσεων σε περίπτωση αύξησης του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης

Έπειτα από τον έλεγχο της ακεραιότητας του αγωγού έναντι ενός σεισμικού φαινομένου επιτάχυνσης $0,12 \times g$, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί έλεγχος και για μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης. Πιο συγκεκριμένα, επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις της ευστάθειας της πρώτης και της δεύτερης δυνητικά ασταθούς περιοχής, με μόνη διαφορά ότι η τιμή του συντελεστή k ήταν ίση με $0,24$, δηλαδή ίση με την τιμή που ορίζει ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας. Ύστερα από τις αναλύσεις της ευστάθειας των πρηνών ακολούθησαν οι αναλύσεις αλληλεπίδρασης αυτών με τον αγωγό και η εξαγωγή των αξονικών παραμορφώσεων, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 5.4.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ευστάθειας του πρώτου πρηνούς, στο οποίο επιβάλλεται αρνητική ψευδοστατική δύναμη μέτρου $0,24 \times g$, καθώς και τα αποτελέσματα της διερεύνησης της αλληλεπίδρασης πρηνούς-αγωγού παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.

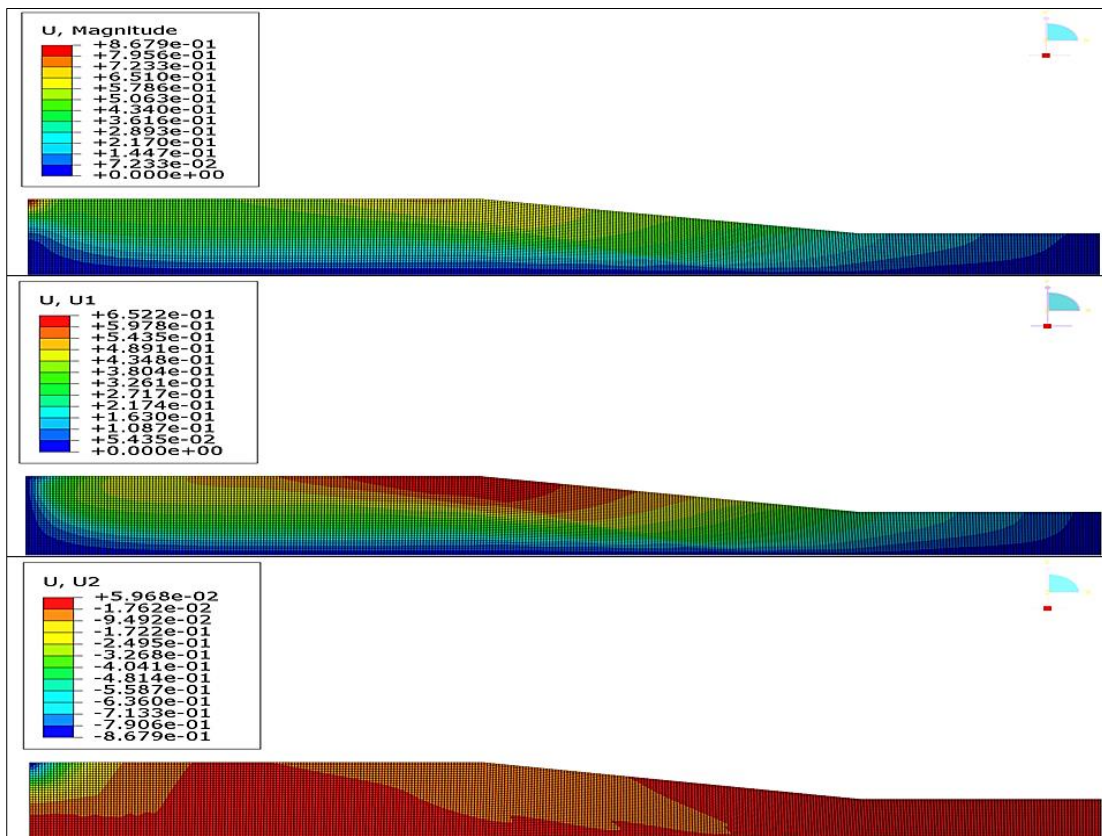


Εικόνα 5.30: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του πρώτου πρηνούς

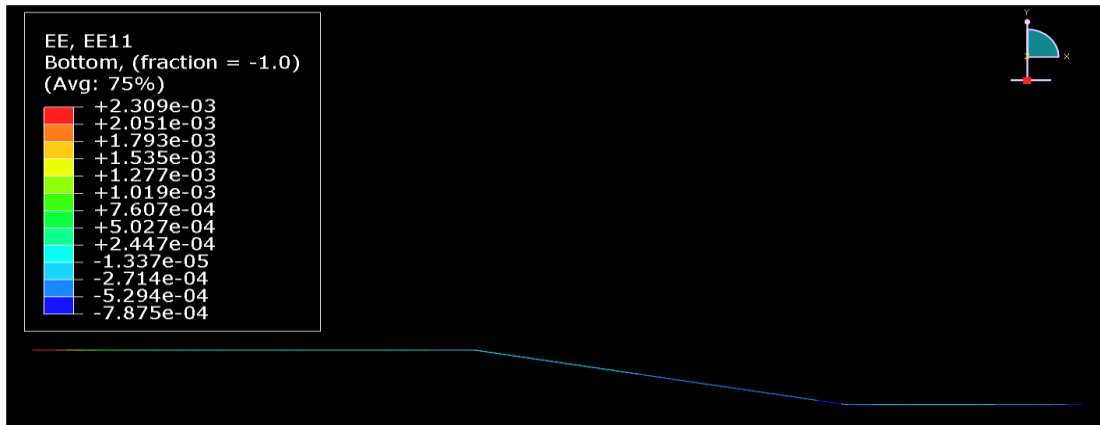


Εικόνα 5.31: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το πρώτο πρανές.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ευστάθειας του δεύτερου πρανούς, στο οποίο επιβάλλεται θετική ψευδοστατική δύναμη μέτρου $0,24 \times \gamma$, καθώς και τα αποτελέσματα της διερεύνησης της αλληλεπίδρασης πρανούς-αγωγού, αυτά παρουσιάζονται στις δύο εικόνες που ακολουθούν.

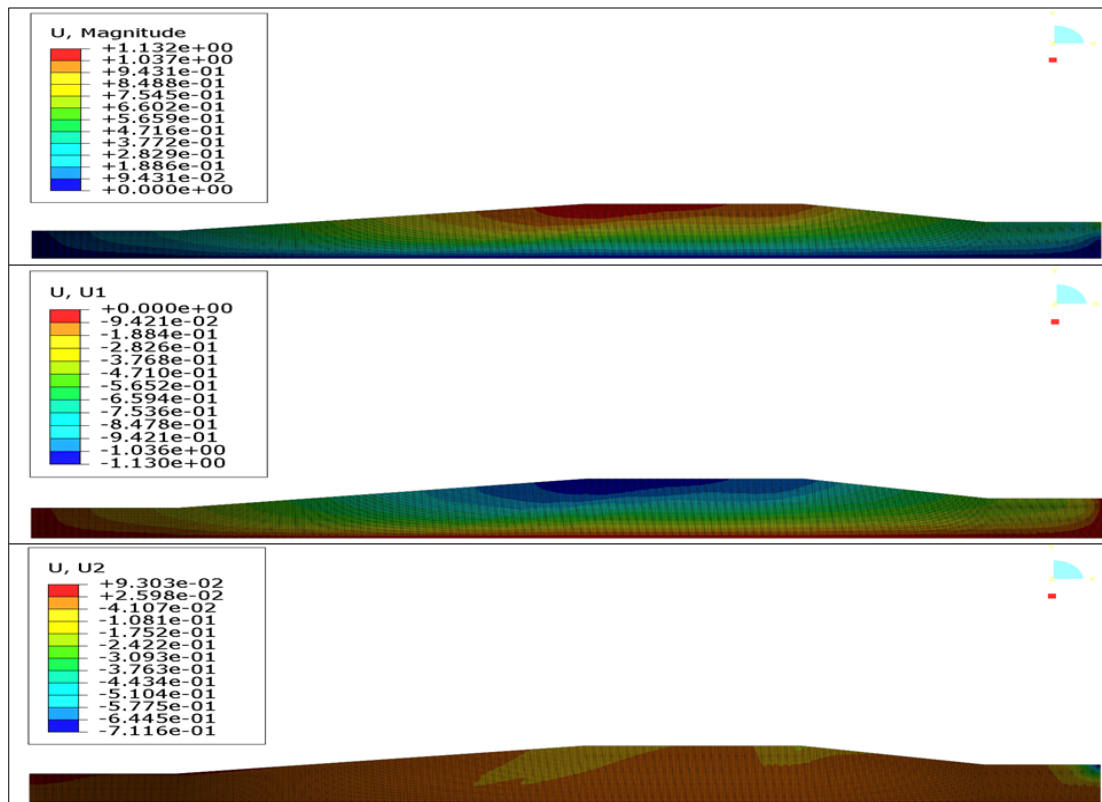


Εικόνα 5.32: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του δεύτερου πρανούς

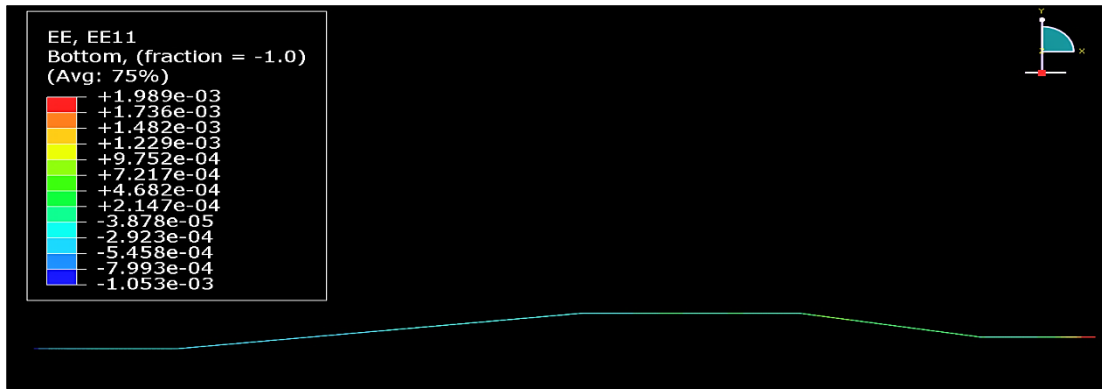


Εικόνα 5.33: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το δεύτερο πρανές.

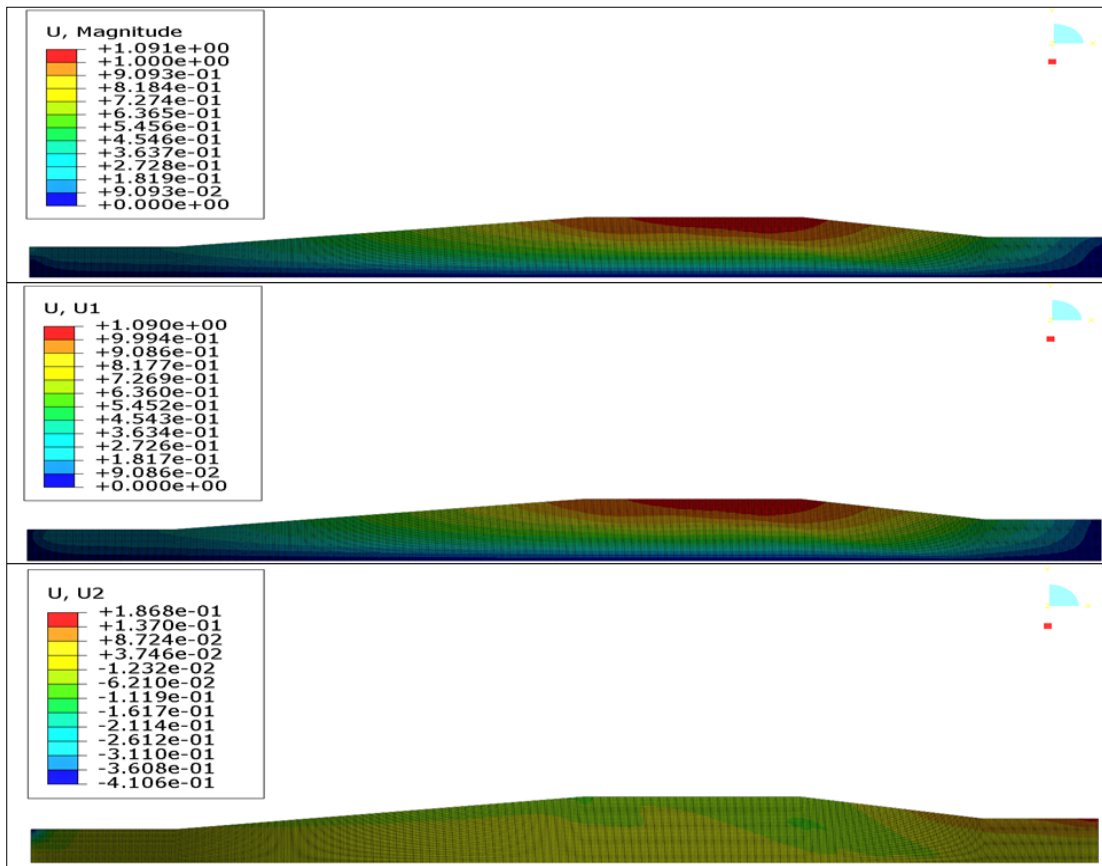
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ευστάθειας του πρώτου και του δεύτερου πρανούς ως ενιαία περιοχή, τόσο για αρνητική όσο και για θετική ψευδοστατική δύναμη, μέτρου $0,24 \times \gamma$, καθώς και τα αποτελέσματα της διερεύνησης της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού παρουσιάζονται στις τέσσερις εικόνες που ακολουθούν.



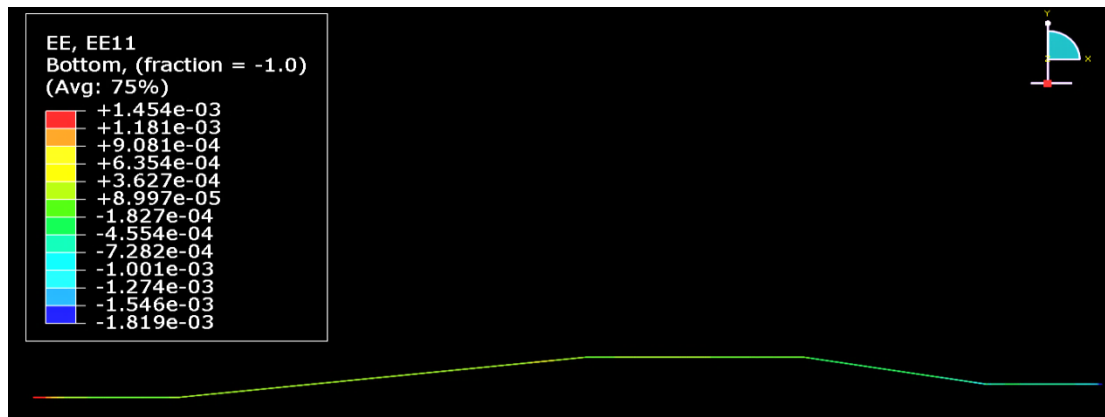
Εικόνα 5.34: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των μετατοπίσεων της πρώτης δυναμικά ασταθούς περιοχής, που προέκυψαν έπειτα από επιβολή αρνητικής ψευδοστατικής δύναμης.



Εικόνα 5.35: Απεικόνιση των προκαλούμενων από αρνητική ψευδοστατική δύναμη αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από την πρώτη δυναμικά ασταθή περιοχή.

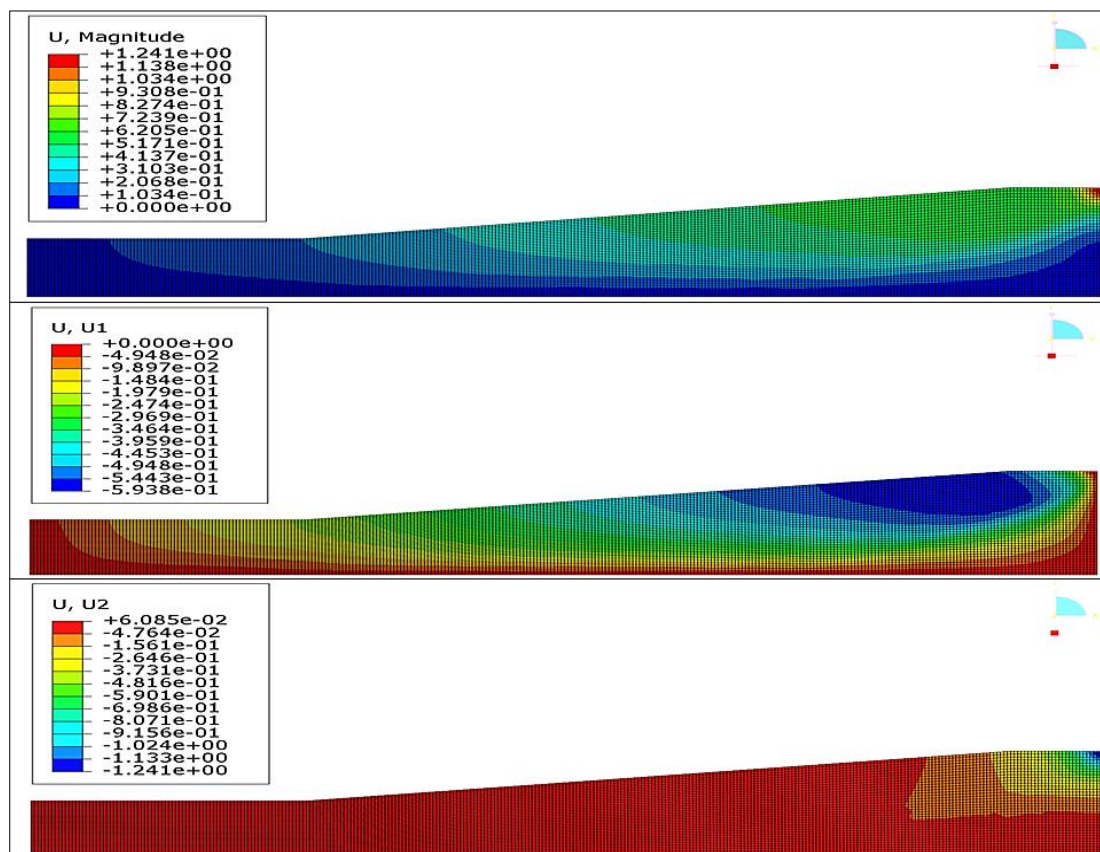


Εικόνα 5.36: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των μετατοπίσεων της πρώτης δυναμικά ασταθούς περιοχής, που προέκυψαν έπειτα από επιβολή θετικής ψευδοστατικής δύναμης.

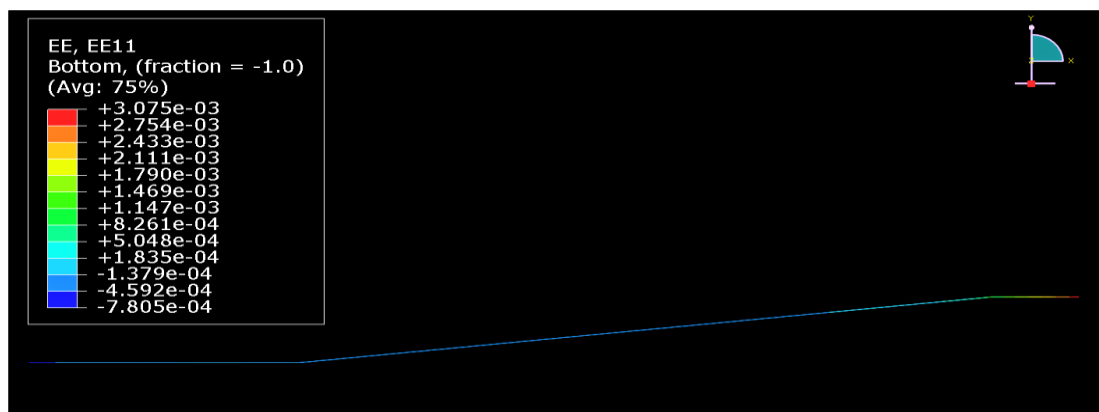


Εικόνα 5.37: Απεικόνιση των προκαλούμενων από θετική ψευδοστατική δύναμη αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από την πρώτη δυναμικά ασταθή περιοχή.

Τέλος, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ευστάθειας του τρίτου πρानούς, στο οποίο επιβάλλεται αρνητική ψευδοστατική δύναμη μέτρου $0,24 \times \gamma$, καθώς και τα αποτελέσματα της διερεύνησης της αλληλεπίδρασης πρानούς-αγωγού παρουσιάζονται στις δυο επόμενες εικόνες.



Εικόνα 5.38: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του τρίτου πρानούς



Εικόνα 5.39: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το τρίτο πραινές.

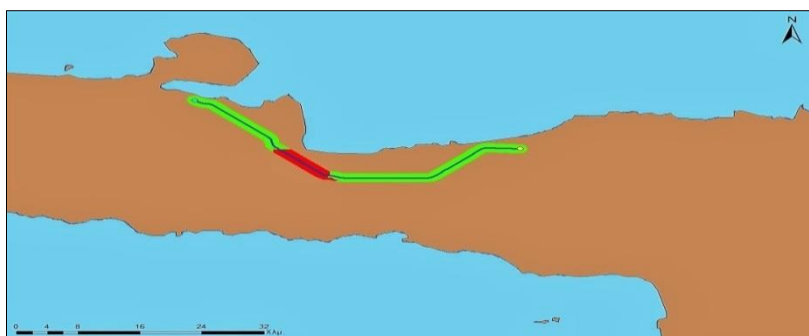
Έπειτα από τη μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων, διαμορφώθηκε το συμπέρασμα ότι σε όλες τις περιπτώσεις η συμπεριφορά πραινούς-αγωγού είναι αντιστοιχη με εκείνη που προέκυψε για τιμή του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης ίση με 0,12 (Ενότητα 5.4), με μόνη διαφορά την αύξηση των τιμών. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πραινών κατά τον άξονα των x , αυτές έχουν τιμή από μερικές μονάδες εκατοστών έως μερικές μονάδες μέτρων. Επιπλέον σε όλες τις περιπτώσεις, το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της x -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται μεταξύ του επάνω μέρους της κεκλιμένης πλευράς και της στέψης του πραινούς. Έπειτα, όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πραινών κατά τον άξονα των y , αυτές έχουν επίσης τιμές από μερικές μονάδες εκατοστών έως μερικές μονάδες μέτρων. Το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της y -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται κάθε φορά σε εκείνη την άκρη της τομής του πραινούς, που λόγω της επίδρασης της ψευδοστατικής δύναμης και των συνοριακών συνθηκών εφελκείται. Σε αυτό το σημείο της τομής παρατηρείται γενικά αρκετά μεγάλη αρνητική y -μετατόπιση (βύθιση) του εδάφους, η οποία από την μια μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω των συνοριακών συνθηκών, αλλά από την άλλη θεωρείται πλασματική. Για το λόγο αυτό, όπως και στην περίπτωση των αναλύσεων για $\alpha=0,12$, οι τιμές της y -συνιστώσας στα σημεία αυτά δεν λήφθηκαν υπόψη, αλλά διορθώθηκαν, έτσι ώστε να είναι περισσότερο ρεαλιστικές. Τέλος, όσον αφορά τις τιμές παραμόρφωσης του αγωγού, παρόλο που αυτές παρουσιάζουν σημαντική αύξηση, δηλαδή σχεδόν τριπλασιάστηκαν σε σχέση με τις αναλύσεις για $\alpha=0,12$, εξακολουθούν να είναι αρκετά μικρές και να μην ξεπερνούν τα όρια που θέτει ο Ευρωκώδικας 8. Οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές αξονικές παραμορφώσεις για την κάθε περίπτωση εντοπίζονται στα άκρα του εκάστοτε τμήματος του αγωγού. Οι τιμές των παραμορφώσεων αυτών παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.6: Μέγιστες, εφελκυστικές και θλιπτικές, αξονικές παραμορφώσεις που προκάλεσαν τα διάφορα πρανή στον αγωγό.

	1 ^ο πρανές	2 ^ο πρανές	1 ^ο και 2 ^ο πρανές		3 ^ο πρανές
			Αρνητική ψευδοστατική δύναμη	Θετική ψευδοστατική δύναμη	
Μέγιστη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση	0,34 %	0,23 %	0,20 %	0,15 %	0,31 %
Μέγιστη αξονική θλιπτική παραμόρφωση	0,11 %	0,08 %	0,10 %	0,18 %	0,08 %

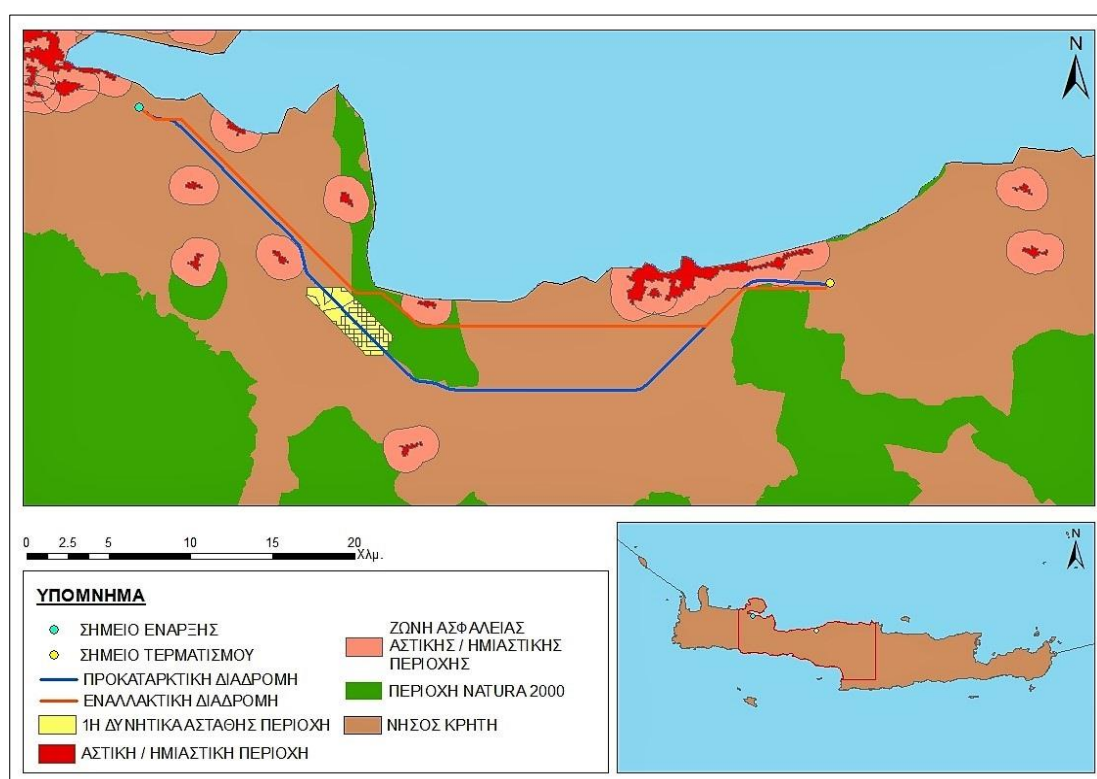
5.7 Επαναπροσδιορισμός της διαδρομής του αγωγού

Στην προηγούμενη ενότητα παρατηρήθηκε, ότι ο διπλασιασμός του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης είχε σαν συνέπεια σχεδόν τον τριπλασιασμό των παραμορφώσεων του αγωγού, γεγονός που συνεπάγεται, πως η εκδήλωση ενός ακόμα περισσότερο ισχυρού σεισμού ενδέχεται να προκαλέσει παραμορφώσεις, που να ξεπερνάνε τα επιτρεπόμενα όρια του Ευρωκώδικα. Στην περίπτωση εκδήλωσης κάποιου τέτοιου σεισμού ή στην περίπτωση εφαρμογής μικρότερων ορίων μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης (για παράδειγμα τιμή μέγιστης επιτρεπόμενης θλιπτικής παραμόρφωσης ίση με 0,05%), η προκαταρκτική διαδρομή δεν θα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής και κατά επέκταση θα είναι επιβεβλημένος ο επαναπροσδιορισμός της διαδρομής του αγωγού. Για το λόγο αυτό, παρόλο που στην προκειμένη περίπτωση δεν ήταν αναγκαίος ο επαναπροσδιορισμός της διαδρομής, το εργαλείο σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει και αυτή τη διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρία υποθετικά σενάρια, στα οποία εκτός από τις αστικές/ημιαστικές περιοχές και τις περιοχές Natura, αποφεύγονται και οι δυνητικά ασταθείς περιοχές.



Εικόνα 5.40: Απεικόνιση της υποθετικής απόρριψης της προκαταρκτικής διαδρομής από το εργαλείο Raster Calculator

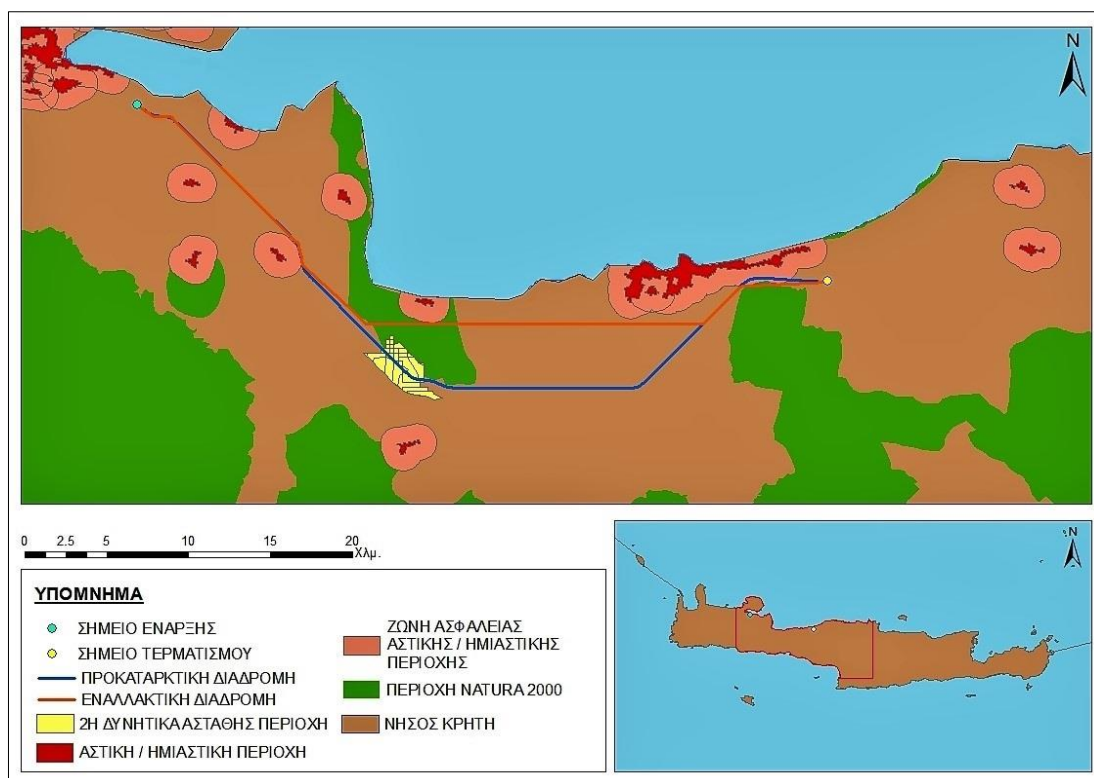
Στο πρώτο σενάριο, κριτήριο διαμόρφωσης της διαδρομής του αγωγού αποτέλεσε η αποφυγή των αστικών/ημιαστικών περιοχών, των περιοχών Natura και της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με εκείνη που περιγράφεται στην ενότητα 5.2, με τη μόνη διαφορά ότι το επίπεδο πληροφορίας της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής, αφού πρώτα απέκτησε κατάλληλη μορφή, αποτέλεσε και αυτό δεδομένο εισόδου του εργαλείου Raster Calculator. Σημειώνεται, ότι αποδόθηκε συντελεστής βάρους 30% στη δυνητικά ασταθή περιοχή, 30% στις αστικές/ημιαστικές περιοχές και 40% στις περιοχές Natura. Η διαδρομή που προέκυψε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.41, τέμνεται σε μεγάλο μέρος της με περιοχή Natura 2000. Ωστόσο, δεδομένου ότι το εργαλείο συνυπολογίζει και τον παράγοντα της απόστασης, η τομή αυτή ήταν αναπόφευκτη.



Εικόνα 5.41: Χάρτης απεικόνισης της εναλλακτικής διαδρομής που αποφεύγει αστικές/ημιαστικές περιοχές, περιοχές Natura και την πρώτη δυνητικά ασταθή περιοχή.

Στο δεύτερο σενάριο, κριτήριο διαμόρφωσης της διαδρομής του αγωγού αποτέλεσε η αποφυγή των αστικών/ημιαστικών περιοχών, των περιοχών Natura και της δεύτερης δυνητικά ασταθούς περιοχής (τρίτο πραινές). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με εκείνη που περιγράφεται στην ενότητα 5.2, με τη μόνη διαφορά ότι το επίπεδο πληροφορίας της δεύτερης δυνητικά ασταθούς περιοχής, αφού πρώτα απέκτησε την κατάλληλη μορφή, αποτέλεσε και αυτό δεδομένο εισόδου του εργαλείου Raster Calculator.

Σημειώνεται, ότι αποδόθηκε συντελεστής βάρους 20% στη δυνητικά ασταθή περιοχή, 30% στις αστικές/ημιαστικές περιοχές και 50% στις περιοχές Natura. Η διαδρομή που προέκυψε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.42, τέμνεται και αυτή με περιοχή Natura 2000, αλλά σε μικρότερο μέρος της σε σχέση με τη διαδρομή αποφυγής της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι στην προκειμένη περίπτωση έχει αποδοθεί μεγαλύτερος συντελεστής βαρύτητας στο επίπεδο πληροφορίας των περιοχών Natura 2000.

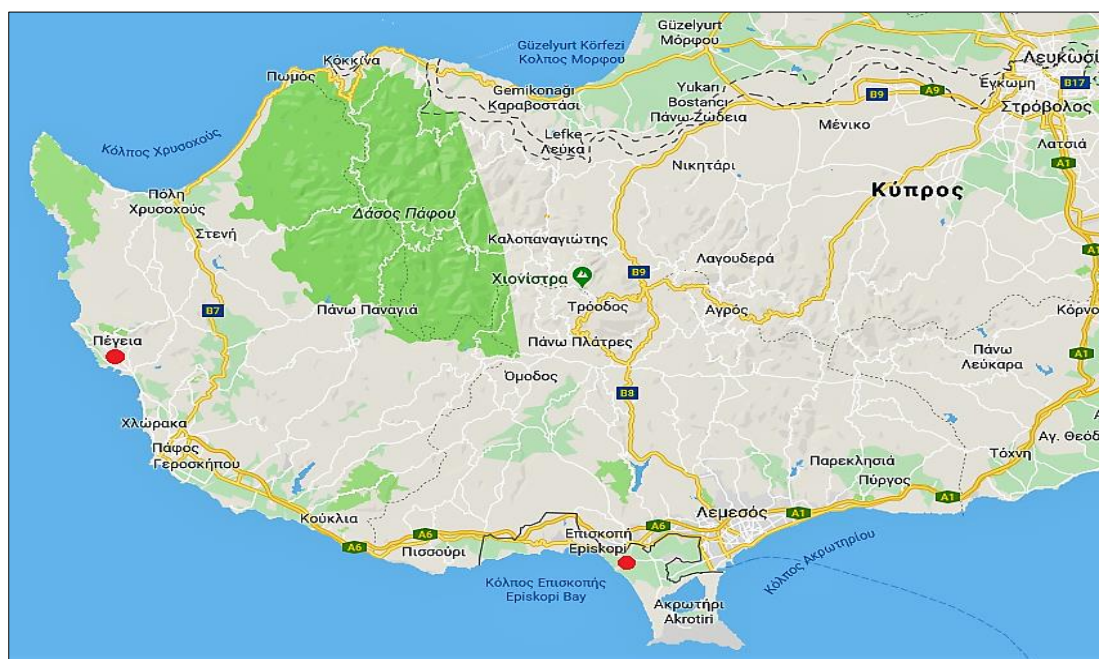


Εικόνα 5.42: Χάρτης απεικόνισης της εναλλακτικής διαδρομής που αποφεύγει αστικές/ημιαστικές περιοχές, περιοχές Natura και τη δεύτερη δυνητικά ασταθή περιοχή.

Τέλος, στο τρίτο σενάριο, κριτήριο διαμόρφωσης της διαδρομής του αγωγού αποτέλεσε η αποφυγή των αστικών/ημιαστικών περιοχών, των περιοχών Natura, καθώς και των δύο δυνητικά ασταθών περιοχών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με εκείνη που περιγράφεται στην ενότητα 5.2, με τη μόνη διαφορά ότι τα επίπεδα πληροφορίας της πρώτης και της δεύτερης δυνητικά ασταθούς περιοχής, αφού πρώτα απέκτησαν την κατάλληλη μορφή, αποτέλεσαν και αυτά δεδομένα εισόδου του εργαλείου Raster Calculator. Σημειώνεται, ότι αποδόθηκε συντελεστής βάρους 20% στις δυνητικά ασταθείς περιοχές, 40% στις αστικές/ημιαστικές περιοχές και 40% στις περιοχές Natura. Η διαδρομή που προέκυψε είναι ίδια με την εναλλακτική διαδρομή αποφυγής της πρώτης δυνητικά ασταθούς περιοχής (Εικόνα 5.41).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2^Η : ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Στη δεύτερη εφαρμογή μελετάται το σενάριο διασύνδεσης δύο περιοχών της Κύπρου, του δήμου Πέγειας της επαρχίας της Πάφου και του δήμου Επισκοπής της επαρχίας της Λεμεσού, μέσω ενός χερσαίου αγωγού μεγάλου μήκους. Πιο συγκεκριμένα, διαμορφώνονται και εξετάζονται ως προς την ασφάλεια τους, έναντι του γεωκινδύνου των σεισμικά προκαλούμενων μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων των πρανών, δύο προκαταρκτικές διαδρομές του αγωγού, κατά τρόπο αντίστοιχο με εκείνον που ακολουθήθηκε και στην πρώτη εφαρμογή. Η διαφορά έγκειται στο ότι στην προκειμένη περίπτωση ως δυνητικά επικίνδυνα, και κατ' επέκταση ως εκείνα των οποίων η επίδραση στον αγωγό χρήζει μελέτης, θεωρήθηκαν τα πρανή, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ασταθή υπό σεισμικές συνθήκες, βάσει της μεθόδου της οριακής ισορροπίας.

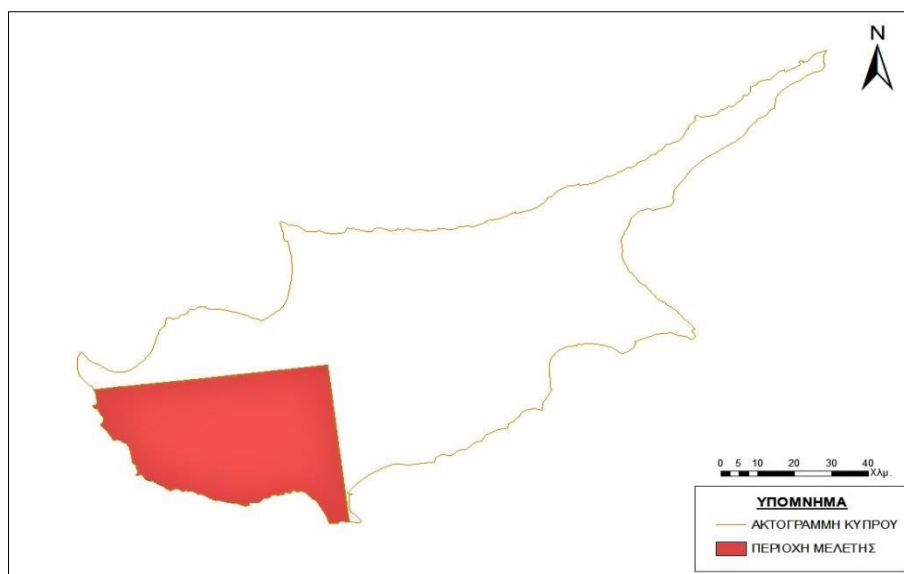


Εικόνα 6.1: Θέση των δήμων Πέγειας και Επισκοπής που αποτελούν τα σημεία έναρξης και τερματισμού του αγωγού. (Πηγή: Google Maps)

6.1 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό ArcGIS

Η πρώτη ενέργεια που πραγματοποιήθηκε, ήταν η διαμόρφωση του επιπέδου πληροφορίας που θα αναπαριστά την περιοχή μελέτης και θα αποτελεί το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα αναπτυχθούν όλα τα υπόλοιπα δεδομένα. Για την επίτευξη αυτού, το επίπεδο πληροφορίας των διοικητικών ορίων των χωρών, που συλλέχθηκε από την ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας, επεξεργάστηκε κατά αντίστοιχο τρόπο με αυτόν που περιγράφεται

στην ενότητα 5.1 της πρώτης εφαρμογής. Το αποτέλεσμα που προέκυψε παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.



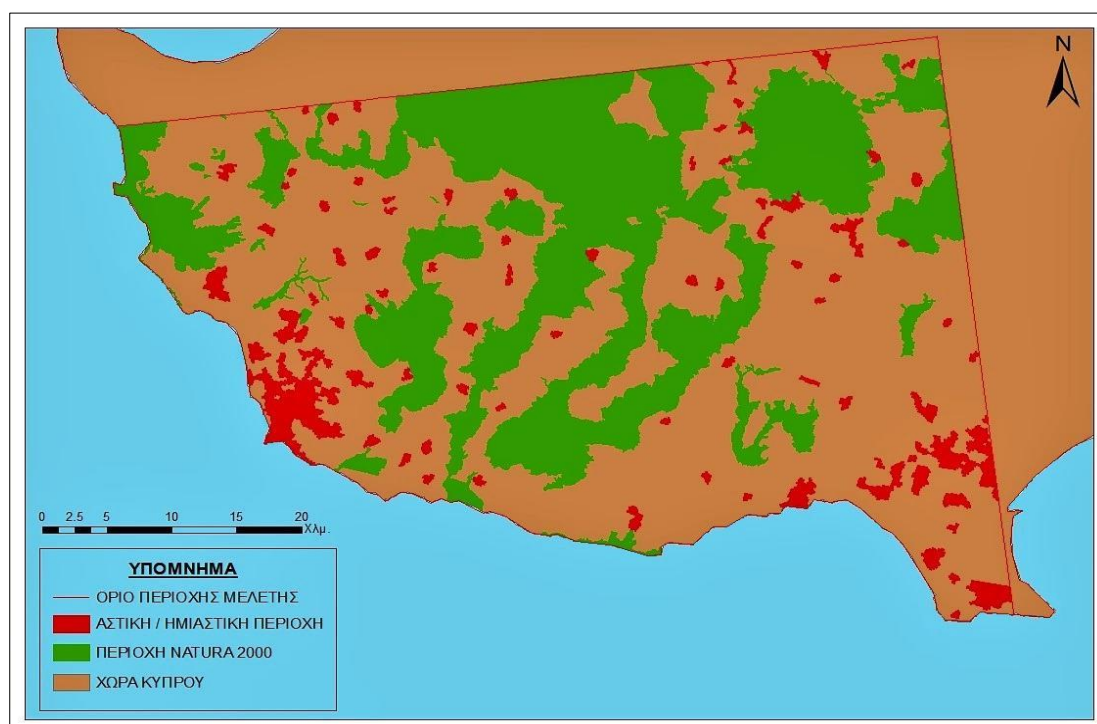
Εικόνα 6.2: Χάρτης απεικόνισης της περιοχής μελέτης

Ύστερα από τον καθορισμό των γεωγραφικών ορίων της περιοχής μελέτης, ακολούθησε η αναζήτηση των επιπέδων πληροφορίας, τα οποία αναπαριστούν περιοχές, οι οποίες επιβάλλεται να αποφευχθούν κατά τη διαμόρφωση της διαδρομής του αγωγού. Όπως και στην περίπτωση της Κρήτης, λόγω έλλειψης ελεύθερων δεδομένων καλής ποιότητας στο διαδίκτυο, από τις περιοχές που επιβάλλεται να αποφευχθούν, εντοπίστηκαν μόνο οι αστικές και ημιαστικές, δηλαδή οι περιοχές με πληθυσμό μεγαλύτερο από 2.000 κατοίκους, καθώς και το οικολογικό δίκτυο Natura 2000. Τα εν λόγω δεδομένα αντλήθηκαν, υπό τη μορφή επιπέδων πληροφορίας, από την ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency-EEA).

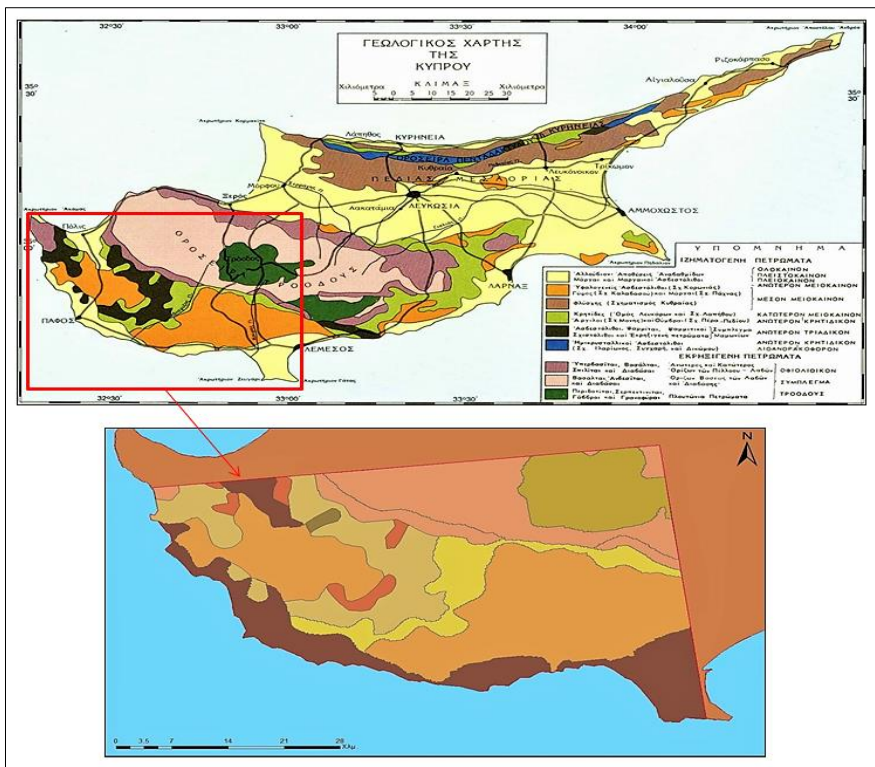
Έπειτα για τον προσδιορισμό των ασταθών περιοχών (οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν δυνητικά επικίνδυνες για τον αγωγό) με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, ήταν απαραίτητη η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής μελέτης. Για το λόγο αυτό, αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα του Υπουργείου Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος της Κύπρου (www.moa.gov.cy) δύο χάρτες, ο γεωλογικός χάρτης της Κύπρου και ο χάρτης σεισμικών ζωνών της Κύπρου. Από τους εν λόγω χάρτες, μέσω των διαδικασιών της γεωαναφοράς και της ψηφιοποίησης, προέκυψαν τα επίπεδα πληροφορίας των γεωλογικών κατηγοριών και των ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης (Εικόνες 6.4 και 6.5). Στη συνέχεια, ο πίνακας ιδιοτήτων (attribute table) καθενός από τα επίπεδα που

δημιουργήθηκαν, συμπληρώθηκε με τα απαραίτητα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα ιδιοτήτων του επιπέδου πληροφoρίας των γεωλογικών κατηγοριών της περιοχής μελέτης εκχωρήθηκαν τα χαρακτηριστικά (συνοχή, ειδικό βάρος και γωνία εσωτερικής τριβής) της εκάστοτε κατηγορίας. Τα δεδομένα αυτά υποδείχτηκαν από τον κ. Φαρρόπουλο. Επιπλέον, όσον αφορά τον πίνακα ιδιοτήτων του επιπέδου πληροφoρίας των σεισμικών ζωνών της περιοχής μελέτης, αυτός συμπληρώθηκε βάσει των στοιχείων που αναγράφονται στο υπόμνημα του αντίστοιχου χάρτη.

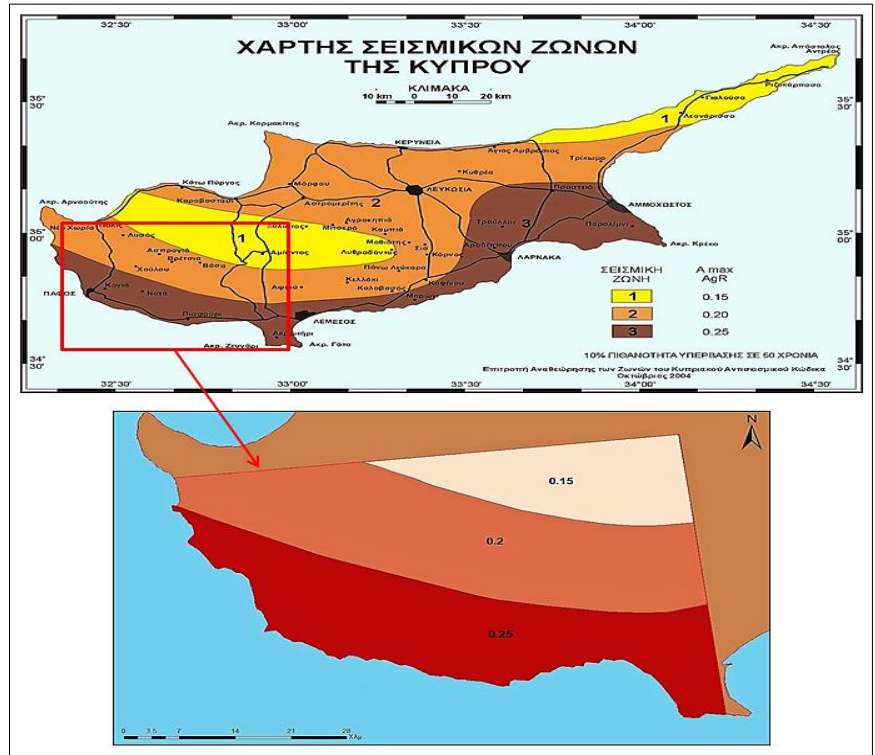
Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι υπό ιδανικές συνθήκες, η διαδικασία προσδιορισμού των δυνητικά επικίνδυνων περιοχών με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, απαιτεί και πληροφορίες σχετικά με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής μελέτης και πιο συγκεκριμένα την πίεση του νερού των πόρων (r_u). Ωστόσο, λόγω του ότι η πρόσβαση σε τέτοιου είδους δεδομένα στο διαδίκτυο δεν είναι ελεύθερη, έγινε η παραδοχή ότι η πίεση του νερού των πόρων είναι ίση με το μηδέν.



Εικόνα 6.3: Χάρτης απεικόνισης αστικών/ημιαστικών περιοχών και περιοχών Natura 2000 στην περιοχή μελέτης

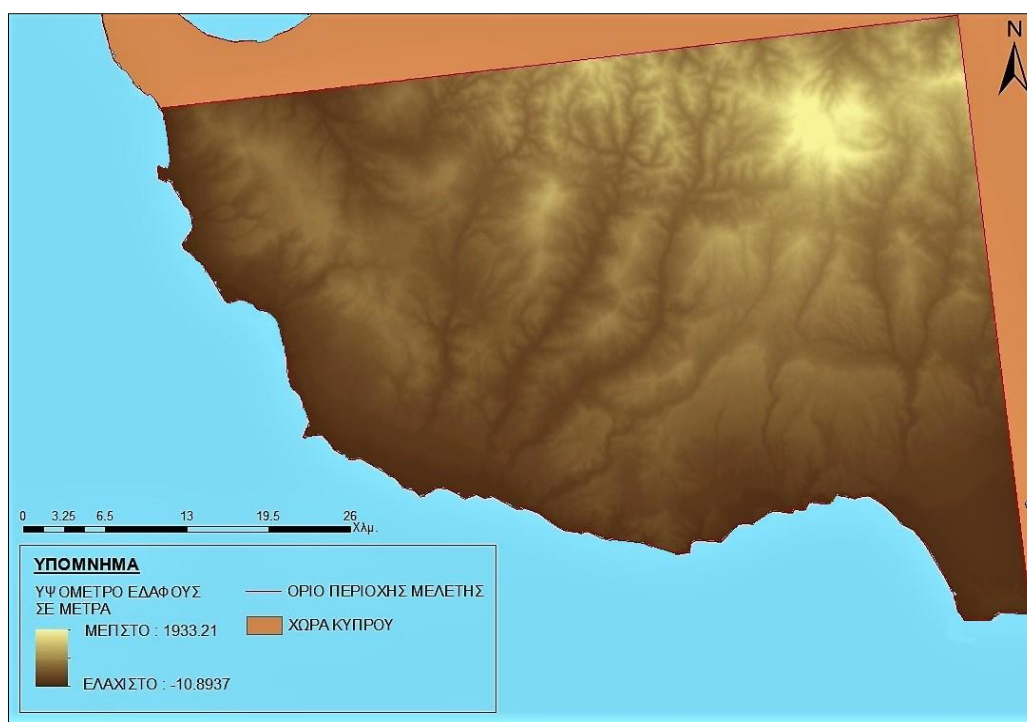


Εικόνα 6.4: Χάρτης και το παραγόμενο από αυτόν επίπεδο πληροφορίας των γεωλογικών κατηγοριών της περιοχής μελέτης



Εικόνα 6.5: Χάρτης και το παραγόμενο από αυτόν επίπεδο πληροφορίας των σεισμικών ζωνών της περιοχής μελέτης

Τέλος, απολύτως απαραίτητη για την εκπόνηση της εφαρμογής ήταν και η δημιουργία ενός επιπέδου πληροφορίας που θα απεικονίζει το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Για το λόγο αυτό, παράχθηκε ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM). Για την παραγωγή του ΨΜΕ, συλλέχθηκε από την ιστοσελίδα «www.opendem.info» ένα επίπεδο πληροφορίας ισοϋψών καμπυλών, ισοδιάστασης 25 μέτρων. Έπειτα, το επίπεδο πληροφορίας των ισοϋψών, καθώς και εκείνο που απεικονίζει την περιοχή μελέτης ως πολυγωνική οντότητα (Εικόνα 6.2), αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου του εργαλείου Topo to Raster. Με τη βοήθεια του εργαλείου αυτού, προέκυψε μια πρώτη μορφή του ΨΜΕ της περιοχής μελέτης, με διαστάσεις κελιού 50×50 μέτρα. Τέλος, με τη βοήθεια του εργαλείου Fill το ΨΜΕ, που προέκυψε από το εργαλείο Topo to Raster, διορθώθηκε ως προς ενδεχόμενες μη ρεαλιστικές βυθίσεις και έλαβε την τελική του μορφή. Κατά αυτό τον τρόπο, κάθε σημείο της περιοχής μελέτης απέκτησε υψομετρική πληροφορία.



Εικόνα 6.6: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι καθώς η συλλογή των δεδομένων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, έγινε από διαφορετικές διαδικτυακές πηγές, καθένα από αυτά ήταν ενταγμένο και σε ένα διαφορετικό σύστημα αναφοράς. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια του εργαλείου Project, το οποίο ανήγαγε όλα τα δεδομένα σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, και πιο συγκεκριμένα στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς WGS'84 UTM, της ζώνης 34N. Για κάθε δεδομένο που προστέθηκε στο λογισμικό, η διαδικασία της αναγωγής προηγήθηκε όλων των υπόλοιπων επεξεργασιών. Κατά συνέπεια, όλα τα δεδομένα εξόδου που προέκυψαν στη συνέχεια από τη χρήση των

διαφόρων εργαλείων ήταν αυτόματα ενταγμένα στο ίδιο σύστημα αναφοράς (WGS'84 UTM Zone 34N).

6.2 Διαδικασία καθορισμού δυνητικά επικίνδυνων πρηνών

Στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής, ως δυνητικά επικίνδυνα, και κατ' επέκταση ως εκείνα των οποίων η επίδραση στον αγωγό χρήζει μελέτης, θεωρήθηκαν τα πρηνή, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ασταθή υπό σεισμικές συνθήκες, βάσει της μεθόδου της οριακής ισορροπίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ισορροπία ενός πρηνούς υπό σεισμικές συνθήκες συνδέεται με το μέγεθος της κρίσιμης επιτάχυνσης (k_{cr}), δηλαδή της τιμής της επιτάχυνσης που φέρει το πρηνές σε κατάσταση οριακής ισορροπίας, κατά την εκδήλωση ενός σεισμού (Χαραλάμπους & Σακελλαρίου, 2005). Δεδομένου του μεγέθους αυτού, ένα πρηνές μπορεί να χαρακτηριστεί ασταθές, όταν η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης που το χαρακτηρίζει είναι μικρότερη ή ίση με τον συντελεστή επιτάχυνσης που ορίζει ο χάρτης σεισμικών ζωνών για την περιοχή στην οποία ανήκει.

Για τον υπολογισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης και τον εντοπισμό των ασταθών και δυνητικά επικίνδυνων για τον αγωγό περιοχών, στο λογισμικό ArcGIS, ακολουθήθηκαν οι εξής ενέργειες:

- Με τη βοήθεια του εργαλείου Slope, το οποίο χρησιμοποίησε ως δεδομένο εισόδου το ΨΜΕ, δημιουργήθηκε το επίπεδο πληροφορίας που απεικονίζει τις γωνίες κλίσης του εδάφους της περιοχής μελέτης, μετρημένες σε μοίρες και κατηγοριοποιημένες σε εννέα κλάσεις.
- Οι τιμές των κλάσεων του επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης του εδάφους αναταξινομήθηκαν, με τη βοήθεια του εργαλείου Reclassify, έτσι ώστε καθεμία να αντιστοιχίζεται σε έναν ακέραιο αριθμό. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε κλάση γωνιών αποδόθηκε ένας αριθμός από το 1 έως το 9, βάσει του αύξοντα αριθμού της. Η μετατροπή αυτή έγινε προκειμένου το επίπεδο πληροφορίας να είναι σε μορφή αποδεκτή από τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.
- Η μορφή του αναταξινομημένου επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης μετατράπηκε από ψηφιδωτή σε διανυσματική, έτσι ώστε αυτό να διασπαστεί σε μικρές οντότητες, καθεμία από τις οποίες θα αντιστοιχίζεται σε έναν αριθμό από το 1 έως το 9, ο οποίος αντιπροσωπεύει την κλάση γωνιών κλίσης που την χαρακτηρίζει. Επιπλέον, απότοκο της μετατροπής αυτής ήταν και η σύνδεση του παραγόμενου διανυσματικού επιπέδου πληροφορίας με έναν πίνακα ιδιοτήτων (attribute table), στον οποίο στη

συνέχεια θα καταγραφούν πληροφορίες σχετικά με τις διάφορες οντότητες. Η μετατροπή έγινε μέσω του εργαλείου Raster to Polygon.

- Στον πίνακα ιδιοτήτων του διανυσματικού επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης του εδάφους προστέθηκε το πεδίο «Μέση Γωνία Κλίσης», με τη βοήθεια του εργαλείου Add Field.
- Το πεδίο «Μέση Γωνία Κλίσης» συμπληρώθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου Calculate Field. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε οντότητα εντοπίστηκε η κλάση γωνιών κλίσης που τη χαρακτηρίζει, βάσει του ακέραιου αριθμού με τον οποίο ήταν αντιστοιχισμένη. Έπειτα, υπολογίστηκε το ημίθροισμα των ακραίων τιμών της κλάσης που εντοπίστηκε, το οποίο και εκχωρήθηκε στη γραμμή του πεδίου «Μέση Γωνία Κλίσης», που αντιπροσωπεύει την εκάστοτε οντότητα. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία, γράφτηκαν λίγες γραμμές προγραμματιστικού κώδικα Visual Basic (VB), στον οποίο η μέση γωνία κλίσης αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή «n». Ο εν λόγω κώδικας παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.

```
Dim n
if [gridcode] =1 then
n=1.5650

elseif [gridcode] =2 then
n=4.7732

elseif [gridcode] =3 then
n=7.9815

elseif [gridcode] =4 then
n=11.0332

elseif [gridcode] =5 then
n=14.0850

elseif [gridcode] =6 then
n=17.2932

elseif [gridcode] =7 then
n=20.8144

elseif [gridcode] =8 then
n=24.8834

elseif [gridcode] =9 then
n=33.4910
end if
```

Εικόνα 6.7: Κώδικας συμπλήρωσης του πεδίου «Μέση Γωνία Κλίσης»

- Στον πίνακα ιδιοτήτων του διανυσματικού επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης του εδάφους προστέθηκε το πεδίο «Μέσο Ύψος», με τη βοήθεια του εργαλείου Add Field.

- Το πεδίο «Μέσο Ύψος» συμπληρώθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου Calculate Field. Ουσιαστικά, για κάθε οντότητα του διανυσματικού επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης του εδάφους υπολογίστηκε το μέσο ύψος, βάσει της εξίσωσης $H = \tan(n \times \frac{\pi}{180}) \times M$. Στην εξίσωση αυτή, n είναι η μέση γωνία κλίσης σε μοίρες, που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα, και M είναι το μήκος της εκάστοτε οντότητας, το οποίο υπολογίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα κατά τη διαδικασία μετατροπής του επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης από ψηφιδωτή σε διανυσματική μορφή.
- Πραγματοποιήθηκε τομή μεταξύ του επιπέδου πληροφορίας που απεικονίζει τις γεωλογικές κατηγορίες της περιοχής μελέτης και του ενημερωμένου διανυσματικού επιπέδου πληροφορίας των γωνιών κλίσης του εδάφους, με τη βοήθεια του εργαλείου Intersect. Από την τομή αυτή, δημιουργήθηκε ένα διανυσματικό επίπεδο πληροφορίας, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο οντοτήτων, καθεμία από τις οποίες αναπαριστά ένα τμήμα της περιοχής μελέτης με σταθερή τιμή συνοχής, ειδικού βάρους, γωνίας εσωτερικής τριβής, μέσης γωνίας κλίσης και μέσου ύψους.
- Στον πίνακα ιδιοτήτων του επιπέδου πληροφορίας που προέκυψε από το εργαλείο Intersect προστέθηκε το πεδίο «Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας», με τη βοήθεια του εργαλείου Add Field.
- Το πεδίο «Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας» συμπληρώθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου Calculate Field. Ειδικότερα, για κάθε οντότητα του επιπέδου πληροφορίας που προέκυψε από το εργαλείο Intersect υπολογίστηκε ο στατικός συντελεστής ασφαλείας, βάσει της εξίσωσης (Σακελλαρίου, 2008):

$$F.S. = 4,32 \left(\frac{c \cos\left(ecn \frac{\pi}{180}\right)}{\gamma H} \right) + 1,22(1 - r_u) \cot\left(n \frac{\pi}{180}\right) \tan\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right) + 0,005 \quad (6.1)$$

Όπου: c = συνοχή εδαφικού υλικού

n = μέση γωνία κλίσης σε μοίρες

γ = ειδικό βάρος εδαφικού υλικού

H = μέσο ύψος

φ = γωνία εσωτερικής τριβής εδαφικού υλικού σε μοίρες

r_u = πίεση νερού πόρων, η οποία στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής θεωρήθηκε ίση με 0.

- Στον πίνακα ιδιοτήτων του ενημερωμένου με τον στατικό συντελεστή ασφαλείας επιπέδου πληροφορίας προστέθηκε το πεδίο «Κρίσιμη Επιτάχυνση», με τη βοήθεια του εργαλείου Add Field.
- Το πεδίο «Κρίσιμη Επιτάχυνση» συμπληρώθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου Calculate Field. Ειδικότερα, για κάθε οντότητα του επιπέδου πληροφορίας, με στατικό συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο ή ίσο με τη μονάδα, υπολογίστηκε η κρίσιμη επιτάχυνση, βάσει της εξίσωσης (Σακελλαρίου, 2008):

$$k_{cr} = \frac{F.S. - 1}{1,18 + \frac{0,66}{\tan(n \times \frac{\pi}{180})}} \quad (6.2)$$

Όπου: $F.S.$ = ο στατικός συντελεστής ασφαλείας
 n = μέση γωνία κλίσης σε μοίρες

Από την άλλη, στις οντότητες με στατικό συντελεστή ασφαλείας μικρότερο της μονάδας, η κρίσιμη επιτάχυνση τέθηκε ίση με το μηδέν.

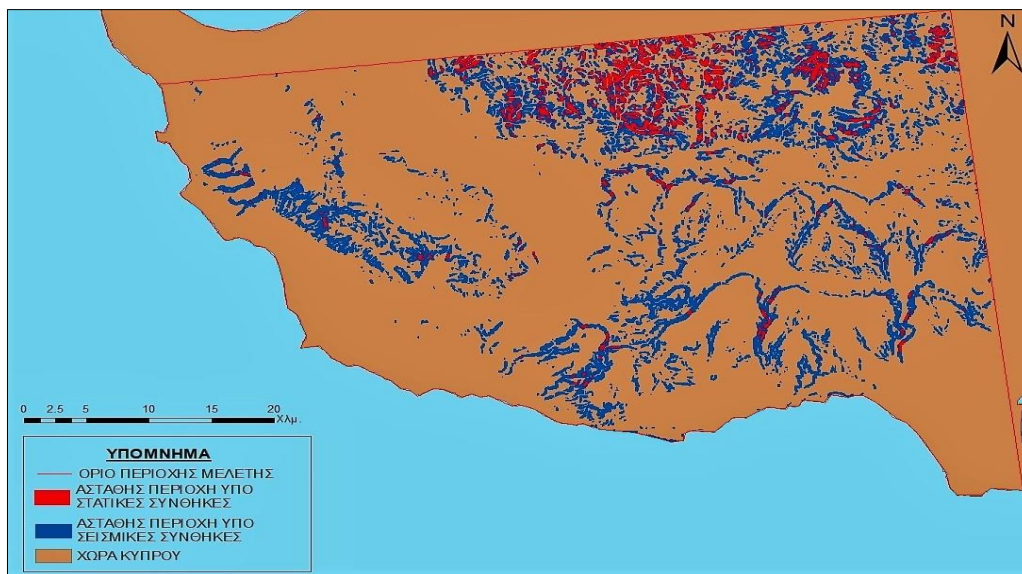
- Πραγματοποιήθηκε τομή μεταξύ του ενημερωμένου με τις τιμές της κρίσιμης επιτάχυνσης επιπέδου πληροφορίας και του επιπέδου πληροφορίας των σεισμικών ζωνών της περιοχής μελέτης, μέσω του εργαλείου Intersect. Από την τομή αυτή, δημιουργήθηκε ένα διανυσματικό επίπεδο πληροφορίας, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο οντοτήτων, καθεμία από τις οποίες συνδέεται με τις αντίστοιχες τιμές της συνοχής, του ειδικού βάρους, της γωνίας εσωτερικής τριβής, της μέσης γωνίας κλίσης, του μέσου ύψους, του στατικού συντελεστή ασφαλείας, της κρίσιμης επιτάχυνσης και του συντελεστή επιτάχυνσης της σεισμικής ζώνης στην οποία ανήκει, στον πίνακα ιδιοτήτων.
- Αποσπάστηκαν και αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστό επίπεδο πληροφορίας, τόσο οι σεισμικά όσο και οι στατικά ασταθείς περιοχές (Εικόνα 6.9). Αρχικά όσον αφορά τις σεισμικά ασταθείς περιοχές, στο επίπεδο πληροφορίας που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα εφαρμόστηκε το εργαλείο Select, με τη λογική συνθήκη «Κρίσιμη Επιτάχυνση \leq Συντελεστής Επιτάχυνσης Σεισμικής Ζώνης». Επιπλέον, η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για τη δημιουργία του επιπέδου πληροφορίας των στατικά ασταθών περιοχών, με μόνη διαφορά ότι η λογική συνθήκη ήταν «Στατικός Συντελεστής Ασφαλείας $\leq 1,4$ ».

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι προκειμένου το σύνολο των παραπάνω ενεργειών να μπορεί να εκτελείται αυτόματα και οποιαδήποτε στιγμή, αυτό

καταγράφηκε σε ένα μοντέλο γεωπεξεργασίας, με τη βοήθεια της εφαρμογής Model Builder. Το διάγραμμα ροής που διαμορφώθηκε από την καταγραφή των ενεργειών στο μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.8. Στο διάγραμμα αυτό, οι μπλε ελλείψεις συμβολίζουν τα δεδομένα εισόδου στα διάφορα εργαλεία, τα κίτρινα παραλληλόγραμμα τα εργαλεία και οι πράσινες ελλείψεις τα δεδομένα εξόδου των εκάστοτε εργαλείων.



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα ροής του μοντέλου καθορισμού των δυνητικά επικίνδυνων πρανών



Εικόνα 6.9: Χάρτης απεικόνισης των υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες ασταθών πρανών

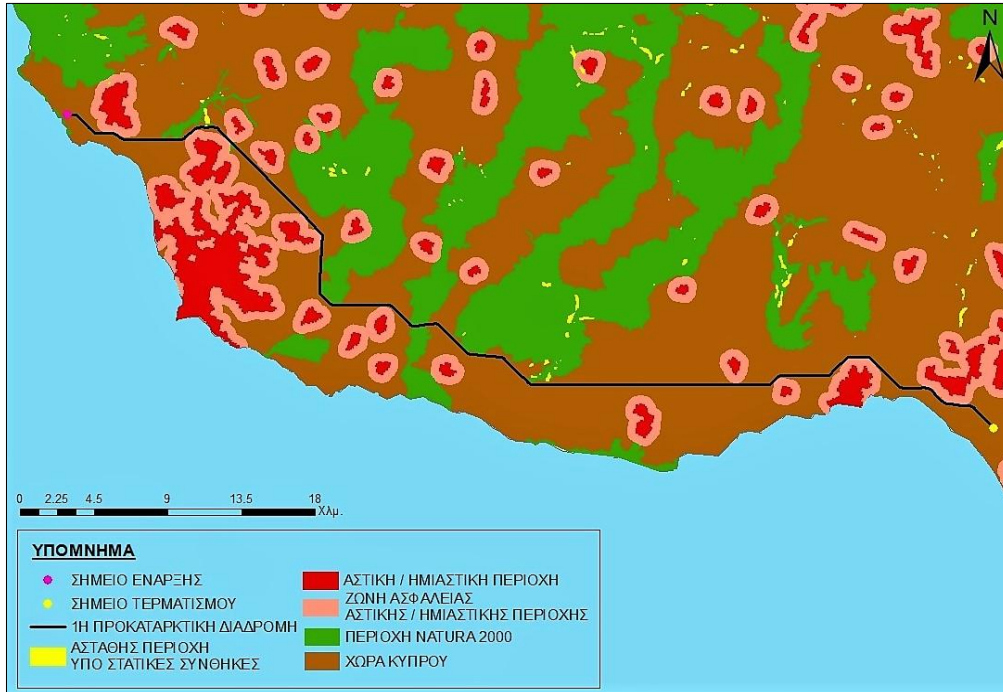
6.3 Διαμόρφωση προκαταρκτικών διαδρομών

Σε μια προσπάθεια προσέγγισης της διαδικασίας που ακολουθείται σε ένα πραγματικό έργο κατασκευής ενός αγωγού μεγάλου μήκους, κρίθηκε σωστό να διαμορφωθούν, βάσει διαφορετικών κριτηρίων, δύο προκαταρκτικές διαδρομές, οι οποίες θα μελετηθούν και στη συνέχεια θα συγκριθούν μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ασφάλειας, εκτός από την αποφυγή των αστικών/ημιαστικών περιοχών και των περιοχών Natura 2000, κριτήρια διαμόρφωσης των προκαταρκτικών διαδρομών υπήρξαν και η αποφυγή των ασταθών υπό στατικές συνθήκες περιοχών, καθώς και των περιοχών που χαρακτηρίζονται από μεγάλες κλίσεις.

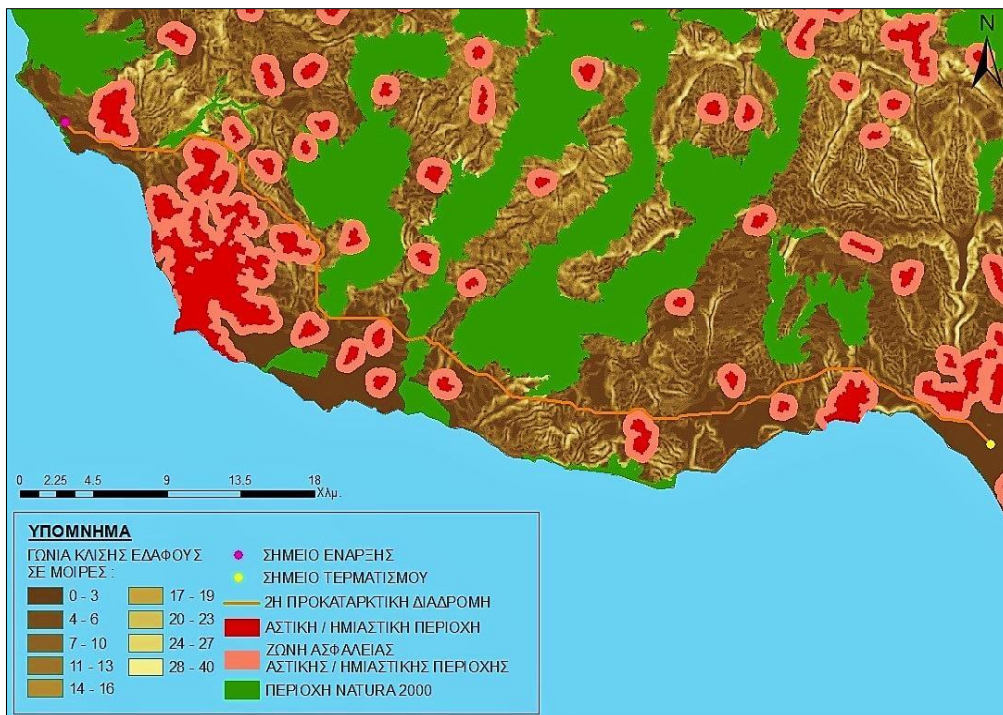
Όσον αφορά την πρώτη προκαταρκτική διαδρομή, αυτή διαμορφώθηκε με κριτήρια την αποφυγή των αστικών/ημιαστικών περιοχών, των περιοχών Natura και των ασταθών υπό στατικές συνθήκες περιοχών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διαμόρφωση της είναι αντίστοιχη με εκείνη που περιγράφεται στην ενότητα 5.2 της πρώτης εφαρμογής. Ειδικότερα, καθένα από τα τρία επίπεδα πληροφορίας, που απεικονίζουν τις περιοχές που πρέπει να αποφευχθούν, ενώθηκε με το επίπεδο πληροφορίας της περιοχής μελέτης, μεταποιήθηκε, ώστε να έχει ψηφιδωτή μορφή, αναταξινομήθηκε, ώστε κάθε περιοχή που πρέπει να αποφευχθεί να αντιστοιχίζεται σε τιμή 9, ενώ κάθε ουδέτερη περιοχή στην τιμή 1, και εισήχθη στο εργαλείο Raster Calculator για τη διεξαγωγή της σταθμισμένης υπέρθεσης. Διευκρινίζεται, ότι στο επίπεδο πληροφορίας των αστικών/ημιαστικών περιοχών αποδόθηκε συντελεστής βαρύτητας 50%, στο επίπεδο πληροφορίας των περιοχών Natura 30% και στο επίπεδο πληροφορίας των ασταθών υπό στατικές συνθήκες περιοχών 20%. Έπειτα, με τη βοήθεια των εργαλείων Cost Distance, Cost Path και Smooth Line προέκυψε η ζητούμενη διαδρομή (Εικόνα 6.10).

Όσον αφορά τη δεύτερη προκαταρκτική διαδρομή, αυτή διαμορφώθηκε με κριτήρια την αποφυγή των αστικών/ημιαστικών περιοχών, των περιοχών Natura και των περιοχών μεγάλης κλίσης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διαμόρφωση της είναι αντίστοιχη με εκείνη της διαμόρφωσης της πρώτης προκαταρκτικής διαδρομής. Η μόνη διαφορά έγκειται στο ότι στην προκειμένη περίπτωση στο εργαλείο Raster Calculator, εκτός από τα αναταξινομημένα επίπεδα πληροφορίας των αστικών/ημιαστικών περιοχών και των περιοχών Natura, εισήχθη και το αναταξινομημένο επίπεδο πληροφορίας των γωνιών κλίσης του εδάφους, του οποίου η δημιουργία περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 6.2). Υπενθυμίζεται, ότι το εν λόγω επίπεδο πληροφορίας είχε αναταξινομηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε στην κλάση των μικρότερων γωνιών κλίσης να αντιστοιχίζεται ο αριθμός 1, ενώ στην κλάση των μεγαλύτερων γωνιών κλίσης ο αριθμός 9. Για την εκτέλεση της σταθμισμένης υπέρθεσης μέσω του εργαλείου Raster Calculator,

στο επίπεδο πληροφορίας των αστικών/ημιαστικών περιοχών αποδόθηκε συντελεστής βαρύτητας 50%, στο επίπεδο πληροφορίας των περιοχών Natura 25% και στο επίπεδο πληροφορίας των κλίσεων επίσης 25%. Το αποτέλεσμα που προέκυψε παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.11.

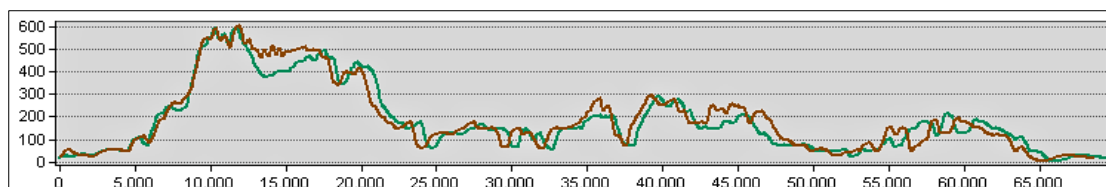


Εικόνα 6.10: Χάρτης απεικόνισης της πρώτης προκαταρκτικής διαδρομής



Εικόνα 6.11: Χάρτης απεικόνισης της δεύτερης προκαταρκτικής διαδρομής

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι δύο προκαταρκτικές διαδρομές διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη προκαταρκτική διαδρομή αποφεύγει όλες τις ζώνες ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών, όλες τις ασταθείς υπό στατικές συνθήκες περιοχές, καθώς και σχεδόν όλες τις περιοχές Natura 2000. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η διασταύρωση με την περιοχή Natura που εκτείνεται γύρω από τον Ξερό ποταμό, περίπου στα μισά της διαδρομής. Ωστόσο, δεδομένης της κατανομής των περιοχών που πρέπει να αποφευχθούν, καθώς και των συντελεστών βαρύτητας, οι οποίοι υποδηλώνουν ότι η αποφυγή των αστικών περιοχών είναι σημαντικότερη από την αποφυγή των περιοχών Natura, η διασταύρωση αυτή ήταν αναπόφευκτη. Όσον αφορά τη δεύτερη προκαταρκτική διαδρομή, αυτή σε πρώτη ανάγνωση φαίνεται ίδια με την πρώτη. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι και αυτή αποφεύγει όλες τις ζώνες ασφαλείας των αστικών/ημιαστικών περιοχών και τέμνεται με την ίδια περιοχή Natura, που τέμνεται και η πρώτη. Ωστόσο, καθώς κριτήριο διαμόρφωσης της υπήρξε και η αποφυγή των περιοχών με μεγάλη κλίση, διακρίνεται ότι η εν λόγω διαδρομή συντίθεται από περισσότερα καμπύλα τμήματα, σε σχέση με την πρώτη. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί αρνητικό, καθώς τα καμπύλα τμήματα είναι πιο δύσκολα ως προς την κατασκευή τους, σε σχέση με τα ευθύγραμμα. Τέλος, σημαντική πληροφορία αποτελεί το γεγονός ότι και οι δύο διαδρομές έχουν σχεδόν το ίδιο μήκος, δηλαδή 68,5 και 69,4 χιλιόμετρα, αντίστοιχα.

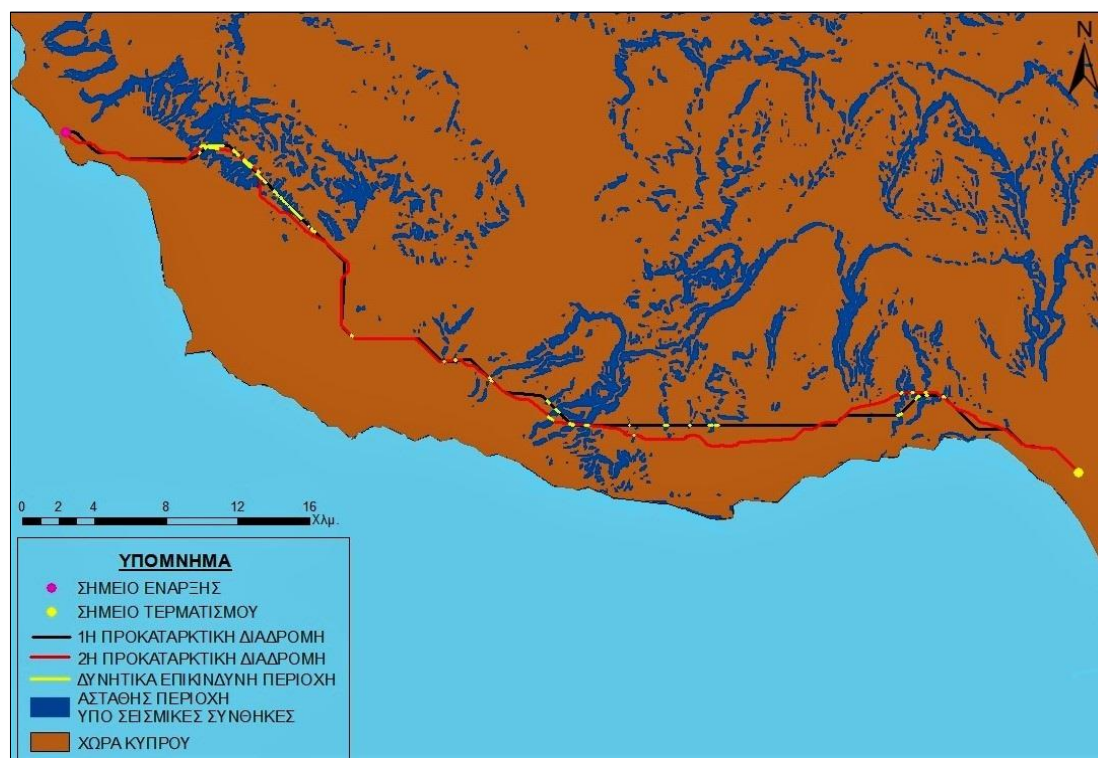


Εικόνα 6.12: Μηκοτομές προκαταρκτικών διαδρομών. Με το καφέ χρώμα απεικονίζεται η πρώτη και με το πράσινο η δεύτερη διαδρομή.

6.4 Εντοπισμός σημείων τομής των προκαταρκτικών διαδρομών με τα δυνητικά επικίνδυνα πρηνή

Έπειτα από τη διαμόρφωση των προκαταρκτικών διαδρομών, εντοπίστηκαν τα σημεία διασταύρωσης αυτών με τις δυνητικά επικίνδυνες περιοχές, που υπολογίστηκαν στην ενότητα 6.2, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτές μπορεί να έχουν αρνητικές συνέπειες στην ακεραιότητα του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε τομή καθενός από τα επίπεδα (layers) των προκαταρκτικών διαδρομών με το επίπεδο που απεικονίζει τις υπό σεισμικές συνθήκες ασταθείς περιοχές, με τη βοήθεια του εργαλείου Intersect. Ύστερα από τη μελέτη των επίπεδων πληροφορίας που προέκυψαν από τις

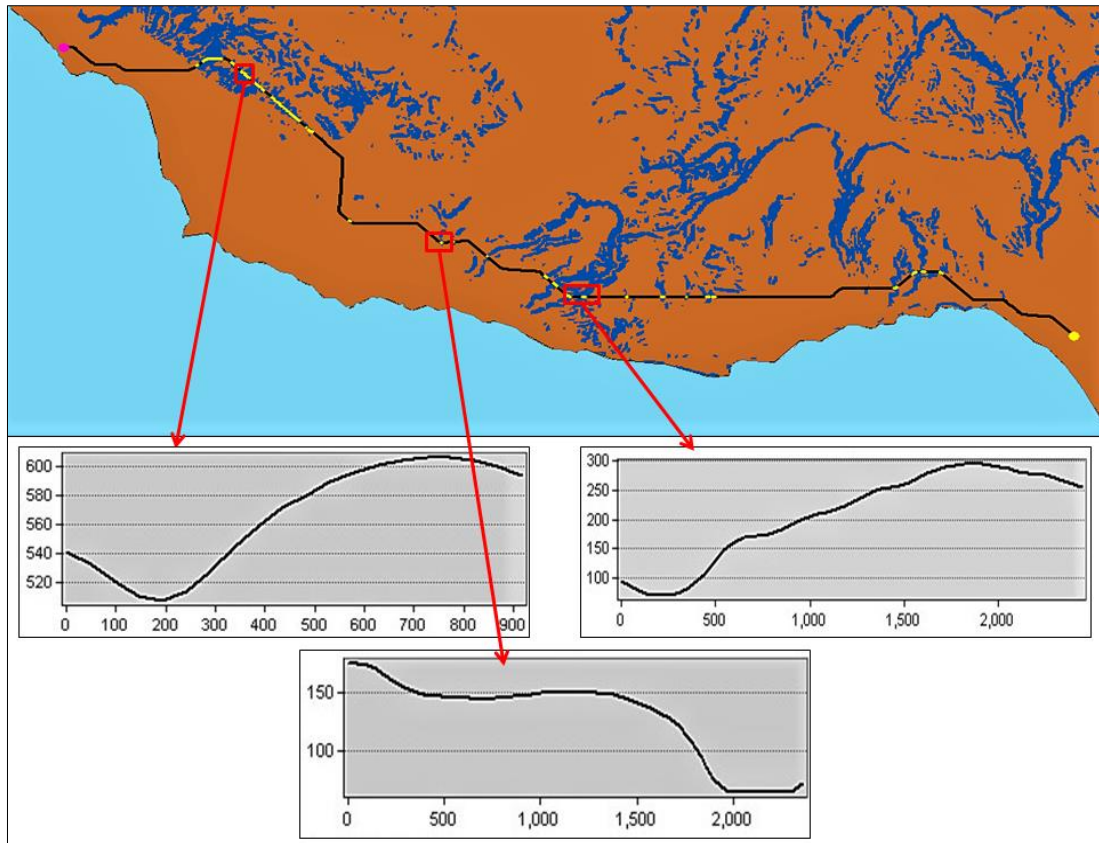
δύο τομές, διαπιστώθηκε ότι η πρώτη προκαταρκτική διαδρομή τέμνεται με 75 δυνητικά επικίνδυνα πρηνή, ενώ η δεύτερη, η οποία έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να αποφεύγει τις απότομες κλίσεις, με 34.



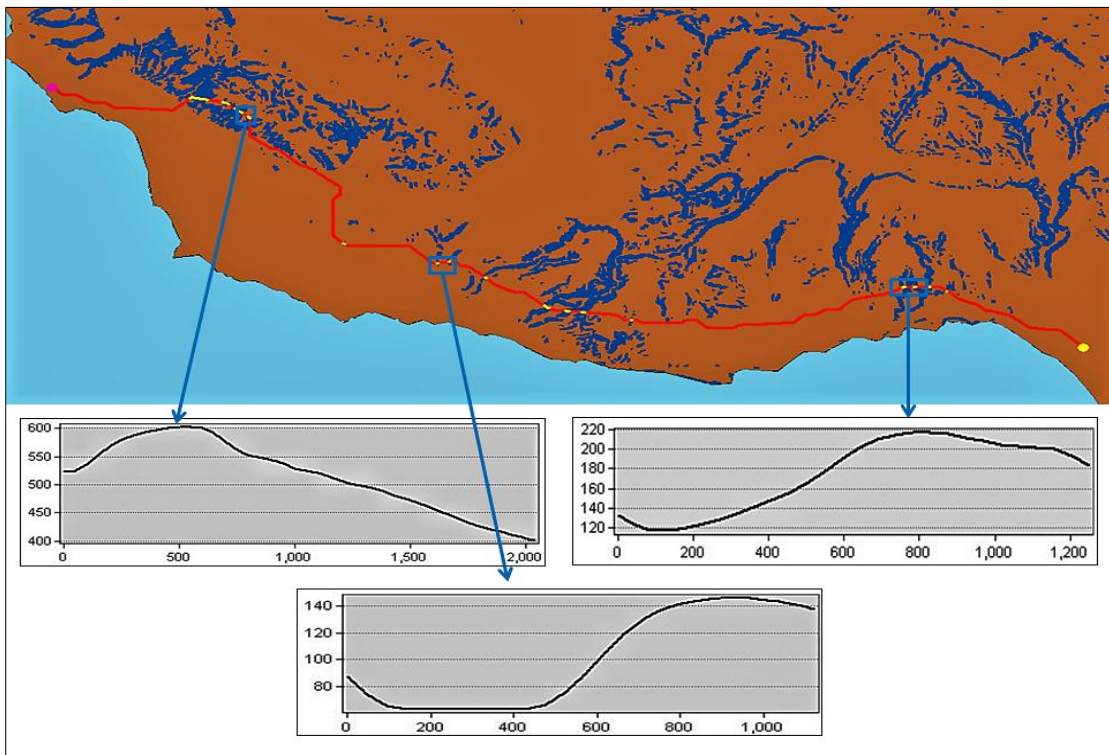
Εικόνα 6.13: Χάρτης απεικόνισης των δυνητικά επικίνδυνων περιοχών που διασταυρώνονται με τις προκαταρκτικές διαδρομές.

Καθώς η μελέτη όλων των δυνητικά επικίνδυνων πρηνών και των δύο διαδρομών είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο, αποφασίστηκε να μελετηθούν ενδεικτικά μόνο τρία από τα πρηνή που διασταυρώνονται με την κάθε διαδρομή. Κριτήριο επιλογής των προς μελέτη πρηνών ήταν αυτά να έχουν διαφορετική γεωμετρία και εδαφικά χαρακτηριστικά, και να αντιστοιχίζονται σε μικρές τιμές κρίσιμης επιτάχυνσης.

Έπειτα από την επιλογή των έξι πρηνών, ακολούθησε η εξαγωγή των διαστάσεων τους. Πιο συγκεκριμένα, για καθένα από αυτά δημιουργήθηκε η αντίστοιχη μηκοτομή, με τη βοήθεια του 3D Analyst Toolbar, της εφαρμογής ArcMap. Η θέση, οι μηκοτομές, καθώς και τα χαρακτηριστικά (κατηγορία εδάφους, συνοχή, ειδικό βάρος, γωνία εσωτερικής τριβής, κρίσιμη επιτάχυνση και συντελεστής επιτάχυνσης της εκάστοτε σεισμικής ζώνης), που αντλήθηκαν από την εφαρμογή ArcMap, των πρηνών που μελετώνται στη συνέχεια, παρουσιάζονται στις εικόνες και τον πίνακα, που ακολουθούν.



Εικόνα 6.14: Μηκτομές των τριών πραινών της πρώτης προκαταρκτικής διαδρομής

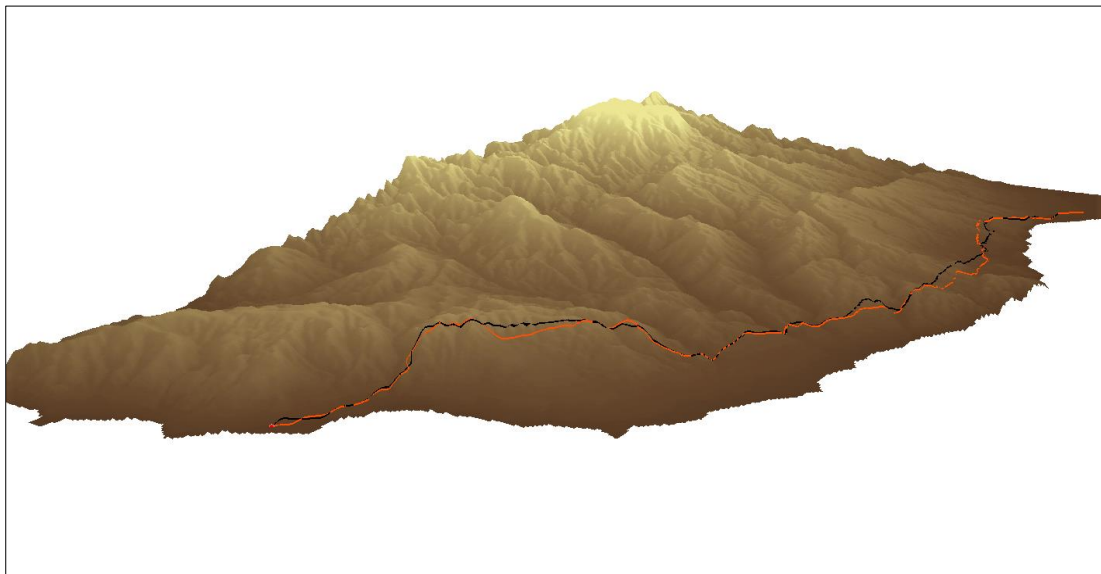


Εικόνα 6.15: Μηκτομές των τριών πραινών της δεύτερης προκαταρκτικής διαδρομής

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά των επιλεγμένων πρανών των δύο προκαταρκτικών διαδρομών, που αντλήθηκαν από την εφαρμογή ArcMap

Διαδρομή	Πρανές	Κατηγορία Εδάφους	c (kPa)	γ (KN/m ³)	φ (°)	k _{cr}	k
1 ^η	Πρώτο	Μάργα	35	20	22	0,09	0,25
	Δεύτερο	Άργιλος	15	18	25	0,23	0,25
	Τρίτο	Μάργα	35	20	22	0,06	0,25
2 ^η	Πρώτο	Μάργα	35	20	22	0,15	0,25
	Δεύτερο	Άργιλος	15	18	25	0,23	0,25
	Τρίτο	Μάργα	35	20	22	0,22	0,25

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι σημαντικό ρόλο στην διαδικασία επιλογής των πρανών που θα μελετηθούν, έπαιξε η τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης, καθώς μέσω αυτής διαμορφώθηκε μια καλύτερη αντίληψη της μορφής του αναγλύφου όλων των δυνητικά επικίνδυνων πρανών. Η απεικόνιση αυτή δημιουργήθηκε με τη βοήθεια της εφαρμογής ArcScene, κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που περιγράφεται στην πρώτη εφαρμογή.



Εικόνα 6.16: Τρισδιάστατη απεικόνιση των προκαταρκτικών διαδρομών και της περιοχής που διατρέχουν, από νοτιοδυτική όψη

6.5 Διερεύνηση της επίδρασης των δυνητικά επικίνδυνων πρανών στον αγωγό

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των δυνητικά επικίνδυνων πρανών στον αγωγό, στην περίπτωση εκδήλωσης κάποιου σεισμικού φαινομένου, υπολογίστηκαν οι σεισμικά προκαλούμενες μετατοπίσεις του κάθε πρανούς και στη συνέχεια οι αξονικές παραμορφώσεις που προκαλούνται στον αγωγό

από τις μετατοπίσεις αυτές. Τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του λογισμικού Abaqus. Πιο συγκεκριμένα, όπως και στην πρώτη εφαρμογή, για κάθε περίπτωση πρανούς-αγωγού ακολουθήθηκαν οι εξής ενέργειες:

- Σύνθεση πρώτου αρχείου εισόδου (input file), το οποίο περιλαμβάνει την περιγραφή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του εκάστοτε πρανούς και την επιβολή της σεισμικής δύναμης σε αυτό.
- Εκτέλεση της ανάλυσης του πρώτου αρχείου εισόδου στο λογισμικό και εξαγωγή των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων της ελεύθερης επιφάνειας του πρανούς (U1 και U2).
- Σύνθεση δεύτερου αρχείου εισόδου (input file), το οποίο περιλαμβάνει την περιγραφή της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του εκάστοτε τμήματος του αγωγού και την επιβολή των μετατοπίσεων, που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα, σε αυτό.
- Εκτέλεση της ανάλυσης του δεύτερου αρχείου εισόδου στο λογισμικό και εξαγωγή των αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του αγωγού.

Η διαδικασία σύνθεσης των δύο αρχείων εισόδου, που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η ίδια με αυτή που περιγράφεται στην ενότητα 5.4 της πρώτης εφαρμογής. Στις παραγράφους που ακολουθούν καταγράφονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ή υπολογίστηκαν για τη συμπλήρωση των αρχείων εισόδου, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

A. Συγκέντρωση απαραίτητων δεδομένων για τη συμπλήρωση των αρχείων

Αρχικά, για τη συμπλήρωση του πρώτου αρχείου εισόδου ήταν απαραίτητη η συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με το εδαφικό υλικό του εκάστοτε πρανούς. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1, τα έξι πρανή που επιλέχθηκαν να μελετηθούν συντίθενται είτε από μάρμα είτε από άργιλο. Επιπλέον, στον ίδιο πίνακα αναγράφονται οι τιμές της συνοχής, του ειδικού βάρους και της γωνίας εσωτερικής τριβής της κάθε εδαφικής κατηγορίας, οι οποίες είχαν συγκεντρωθεί ήδη από την διαδικασία συλλογής των απαραίτητων δεδομένων (Ενότητα 6.1). Εκτός όμως από τις τιμές αυτές, απαραίτητες για τη συμπλήρωση του πρώτου αρχείου ήταν και οι τιμές της γωνίας διασταλτικότητας, του μέτρου ελαστικότητας, του συντελεστή πλευρικών ωθήσεων και του λόγου Poisson. Από τις παραπάνω τιμές, η τιμή της γωνίας διασταλτικότητας αντλήθηκε από σημειώσεις του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου της Γιούτα (Bartlett, 2012), ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων υπολογίστηκε βάσει της γωνίας εσωτερικής τριβής,

μέσω του τύπου $k_0 = 1 - \sin \varphi$, ο λόγος Poisson βάσει του τύπου $k_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ και τέλος το μέτρο ελαστικότητας βάσει της εξίσωσης (Σακελλαρίου, 2008): $E = 2 \times G \times (1 + \nu)$, όπου $G = \rho \times V_s^2$, και $V_s =$ ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων, η οποία για μάργα θεωρήθηκε ίση με 700 m/s και για αργιλικό υλικό ίση με 400 m/s. Το σύνολο των χαρακτηριστικών των δύο εδαφικών υλικών, από τα οποία αποτελούνται τα πρηνή που μελετήθηκαν, συγκεντρώνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά Μάργας

Χαρακτηριστικά Μάργας	
Συνοχή (c)	35 kPa
Ειδικό Βάρος (γ)	20 kN/m ³
Γωνία Εσωτερικής Τριβής (φ)	22°
Γωνία Διασταλτικότητας (ψ)	0,1°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	27 x 10 ⁵ kPa
Συντελεστής Πλευρικών Ωθήσεων (K_0)	0,625
Λόγος Poisson (ν)	0.38

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά Αργίλου

Χαρακτηριστικά Αργίλου	
Συνοχή (c)	15 kPa
Ειδικό Βάρος (γ)	18 kN/m ³
Γωνία Εσωτερικής Τριβής (φ)	25°
Γωνία Διασταλτικότητας (ψ)	0,1°
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	7,9 x 10 ⁵ kPa
Συντελεστής Πλευρικών Ωθήσεων (K_0)	0,577
Λόγος Poisson (ν)	0.37

Πέρα από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε εδαφικού υλικού, για την συμπλήρωση και την εκτέλεση της ανάλυσης του πρώτου αρχείου εισόδου ήταν απαραίτητος και ο προσδιορισμός του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης (k). Καθώς έχει επιλεγεί η ψευδοστατική μέθοδος ως μέθοδος ανάλυσης της ευστάθειας, αποφασίστηκε ως τιμή του συντελεστή επιτάχυνσης να χρησιμοποιηθεί το ένα δεύτερο της τιμής του συντελεστή επιτάχυνσης της σεισμικής ζώνης στην οποία ανήκει το εκάστοτε πρηνές που μελετήθηκε. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1, όλα τα πρηνή που μελετήθηκαν ανήκουν στην τρίτη Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας, η οποία αντιστοιχεί σε συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης 0,25. Κατ' επέκταση για την εκτέλεση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης ίσος με 0,125.

Ακολούθησε ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του αγωγού και ο υπολογισμός της αντοχής των εδαφικών ελατηρίων, τα οποία ήταν απαραίτητα για τη συμπλήρωση του δεύτερου αρχείου εισόδου. Όσον αφορά τον αγωγό, σε αυτόν αποδόθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6.4: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του αγωγού

Χαρακτηριστικά Αγωγού	
Υλικό Κατασκευής	Χάλυβας
Μέτρο Ελαστικότητας Χάλυβα (E)	$206,8 \times 10^6$ kPa
Λόγος Poisson Χάλυβα (ν)	0.3
Τάση διαρροής Χάλυβα (Yield Stress)	413.7×10^6 kPa
Υλικό Επένδυσης	Σκυρόδεμα
Εξωτερική Ακτίνα (r)	0.61 m
Πάχος τοιχώματος (t)	0,0254 m
Βάθος Ταφής (H)	$1,5 \text{ m} + r = 2,11 \text{ m}$

Τέλος, για κάθε κατηγορία εδαφικού υλικού, βάσει των χαρακτηριστικών του αγωγού καθώς και των εξισώσεων του διεθνή Κανονισμού του ALA, υπολογίστηκαν οι τιμές της αντοχής των εδαφικών ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 6.5: Μέγιστες τιμές δύναμης και μετατόπισης των εδαφικών ελατηρίων που προσομοιώνουν εδαφικό υλικό μάργας

Μάργα	
Αξονικά Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (T_u)	158,994 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_t)	0,008 m
Οριζόντια/Πλευρικά Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (P_u)	338,888 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_p)	0,109 m
Κάθετα (προς τα άνω) Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (Q_u)	169,961 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_{qu})	0,211 m
Κάθετα (προς τα κάτω) Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (Q_d)	986,375 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_{qd})	0,244 m

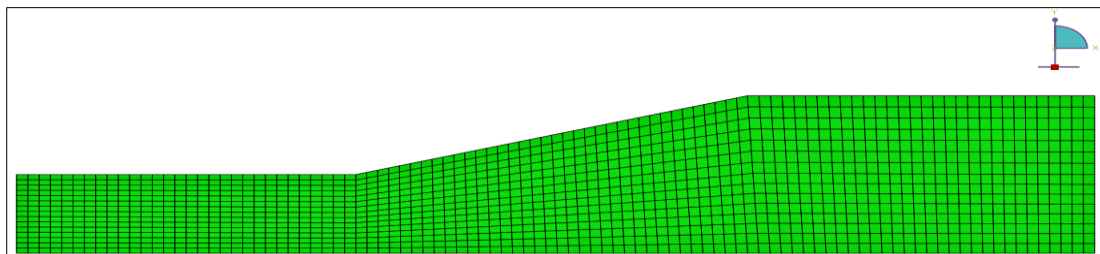
Πίνακας 6.6: Μέγιστες τιμές δύναμης και μετατόπισης των εδαφικών ελατηρίων που προσομοιώνουν εδαφικό υλικό αργίλου

Άργιλος	
Αξονικά Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (T_u)	82,104 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_t)	0,01 m
Οριζόντια/Πλευρικά Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (P_u)	198,381 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_p)	0,109 m
Κάθετα (προς τα άνω) Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (Q_u)	83,537 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_{qu})	0,244 m
Κάθετα (προς τα κάτω) Ελατήρια	
Μέγιστη Δύναμη (Q_d)	697,774 kN/m
Μέγιστη Μετατόπιση (Δ_{qd})	0,244 m

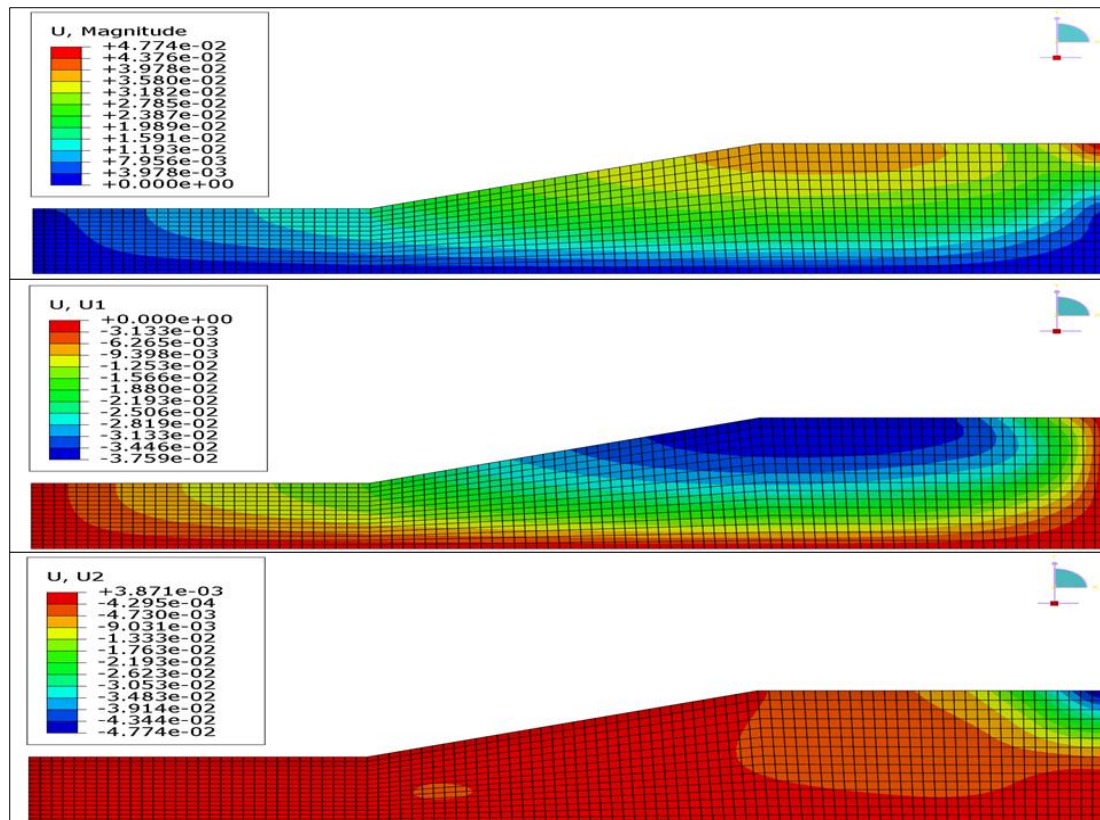
B. Αποτελέσματα αναλύσεων

Πρώτη προκαταρκτική διαδρομή

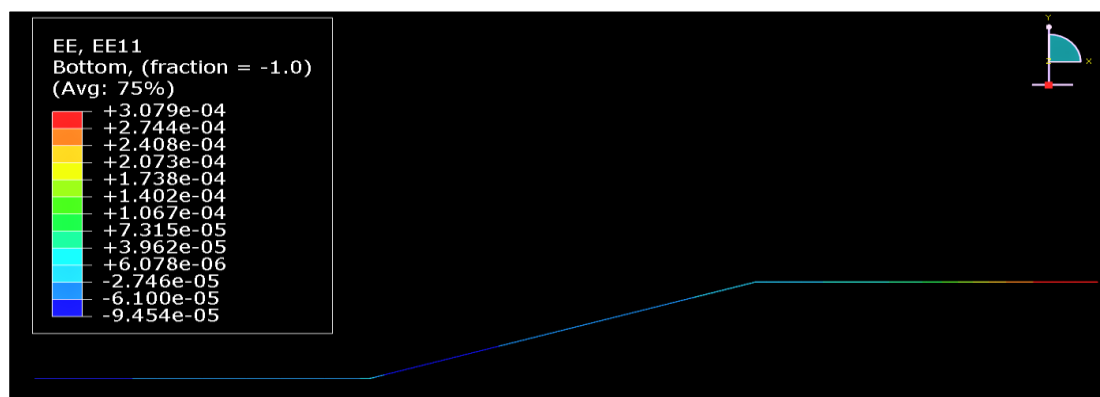
Για την μοντελοποίηση του πρώτου πρανούς, το οποίο συντίθεται από μάργα, χρησιμοποιήθηκαν 1552 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 1440 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, στο πρανές εφαρμόστηκε ψευδοστατική δύναμη με αρνητική φορά. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 194 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 192 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.17: Μοντέλο πρώτου πρανούς



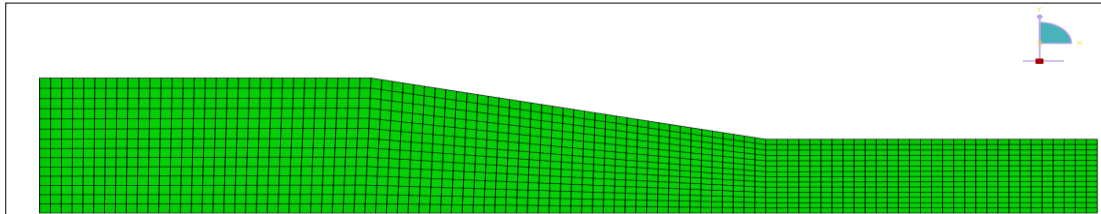
Εικόνα 6.18: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y (U_1 και U_2), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του πρώτου πρανούς



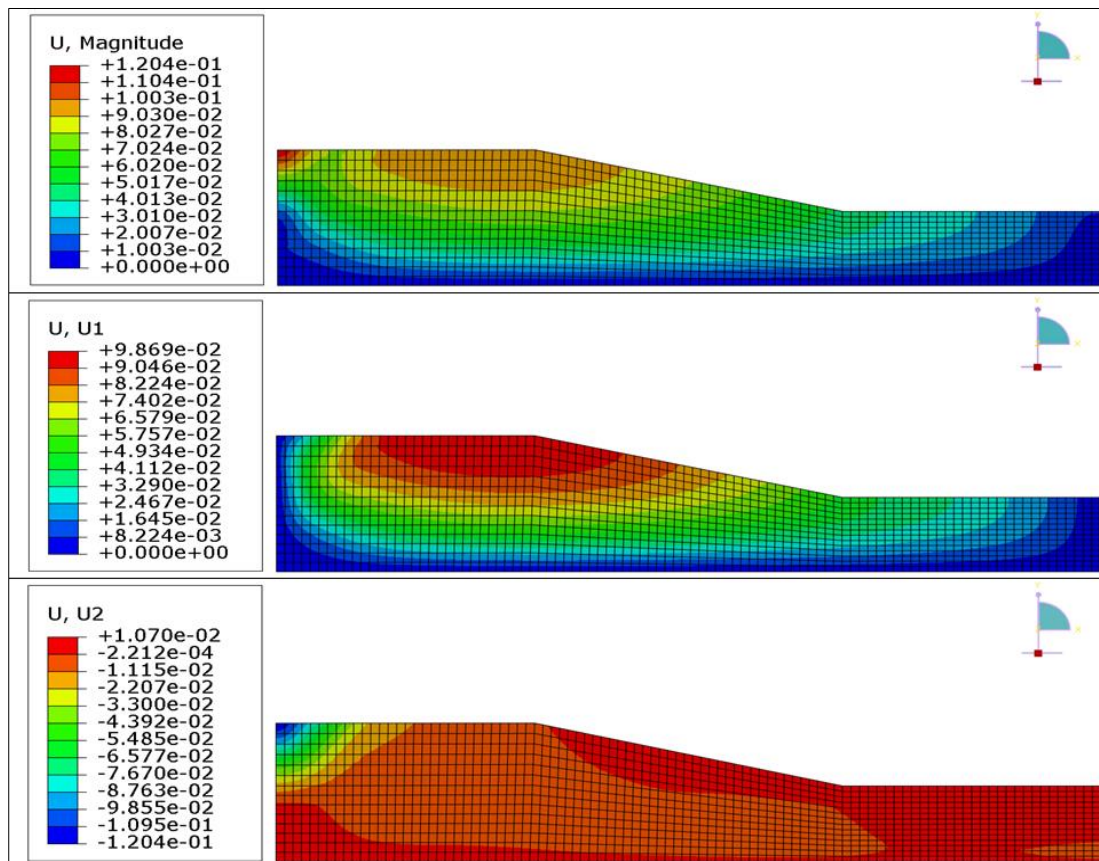
Εικόνα 6.19: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE_{11}) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το πρώτο πρανές.

Για τη μοντελοποίηση του δεύτερου πρανούς, που συντίθεται από άργιλο, χρησιμοποιήθηκαν 1470 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 1358 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς έγινε για θετική φορά της ψευδοστατικής δύναμης.

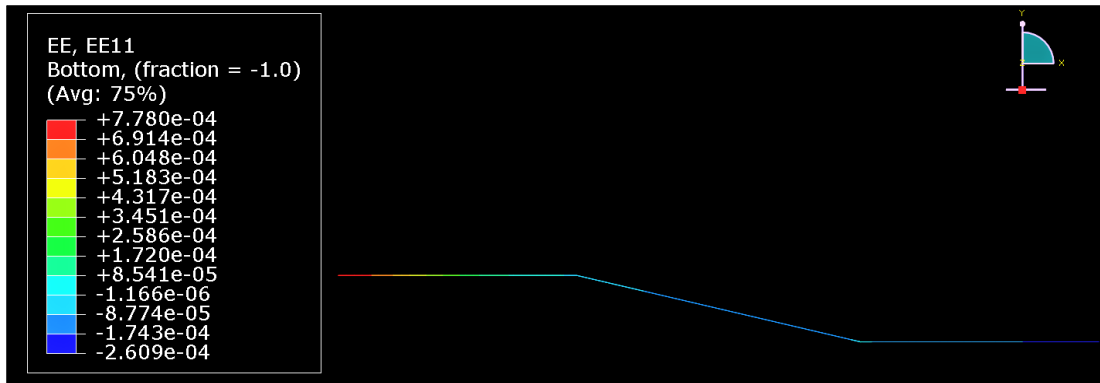
Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 196 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 194 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.20: Μοντέλο δεύτερου πρανούς

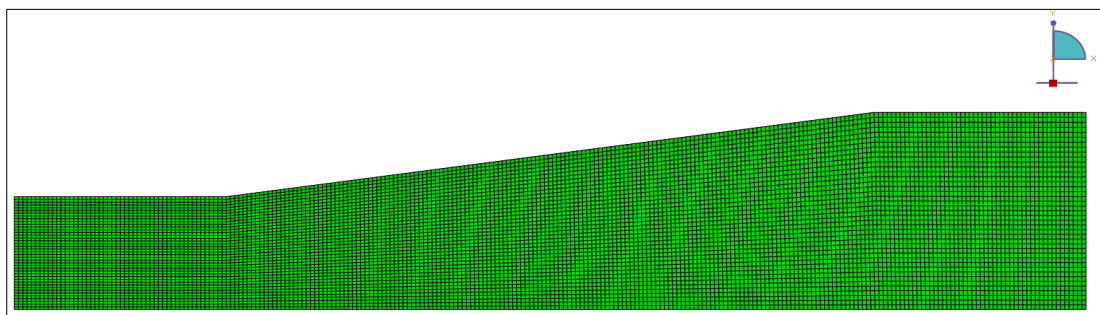


Εικόνα 6.21: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του δεύτερου πρανούς

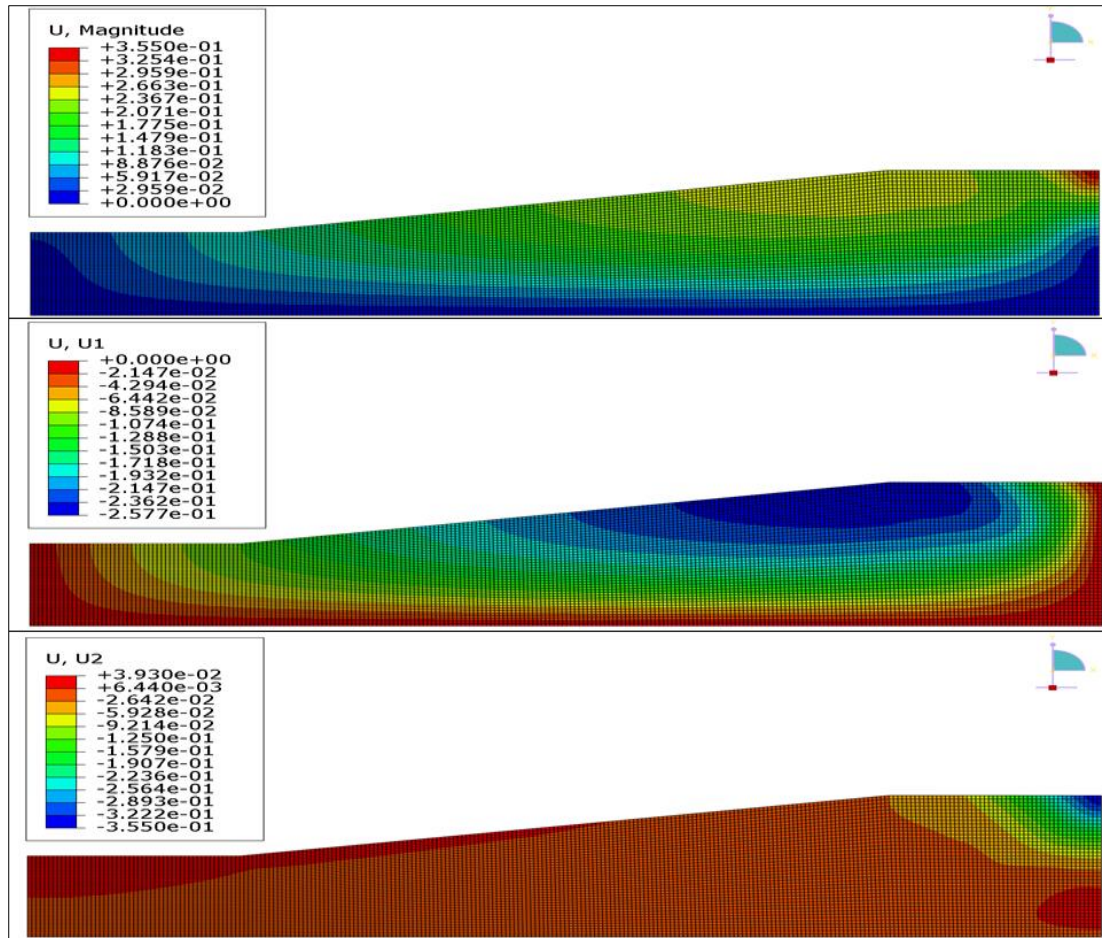


Εικόνα 6.22: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το δεύτερο πραινές.

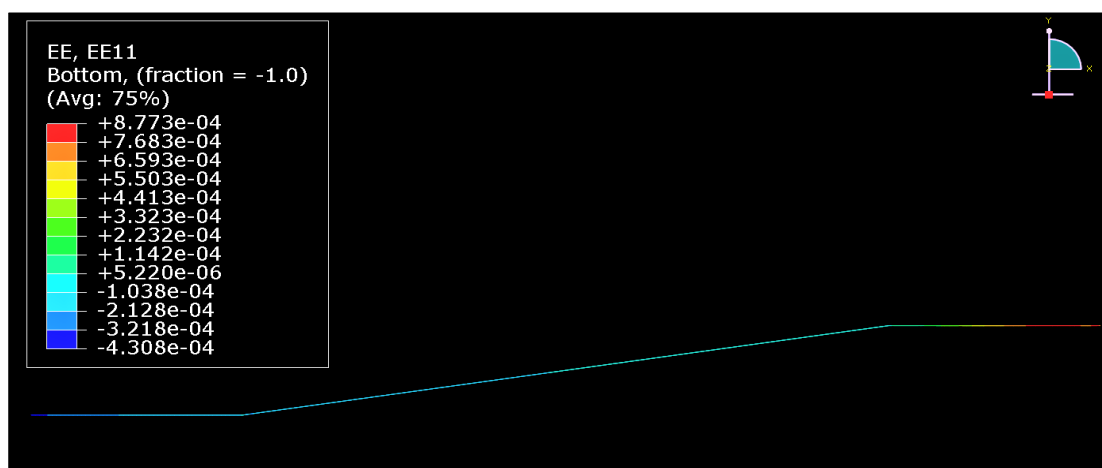
Τέλος, για τη μοντελοποίηση του τρίτου πραινούς, το οποίο συντίθεται από μάρμα, χρησιμοποιήθηκαν 10710 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 10414 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, η ανάλυση της ευστάθειας του πραινούς έγινε για αρνητική φορά της ψευδοστατικής δύναμης. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πραινές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 510 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 508 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.23: Μοντέλο τρίτου πραινούς



Εικόνα 6.24: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του τρίτου πρανούς



Εικόνα 6.25: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων ($EE11$) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το τρίτο πρανές.

Έπειτα από τη μελέτη των παραπάνω περιπτώσεων, διαπιστώνεται ότι και τα τρία πρηνή παρουσιάζουν παρόμοια απόκριση στην εκδήλωση του σεισμικού φαινομένου και κατά συνέπεια έχουν και παρόμοια επίδραση στον αγωγό. Αρχικά, όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πρηνών κατά τον άξονα των x , αυτές παρουσιάζουν μικρές διαφορές από περίπτωση σε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πρώτου πρηνούς, το οποίο είναι μικρών διαστάσεων και συντίθεται από μάργα, οι x -συνιστώσες της μετατόπισης κυμαίνονται από μερικές μονάδες χιλιοστών έως μερικές μονάδες εκατοστών. Έπειτα, στην περίπτωση του δεύτερου πρηνούς, το οποίο είναι μεγαλύτερων διαστάσεων από το πρώτο και συντίθεται από άργιλο (υλικό μικρότερης συνοχής), οι x -συνιστώσες της μετατόπισης κυμαίνονται επίσης από μερικές μονάδες χιλιοστών έως μερικές μονάδες εκατοστών, αλλά έχουν σχεδόν τις τριπλάσιες τιμές. Τέλος, στην περίπτωση του τρίτου πρηνούς, το οποίο έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από τα δύο προηγούμενα και συντίθεται από μάργα, οι συνιστώσες των μετατοπίσεων κατά τον άξονα των x είναι της τάξεως των μερικών μονάδων έως μερικών δεκάδων εκατοστών. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι σε όλες τις περιπτώσεις το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της x -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται μεταξύ του επάνω μέρους της κεκλιμένης πλευράς και της στέψης του πρηνούς.

Όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πρηνών κατά τον άξονα των y , αυτές σημειώνουν επίσης μικρές μεταβολές μεταξύ των τριών περιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πρώτου πρηνούς κυμαίνονται μεταξύ μερικών μονάδων χιλιοστών και μερικών μονάδων εκατοστών, ενώ στις περιπτώσεις του δεύτερου και του τρίτου πρηνούς κυμαίνονται μεταξύ μερικών μονάδων και μερικών δεκάδων εκατοστών, με τις τιμές του τρίτου πρηνούς να είναι σχεδόν οι τριπλάσιες από εκείνες του δεύτερου. Επιπλέον, το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της y -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται κάθε φορά σε εκείνη την άκρη της τομής του πρηνούς, που λόγω της επίδρασης της ψευδοστατικής δύναμης και των συνοριακών συνθηκών εφελκύεται. Σε αυτό το σημείο της τομής παρατηρείται γενικά αρκετά μεγάλη αρνητική y -μετατόπιση (βύθιση) του εδάφους, η οποία από την μια μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω των συνοριακών συνθηκών, αλλά από την άλλη θεωρείται πλασματική. Για το λόγο αυτό, οι τιμές της y -συνιστώσας στα σημεία αυτά δεν λήφθηκαν υπόψη, αλλά διορθώθηκαν, έτσι ώστε να είναι περισσότερο ρεαλιστικές.

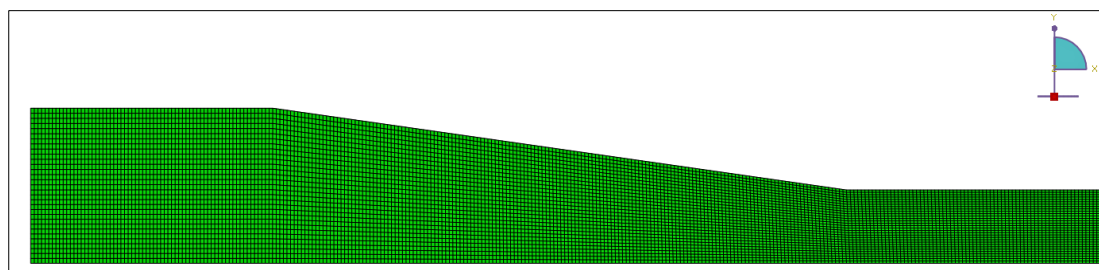
Τέλος, όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, αυτές και στις τρεις περιπτώσεις προέκυψαν επίσης μικρές, με τιμές που δεν ξεπερνούν τα όρια που ορίζει ο Ευρωκώδικας 8. Οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών και θλιπτικών αξονικών παραμορφώσεων για την κάθε περίπτωση παρατίθενται στον Πίνακα 6.7. Τα σημεία εφαρμογής των παραμορφώσεων αυτών εντοπίζονται στα άκρα του εκάστοτε τμήματος του αγωγού.

Πίνακας 6.7: Μέγιστες, εφελκυστικές και θλιπτικές, αξονικές παραμορφώσεις που προκάλεσαν τα τρία πρανή της πρώτης προκαταρκτικής διαδρομής στον αγωγό.

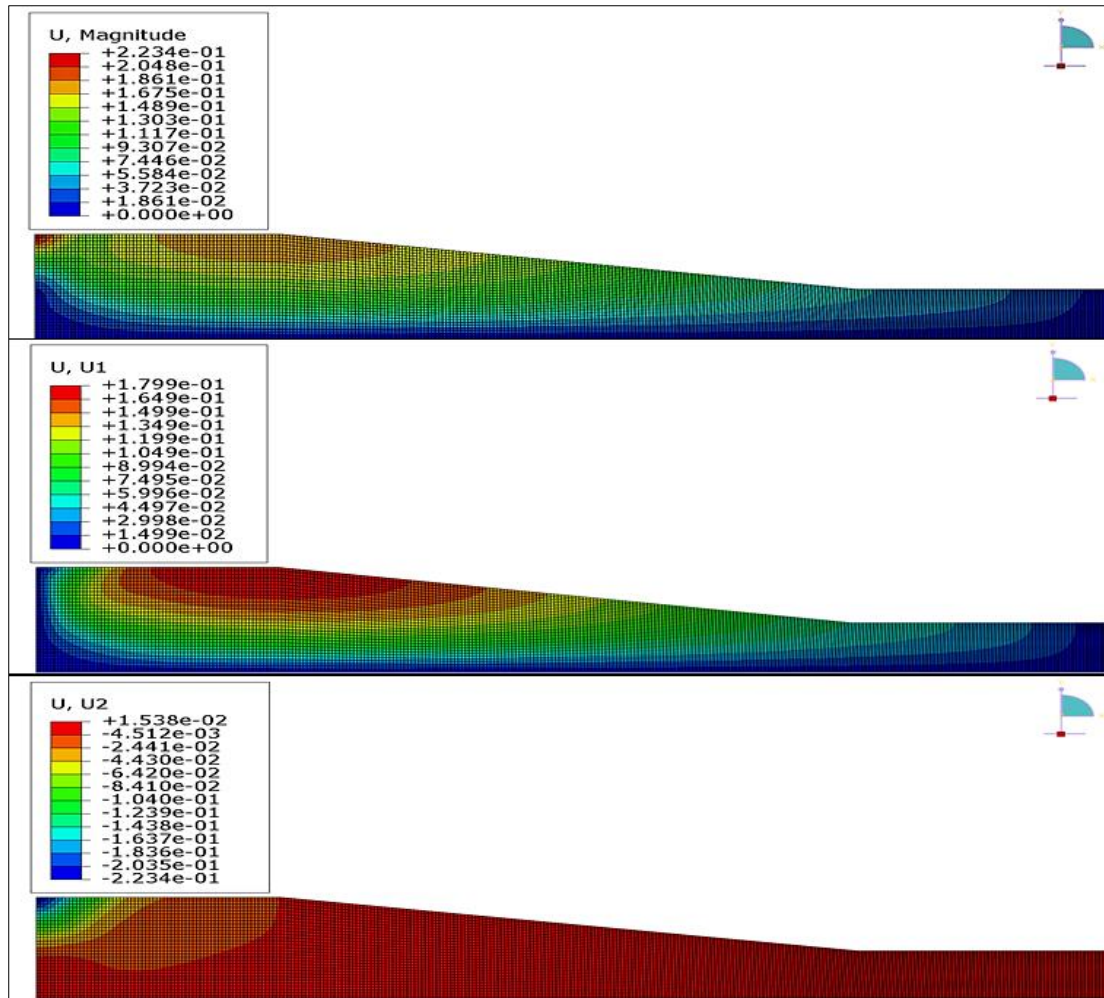
	1° πρανές	2° πρανές	3° πρανές
Μέγιστη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση	0,03 %	0,08 %	0,09 %
Μέγιστη αξονική θλιπτική παραμόρφωση	0,01 %	0,03 %	0,04 %

Δεύτερη προκαταρκτική διαδρομή

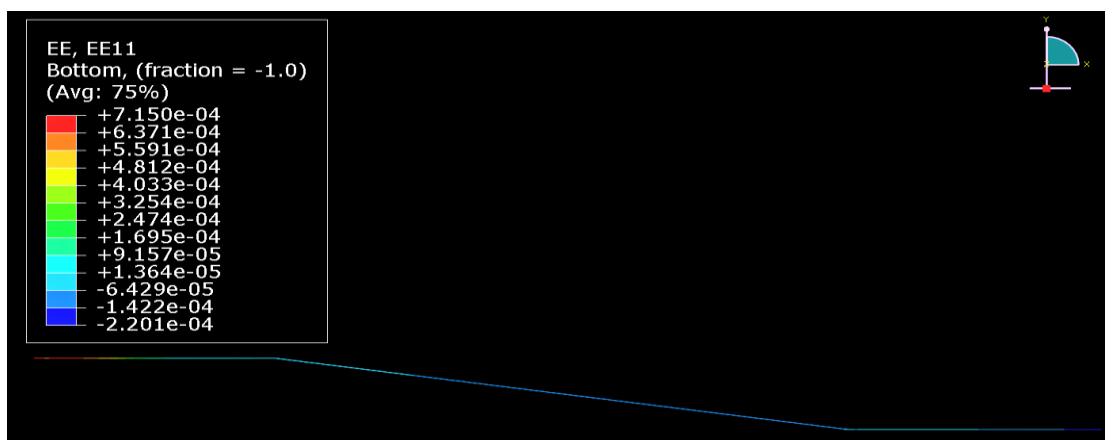
Για την μοντελοποίηση του πρώτου πρανούς, το οποίο συντίθεται από μάργα, χρησιμοποιήθηκαν 9504 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 9176 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, στο πρανές εφαρμόστηκε ψευδοστατική δύναμη με θετική φορά. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 594 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 592 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.26: Μοντέλο πρώτου πρανούς

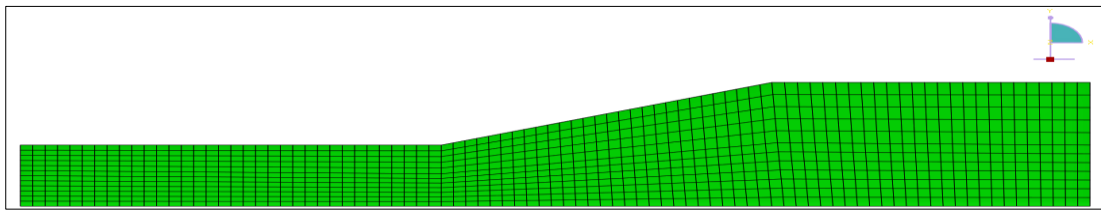


Εικόνα 6.27: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του πρώτου πρανούς

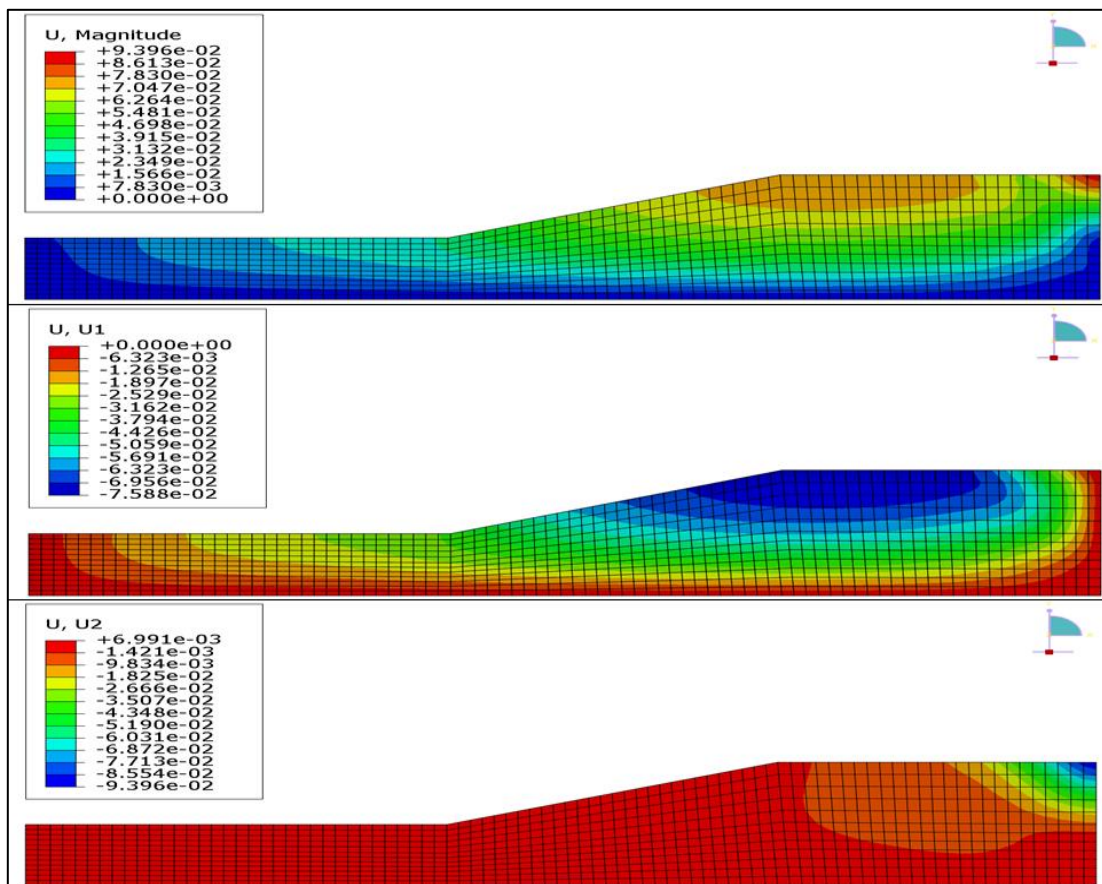


Εικόνα 6.28: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων ($EE11$) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το πρώτο πρανές.

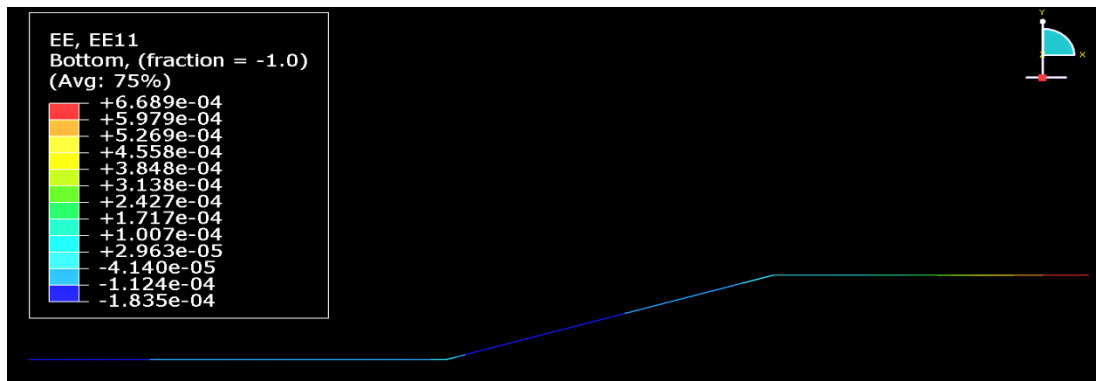
Για την μοντελοποίηση του δεύτερου πρανούς, το οποίο συντίθεται από άργιλο, χρησιμοποιήθηκαν 1144 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 1044 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, στο πρανές εφαρμόστηκε ψευδοστατική δύναμη με αρνητική φορά. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 176 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 174 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.29: Μοντέλο δεύτερου πρανούς

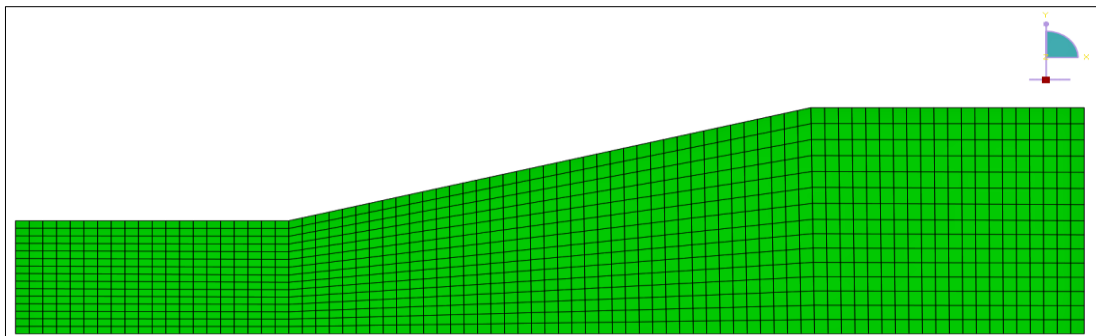


Εικόνα 6.30: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του δεύτερου πρανούς

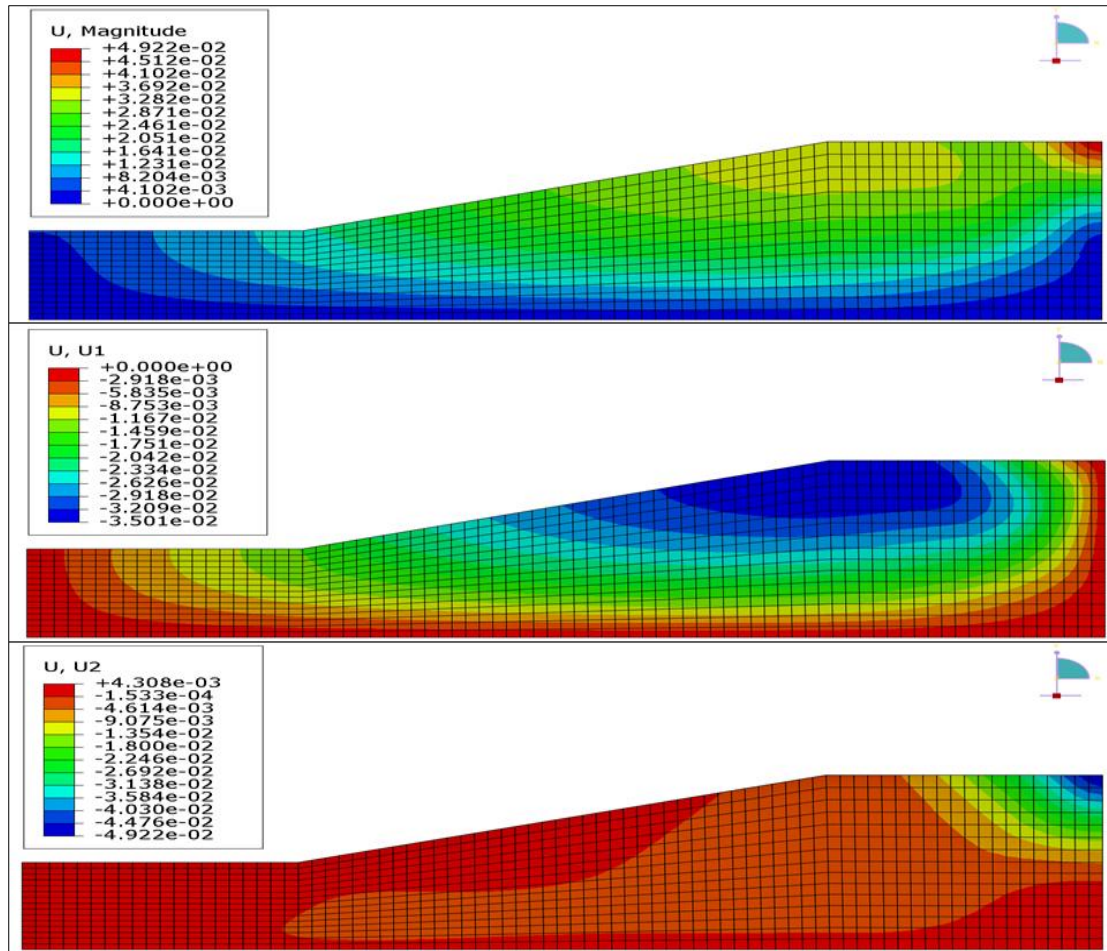


Εικόνα 6.31: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων (EE11) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το δεύτερο πρανές.

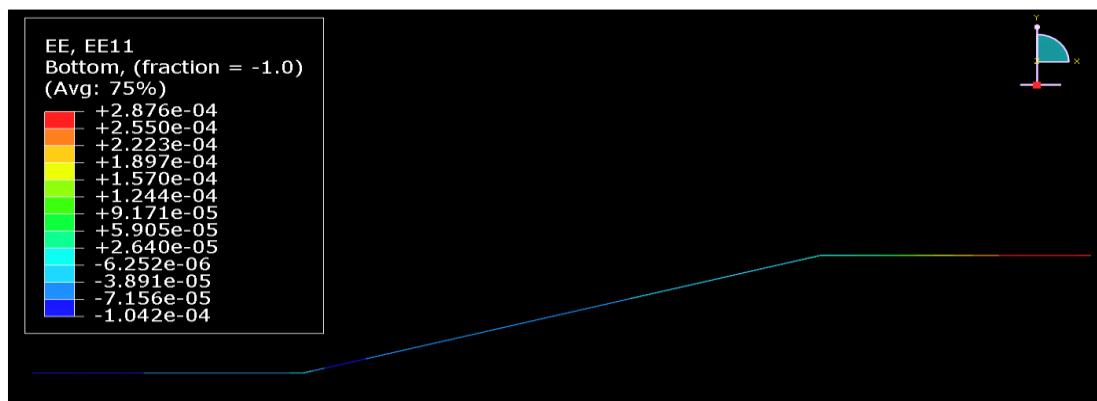
Για την μοντελοποίηση του τρίτου πρανούς, το οποίο συντίθεται από μάργα, χρησιμοποιήθηκαν 1280 κόμβοι, με πυκνότητα ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 1185 στοιχεία, τύπου CPE4. Επιπλέον, στο πρανές εφαρμόστηκε ψευδοστατική δύναμη με αρνητική φορά. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του τμήματος του αγωγού, που διασχίζει το συγκεκριμένο πρανές, καθώς και του εδάφους που το περιβάλλει, αυτή έγινε με 160 κόμβους, με πυκνότητα επίσης ίση με έναν κόμβο ανά 10 μέτρα, καθώς και 158 στοιχεία, τύπου PIPE21 και PSI24. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 6.32: Μοντέλο τρίτου πρανούς



Εικόνα 6.33: Απεικόνιση των συνισταμένων ($U_{\text{magnitude}}$), καθώς και των αντίστοιχων συνιστωσών κατά τους άξονες x και y ($U1$ και $U2$), των σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του τρίτου πρανούς



Εικόνα 6.34: Απεικόνιση των σεισμικά προκαλούμενων αξονικών παραμορφώσεων ($EE11$) του τμήματος του αγωγού που διέρχεται από το τρίτο πρανές.

Έπειτα από τη μελέτη των παραπάνω περιπτώσεων, διαπιστώνεται ότι και τα τρία πρηνή παρουσιάζουν παρόμοια απόκριση στην εκδήλωση του σεισμικού φαινομένου και κατά συνέπεια έχουν και παρόμοια επίδραση στον αγωγό. Αρχικά, όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πρηνών κατά τον άξονα των x , αυτές παρουσιάζουν μικρές διαφορές από περίπτωση σε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πρώτου πρηνούς, το οποίο έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από τα δύο άλλα και συντίθεται από μάργα, οι x -συνιστώσες της μετατόπισης κυμαίνονται από μερικές μονάδες έως μερικές δεκάδες εκατοστών. Έπειτα, στην περίπτωση του δεύτερου πρηνούς, παρόλο που αυτό συντίθεται από άργιλο (υλικό μικρότερης συνοχής), οι x -συνιστώσες της μετατόπισης είναι μικρότερες από εκείνες του πρώτου πρηνούς, δηλαδή κυμαίνονται από μερικές μονάδες χιλιοστών έως μερικές μονάδες εκατοστών. Τέλος, στην περίπτωση του τρίτου πρηνούς, το οποίο έχει τις μικρότερες διαστάσεις από τα δύο προηγούμενα και συντίθεται από μάργα, οι συνιστώσες των μετατοπίσεων κατά τον άξονα των x είναι της τάξεως των μερικών μονάδων χιλιοστών έως μερικών δεκάδων εκατοστών, με τιμές περίπου ίσες με το ένα τρίτο των αντίστοιχων τιμών του δεύτερου πρηνούς. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι σε όλες τις περιπτώσεις το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της x -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται μεταξύ του επάνω μέρους της κεκλιμένης πλευράς και της στέψης του πρηνούς.

Όσον αφορά τις συνιστώσες των μετατοπίσεων των πρηνών κατά τον άξονα των y , αυτές σημειώνουν επίσης μικρές μεταβολές μεταξύ των τριών περιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πρώτου πρηνούς κυμαίνονται μεταξύ μερικών μονάδων και μερικών δεκάδων εκατοστών, ενώ στις περιπτώσεις του δεύτερου και του τρίτου πρηνούς κυμαίνονται μεταξύ μερικών μονάδων χιλιοστών και μερικών μονάδων εκατοστών, με τις τιμές του τρίτου πρηνούς να είναι σχεδόν οι μισές από εκείνες του δεύτερου. Επιπλέον, το σημείο εφαρμογής της μέγιστης τιμής της y -συνιστώσας της μετατόπισης εντοπίζεται κάθε φορά σε εκείνη την άκρη της τομής του πρηνούς, που λόγω της επίδρασης της ψευδοστατικής δύναμης και των συνοριακών συνθηκών εφελκύεται. Σε αυτό το σημείο της τομής παρατηρείται γενικά αρκετά μεγάλη αρνητική y -μετατόπιση (βύθιση) του εδάφους, η οποία από την μια μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω των συνοριακών συνθηκών, αλλά από την άλλη θεωρείται πλασματική. Για το λόγο αυτό, οι τιμές της y -συνιστώσας στα σημεία αυτά δεν λήφθηκαν υπόψη, αλλά διορθώθηκαν, έτσι ώστε να είναι περισσότερο ρεαλιστικές.

Τέλος, όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, αυτές και στις τρεις περιπτώσεις προέκυψαν επίσης μικρές, με τιμές που δεν ξεπερνούν τα όρια που ορίζει ο Ευρωκώδικας 8. Οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών και θλιπτικών αξονικών παραμορφώσεων για την κάθε περίπτωση παρατίθενται στον

Πίνακα 6.8. Τα σημεία εφαρμογής των παραμορφώσεων αυτών εντοπίζονται στα άκρα του εκάστοτε τμήματος του αγωγού.

Πίνακας 6.8: Μέγιστες, εφελκυστικές και θλιπτικές, αξονικές παραμορφώσεις που προκάλεσαν τα τρία πρανή της δεύτερης προκαταρκτικής διαδρομής στον αγωγό.

	1° πρανές	2° πρανές	3° πρανές
Μέγιστη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση	0,07 %	0,07 %	0,03 %
Μέγιστη αξονική θλιπτική παραμόρφωση	0,02%	0,02 %	0,01 %

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η δημιουργία ενός εργαλείου, το οποίο θα προτείνει τη βέλτιστη διαδρομή ανάμεσα στα προκαθορισμένα σημεία έναρξης και τερματισμού ενός αγωγού, βάσει των δεδομένων που του εισάγει ο χρήστης. Βασική προϋπόθεση ήταν το εργαλείο να μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη απόφασης σχετικά με τη διέλευση ή όχι του αγωγού από μια περιοχή πιθανής εκδήλωσης γεωκινδύνου, και πιο συγκεκριμένα από μια περιοχή ενδεχόμενων σεισμικά προκαλούμενων μετατοπίσεων του εδάφους. Δεδομένων των αποτελεσμάτων των εφαρμογών, που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο εν λόγω στόχος επιτεύχθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό. Για τη λεπτομερέστερη αξιολόγηση της λειτουργίας του εργαλείου, στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται ορισμένα συμπεράσματα που διαμορφώθηκαν κατά τη διενέργεια των διαφόρων διαδικασιών.

Αρχικά, η χρήση των Σ.Γ.Π., και ειδικότερα του λογισμικού ArcGIS, ήταν καταλυτική για τη διαμόρφωση του εργαλείου, καθώς μέσω αυτού πραγματοποιήθηκαν οι ενέργειες της συγκέντρωσης, της απεικόνισης και της επεξεργασίας όλων των απαραίτητων δεδομένων, οι οποίες δεν θα ήταν δυνατές με κάποιο άλλο μέσο. Όσον αφορά τις επεξεργασίες των διαφόρων δεδομένων, αξιοσημείωτη είναι η δυνατότητα του λογισμικού να εκτελεί με εύκολο τρόπο πολυκριτηριακές αναλύσεις, δίνοντας στο χρήστη την ευκαιρία να οπτικοποιήσει το αποτέλεσμα που προκύπτει από την κατανομή συντελεστών βαρύτητας στα διάφορα κριτήρια διαμόρφωσης μιας διαδρομής. Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντική για τον εντοπισμό των ασταθών και δυνητικά επικίνδυνων περιοχών ήταν και η δυνατότητα δημιουργίας Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους, καθώς και απεικονίσεων των γωνιών κλίσης αυτού. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι εκ των αποτελεσμάτων των ασταθών περιοχών διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία εντοπισμού τους, μέσω του συντελεστή ασφαλείας, λειτούργησε σωστά. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ως ασταθείς υπό στατικές συνθήκες προέκυψαν οι περιοχές με τις μεγαλύτερες τιμές γωνιών κλίσης, καθώς και ότι η συνοχή του εδαφικού υλικού έπαιξε μικρότερο ρόλο.

Από την άλλη πλευρά, η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και του λογισμικού Abaqus ήταν εξίσου σημαντική, καθώς συμπλήρωσε το έργο των Σ.Γ.Π., παρέχοντας τις απαραίτητες αριθμητικές πληροφορίες. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, τόσο αυτών της ευστάθειας των πρανών, όσο και αυτών της αλληλεπίδρασης πρανούς-αγωγού, ήταν λογικά. Ωστόσο, διαπιστώθηκε, ότι η ακρίβεια τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια με την οποία ο χρήστης προσομοιώνει τις πραγματικές συνθήκες, και ειδικότερα τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τις συνοριακές συνθήκες. Επιπλέον, παρατηρήθηκε, ότι στη διαμόρφωση των τελικών τιμών παραμόρφωσης του αγωγού, οι οποίες ήταν και το ζητούμενο αποτέλεσμα, πολύ σημαντικό ρόλο

παίζει η τιμή του σεισμικού συντελεστή επιτάχυνσης. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της Κρήτης, παρατηρήθηκε ότι ο διπλασιασμός του συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης επέφερε τριπλασιασμό των παραμορφώσεων του αγωγού.

Παρά την ικανοποιητική του λειτουργία, το εργαλείο που διαμορφώθηκε επιδέχεται βελτίωση σε πολλά σημεία. Αρχικά, από τις διενέργειες στο λογισμικό ArcGIS, η διαδικασία εντοπισμού των ασταθών και δυνητικά επικίνδυνων περιοχών θα πρέπει να τροποποιηθεί, έτσι ώστε να μην βασίζεται στη διάσπαση της περιοχής μελέτης σε πολύγωνα με βάση την κλάση των γωνιών κλίσης. Έπειτα, όσον αφορά την προσομοίωση των πρηνών στο λογισμικό Abaqus, αυτή ιδανικά θα πρέπει να γίνεται με περισσότερα είδη πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να αναπαριστάται καλύτερα η κεκλιμένη πλευρά τους, και όχι ως ευθεία γραμμή. Όσον αφορά την αναπαράσταση των σεισμικών δυνάμεων που επιδρούν στα διάφορα πρηνή, η ψευδοστατική μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε, θα πρέπει να αντικατασταθεί από δυναμικές αναλύσεις. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων και των δύο λογισμικών σημαντικό ρόλο παίζει η επάρκεια και η ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων δεδομένων. Επομένως, σε μια προσπάθεια βελτίωσης του παρόντος εργαλείου θα πρέπει να συγκεντρωθούν καλύτερης ποιότητας δεδομένα, και κατά κύριο λόγο ακριβέστερα γεωτεχνικά δεδομένα, καθώς και δεδομένα σχετικά με την πίεση του νερού στους πόρους του εδάφους, τα οποία στην προκειμένη περίπτωση αγνοήθηκαν. Τέλος, η βέλτιστη εκδοχή του εργαλείου θα πρέπει να περιλαμβάνει τη σύνδεση μεταξύ των δύο λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν και τη διαμόρφωση των διαδικασιών με τέτοιο τρόπο, ώστε αυτές να εξαρτώνται λιγότερο από την κρίση του εκάστοτε χρήστη και να εκτελούνται αυτόματα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. American Lifelines Alliance. (2001). *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*.
2. Bartlett, S. F. (2012). *Mohr Coulomb Model*. Utah: University of Utah.
3. British Standards Institution. (2006). *BS EN 1998-4: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines*. UK: BSI.
4. Burrough, P. A. (1986). *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press.
5. Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1993). Landslide Types and Processes. In K. A. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board-National Academy of Sciences.
6. International Pipe Line & Offshore Contractors Association. (2013). *Onshore Pipelines The Road to Success - 3rd edition*. IPLOCA.
7. Javaheri, V., Porter, D., & Kuokkala, V. T. (2018). Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials. *Wear*, Vol. 408-409, pp. 248-273.
8. Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 95, No. 2, pp. 406-421.
9. Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
10. Psyrras, N. K., & Sextos, A. G. (2018). Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 106, pp. 254-277.
11. Rackham, O., & Moody, J. (1997). *The Making of the Cretan Landscape*. England: Manchester University Press.
12. Rizkalla, M. (2008). *Pipeline Geo-Environmental Design and Geohazard Management*. NY: ASME.
13. Takahashi, K. (2008). Transportation of Hydrogen by Pipeline. In O. Tokio, *Energy Carriers and Conversion Systems – Volume II*. UNESCO-Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
14. Trifunovic, N. (2006). *Introduction to Urban Water Distribution*. London: CRC Press.

15. Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 69, pp. 63–102.
16. Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In R. L. Schuster , & R. J. Krizek , *Landslides Analysis and Control* (pp. 12-33). Washington : Transportation and Road Research Board, National Academy of Science.
17. Βαλαλάς, Δ. Θ. (1981). *Εδαφομηχανική*. Θεσσαλονίκη: Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη.
18. Ευελπίδου, Ν., & Αντωνίου, Β. (2015). *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
19. Ευστρατιάδης, Α., & Κουτσογιάννης, Δ. (2005). *Εισαγωγή στα δίκτυα διανομής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
20. Μπουκοβάλας, Γ. Δ. (2006). *Υπολογιστικές Μέθοδοι στη Γεωτεχνική*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
21. Σακελλαρίου, Μ. Γ. (2008). *Γεωτεχνική Μηχανική*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. .
22. Τσακίρης, Γ. (2010). *Υδραυλικά Έργα Σχεδιασμός & Διαχείριση-Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα*. Αθήνα: Συμμετρία.
23. Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., & Στάμου, Λ. (2015). *Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον*. Αθήνα: Εκδόσεις Κάλλιπος.
24. Χαραλάμπους, Σ., & Σακελλαρίου, Μ. (2005). Εκτίμηση της ευστάθειας φυσικών και τεχνητών πρανών σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Έμφαση σε έργα Οδοποιίας. *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005*.
25. Χατζηχρήστος, Θ., & Μαρσέλη, Κ. (2013). *Τα Βασικά του ArcGis 10.1*. Αθήνα: Φάσμα in Art Εκδόσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ο Κανονισμός της ALA προβλέπει ότι:

1. Για τα αξονικά εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη αξονική εδαφική δύναμη που μπορεί να μεταδοθεί στον αγωγό, ανηγμένη στο μήκος του, είναι:

$$T_U = \pi \times D \times a \times c + \pi \times D \times H \times \bar{\gamma} \times \frac{1 + K_0}{2} \times \tan \delta \quad \text{Εξ.(1)}$$

Όπου:

D = η εξωτερική διάμετρος του αγωγού

c = η συνοχή του εδαφικού υλικού

H = το βάθος ταφής του αγωγού, μετρημένο από την επιφάνεια του εδάφους έως τον άξονα του αγωγού

$\bar{\gamma}$ = ενεργό ειδικό βάρος ($\bar{\gamma} = \gamma - \gamma_w$)

K_0 = συντελεστής πλευρικών ωθήσεων

a = συντελεστής συνοχής

$$= 0,608 - 0,123 \times c - \frac{0,274}{c^2+1} + \frac{0,695}{c^3+1}, \text{ όπου } c \text{ σε } KPa/100$$

δ = γωνία τριβής της διεπιφάνειας αγωγού-εδάφους ($\delta = f \times \varphi$)

φ = γωνία εσωτερικής τριβής εδαφικού υλικού

f = συντελεστής που εξαρτάται από το υλικό επένδυσης του αγωγού

Για χρήση σκυροδέματος ως υλικό επένδυσης του αγωγού, όπως συνέβη στην παρούσα εργασία, ισχύει $f = 1$.

Επιπλέον, η αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση εξαρτάται από το εκάστοτε εδαφικό υλικό. Αντιπροσωπευτικές τιμές δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1: Προτεινόμενες τιμές μετατόπισης λόγω μέγιστης αξονικής δύναμης

Εδαφικό Υλικό	Μετατόπιση (Δ_t)
Πυκνή Άμμος	3 mm
Χαλαρή Άμμος	5 mm
Δύσκαμπτη Άργιλος	8 mm
Μαλακή Άργιλος	10 mm

2. Για τα πλευρικά εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη πλευρική εδαφική δύναμη που μπορεί να μεταδοθεί στον αγωγό, ανηγμένη στο μήκος του, είναι:

$$P_u = N_{ch} \times c \times D + N_{qh} \times \bar{\gamma} \times H \times D \quad \text{Εξ. (2)}$$

Όπου:

N_{ch} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας για άργιλο (0 για $c=0$)

$$= a + b \times x + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9$$

N_{qh} = συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (0 για $\varphi=0^\circ$)

$$= a + b \times x + c \times x^2 + d \times x^3 + e \times x^4$$

Πίνακας 2: Τιμές συντελεστών N_{ch} και N_{qh} για διάφορες τιμές των παραμέτρων a , b , c , d , e και της γωνίας (φ)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ	φ	x	a	b	c	d	e
N_{ch}	0°	H/D	6,752	0,065	-11,063	7,119	--
N_{qh}	20°	H/D	2,399	0,439	-0,03	$1,059 \times 10^{-3}$	$-1,754 \times 10^{-5}$
N_{qh}	25°	H/D	3,332	0,839	-0,090	$5,606 \times 10^{-3}$	$-1,319 \times 10^{-4}$
N_{qh}	30°	H/D	4,565	1,234	-0,089	$4,275 \times 10^{-3}$	$-9,159 \times 10^{-5}$
N_{qh}	35°	H/D	6,816	2,019	-0,146	$7,651 \times 10^{-3}$	$-1,683 \times 10^{-4}$
N_{qh}	40°	H/D	10,959	1,783	0,045	$-5,425 \times 10^{-3}$	$-1,153 \times 10^{-4}$
N_{qh}	45°	H/D	17,658	3,309	0,048	$-6,443 \times 10^{-3}$	$-1,299 \times 10^{-4}$

Επιπλέον, η αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta_p = 0,04 \times \left(H + \frac{D}{2} \right) \leq 0,1 \times D \text{ έως } 0,15 \times D \quad \text{Εξ. (3)}$$

3. Για τα προς τα άνω κάθετα εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη προς τα άνω κάθετη εδαφική δύναμη που μπορεί να μεταδοθεί στον αγωγό, ανηγμένη στο μήκος του, είναι:

$$Q_u = N_{cv} \times c \times D + N_{qv} \times \bar{\gamma} \times H \times D \quad \text{Εξ. (4)}$$

Όπου:

$$N_{cv} = \text{προς τα άνω κάθετος συντελεστής για άργιλο (0 για } c=0) \\ = 2 \times \frac{H}{D} \leq 10, \text{ εφαρμόσιμο για } \frac{H}{D} \leq 10$$

$$N_{qv} = \text{προς τα άνω κάθετος συντελεστής για άμμο (0 για } \varphi=0^\circ) \\ = \frac{\varphi \times H}{44 \times D} \leq N_q$$

Επιπλέον, η αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta_{qu} = 0,01 \times H \sim 0,02 \times H < 0,1 \times D, \text{ για πυκνή έως χαλαρή άμμο} \\ = 0,1 \times H \sim 0,2 \times H < 0,2 \times D, \text{ για άκαμπτη έως μαλακή άργιλο}$$

4. Για τα προς τα κάτω κάθετα εδαφικά ελατήρια

Η μέγιστη προς τα κάτω κάθετη εδαφική δύναμη που μπορεί να μεταδοθεί στον αγωγό, ανηγμένη στο μήκος του, είναι:

$$Q_d = N_c \times c \times D + N_q \times \bar{\gamma} \times H \times D + N_\gamma \times \gamma \times \frac{D^2}{2} \quad \text{Εξ.}(5)$$

Όπου:

N_c, N_q, N_γ = συντελεστές φέρουσας ικανότητας

$$N_c = [\cot(\varphi + 0,001)] \times \{ \exp[\pi \times \tan(\varphi + 0,001)] \times (\tan(45 + \frac{\varphi + 0,001}{2}))^2 - 1 \}$$

$$N_q = \exp(\pi \times \tan \Phi) \times (\tan(45 + \frac{\varphi}{2}))^2$$

$$N_\gamma = e^{(0,18 \times \varphi - 2,5)}$$

γ = ειδικό βάρος εδαφικού υλικού

Επιπλέον, η αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta_{qd} = 0,1 \times d, \text{ για κοκκώδη εδάφη} \\ = 0,2 \times D, \text{ για συνεκτικά εδάφη}$$