



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

*Διπλωματική Εργασία
του
Στέφανου Κ. Τσουγκράνη*

Ανάπτυξη εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων για την αποφυγή γεωκινδύνων κατά την χάραξη αγωγών μεγάλου μήκους



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

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

ΑΘΗΝΑ, 2015



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

**Ανάπτυξη εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων σε
περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών
Συστημάτων για την αποφυγή γεωκινδύνων κατά την
χάραξη αγωγών μεγάλου μήκους**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Κ. Τσουγκράνης

Επιβλέπων : Μαρίνος Καττής

Συνεπιβλέπων : Πρόδρομος Ψαρρόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Μαρίνος Καττής

.....
Πρόδρομος Ψαρρόπουλος

.....
Ιωάννης Τσομπανάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Μέλος Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.

Αν. Καθηγητής Πολ. Κρήτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Στέφανος Κ. Τσουγκράνης

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Στέφανος Τσουγκράνης, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα και κύρια, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της παρούσας εργασίας κ. Μαρίνο Καττή και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, οι οποίοι αποτέλεσαν εξαιρετικοί καθηγητές. Το γεγονός αυτό αναφέρεται όχι μόνο στην επιτυχή μεταλαμπάδευση των γνώσεων τους, αλλά και στην σημαντική βελτίωση του τρόπου σκέψης μου κατά την αντιμετώπιση προβλημάτων της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερη μνεία αποδίδεται στην συμμετοχή του κ. Πρόδρομου Ψαρρόπουλου που, παρά τις αυξημένες επαγγελματικές του υποχρεώσεις, μου προσέφερε απλόχερα βοήθεια κατά την εκπόνηση της εργασίας, μέσω της εμπειρίας του και των δεδομένων που παρείχε.

Επειδή, όμως, η επίτευξη του στόχου της εκπόνησης της παρούσας εργασίας δεν ήταν μόνο έργο εμού και των προαναφερθέντων, ευχαριστώ όλους τους φίλους μου και ιδιαίτερα τους Χάρη Δήμο, Αλέξανδρο Γούλα, Βασίλη Γουργουλιό και Δημήτρη Κόκκορη για την ψυχολογική τους υποστήριξη και το αυξημένο ενδιαφέρον κατά την προσπάθεια τους να βελτιωθεί το περιεχόμενο της εργασίας, παρουσιάζοντας τις δικές τους απόψεις.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω από όλα τα μέλη της οικογένειάς μου, που δεν έπαψαν ποτέ να με υποστηρίζουν κατά την διάρκεια των σπουδών μου, υλικά και ηθικά. Η διορατικότητα τους καθώς και η ουσιαστική κριτική τους κατάφεραν, μέσα σε αυτά τα πέντε χρόνια σπουδών, να με κάνουν όχι μόνο γνωστικά πληρέστερο, αλλά και καλύτερο άνθρωπο.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	iv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xiv
ABSTRACT	xv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΘΕΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΘΕΣΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
1.1 Εισαγωγή στο θέμα	16
1.2 Στόχοι εργασίας.....	18
1.3 Δομή εργασίας	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ	20
2.1 Εισαγωγή	20
2.2 Βασικές έννοιες	20
2.2.1 Δομή του εσωτερικού της Γης.....	20
2.2.2 Μετακίνηση των ηπείρων και τεκτονική των πλακών	26
2.2.3 Θεωρία ελαστικότητας.....	34
2.2.4 Η γεωμετρική θεώρηση και οι παράμετροι ενός σεισμού	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΕΙΔΗ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ.....	43
3.1 Εισαγωγή	43
3.2 Κίνδυνος εδαφικής φόρτισης λόγω σεισμικών κυμάτων	43
3.2.1 Γενικά.....	43
3.2.2 Γεωμορφικές συνθήκες και οι επιπτώσεις τους	44
3.2.3 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά και οι επιπτώσεις τους.....	45
3.3 Γεωκίνδυνοι και μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις	47
3.3.1 Ρήγματα.....	47
3.3.2 Ρευστοποίηση εδάφους.....	50
3.3.3 Κατολισθήσεις και ευστάθεια πρανών	52
3.4 Εκτίμηση των γεωκινδύνων : οι απαραίτητες μελέτες πριν την δρομολόγηση του αγωγού	55
3.5 Γεωκινδύνοι υπεράκτιων αγωγών	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΕΠΙΛΟΓΗ, ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΞΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ	59

4.1 Εισαγωγή.....	59
4.1.1 Γενικά.....	59
4.1.2 Πλαίσιο υλοποίησης της διαδικασίας	59
4.1.3 Χάραξη διαδρομής : Η βάση για την μηχανική του αγωγού.....	60
4.1.4 Πρωτογενείς παράγοντες επιλογής	60
4.1.5 Επιλογή διαδρόμου στα βασικά στάδια του έργου	61
4.2 Δραστηριότητες χάραξης διαδρομής εντός των φάσεων υλοποίησης του έργου. 64	
4.2.1 Φάση πρώτη : Εναλλακτικές επιλογές «διαδρόμων» [FEL 1, Appraise].....	64
4.2.2 Φάση δεύτερη : Επιλογή «διαδρόμου» [FEL 2, Select]	64
4.2.3 Φάση τρίτη : Διερεύνηση διαδρομής και διαβούλευση [FEL 3, Define, Consulting]	65
4.2.4 Τελική φάση : Σχεδιασμός και έγκριση της τελικής διαδρομής του αγωγού [Project execution phase, detailed design]	67
4.3 Βασικές αρχές δρομολόγησης του αγωγού και οι παράγοντες επιρροής.....	67
4.4 Δημόσια ασφάλεια, περιεχόμενο αγωγού, συνθήκες λειτουργίας και κατηγορία θέσης.....	68
4.5 Υπέργειες εγκαταστάσεις αγωγών AGIs	69
4.6 Περιβαλλοντικά και κανονιστικά στάδια.....	69
4.7 Εδαφικές, υπόγειες, γεωτεχνικές και υδρογραφικές συνθήκες	71
4.8 Θεμελιώδη στοιχεία των αγωγών	72
4.9 Χάραξη διαδρομής αγωγού : Ένα περίπλοκο και πολύπλοκο πρόβλημα προς επίλυση	74
4.10 Χάραξη υπεράκτιου αγωγού	75
4.10.1 Παράγοντες επιρροής της επιλογής διαδρομής.....	75
4.10.2 Απαραίτητες μελέτες για χάραξη	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΩΝ	78
5.1 Εισαγωγή	78
5.2 Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα	78
5.2.1 Γενικά.....	78
5.2.2 Ροή Εργασιών σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.....	79
5.2.3 Μοντέλο δεδομένων	80
5.2.4 Αναπαράσταση των δεδομένων	80
5.2.5 Θεμελιώδεις έννοιες των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.....	84
5.3. Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2 και της εφαρμογής ArcMap. 86	

5.4 Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και διαδρομές αγωγών : Εφαρμογές.....	89
5.4.1 Μοντελοποίηση των προβλημάτων και χρησιμοποιούμενα εργαλεία.....	90
5.4.2 Βασικά χρησιμοποιούμενα εργαλεία.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ARCMAP	98
6.1 Εισαγωγή	98
6.2. 1 ^η Εφαρμογή : Ορισμός περιοχών πιθανής αστοχίας πρανών στον νομό Θεσπρωτίας	98
6.2.1 Γενικό πλαίσιο και περιοχή μελέτης	98
6.2.2 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων.....	99
6.2.3 Διαμόρφωση κριτηρίων	101
6.2.4 Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία.....	101
6.2.5 Αποτελέσματα μοντέλου.....	107
6.3 2 ^η Εφαρμογή : Χάραξη διαδρομής αγωγού σε χερσαίο έδαφος στον δήμο Πρέβεζας	109
6.3.1 Γενικό πλαίσιο και περιοχή μελέτης	109
6.3.2 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων.....	109
6.3.3 Διαμόρφωση κριτηρίων	111
6.3.4 Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία.....	112
6.3.5 Αποτελέσματα μοντέλου.....	118
6.4 3 ^η Εφαρμογή : Χάραξη διαδρομής υπεράκτιου αγωγού στην Αδριατική θάλασσα..	120
6.4.1 Γενικό πλαίσιο και περιοχή μελέτης	120
6.4.2 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων.....	120
6.4.3 Διαμόρφωση κριτηρίων	122
6.4.4 Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία.....	123
6.4.5 Αποτελέσματα μοντέλου.....	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	129
7.1. Συμπεράσματα και αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας	129
7.2 Μελλοντικές προεκτάσεις μεθοδολογίας και εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων.	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	132
Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά.....	132
Άρθρα σε πρακτικά συνεδρίων	132
Βιβλία	133
Ηλεκτρονικά Άρθρα.....	134

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1 : Είδη αγωγών : (α) στην επιφάνεια του εδάφους; (β) υπό της επιφάνειας; (γ) υποθαλάσσιος. (Πηγή: http://wiki.chemprime.chemeddl.org/ , 2015)	16
Εικόνα 1-2 : Αριστερά απεικονίζεται το δίκτυο αγωγών της Ευρώπης, όπως το αποτυπώνει το Pipeline Technology Journal, ενώ δεξιά ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης, όπως τον αποτυπώνει η European Seismological Commission. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία από : http://www.esc-web.org και http://www.pipeline-journal.net , 2015)...	18
Εικόνα 2-1: Προκαλούμενες παραμορφώσεις από : (a) P κύματα; (b) S κύματα. (Πηγή : Bolt, 1993).....	21
Εικόνα 2-2: Προκαλούμενες παραμορφώσεις από κύματα επιφανείας (a) Κύματα Rayleigh; (b) Κύματα Love. (Πηγή : Bolt, 1993)	22
Εικόνα 2-3: Δομή του εσωτερικού της Γης. (Πηγή : http://www.oasp.gr , 2015)	23
Εικόνα 2-4 : Μεταβολή της πυκνότητας και της ταχύτητας των S και P κυμάτων στο εσωτερικό της Γης. (Πηγή : Kramer, 1996).....	25
Εικόνα 2-5: : Αναπαράσταση των διαδρομών των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης από την εστία του σεισμού στα διαφορετικά επίπεδα της προαναφερθείσας δομής, δίνοντας βάρος στην διάθλαση και ανάκλαση τους. Παρατηρείται ότι μόνο τα σεισμικά κύματα P φτάνουν στην επιφάνεια της Γης μεταξύ 0° και 103° , λόγω της ρευστής φύσης του εξωτερικού πυρήνα που αποτρέπει τα S κύματα να κινηθούν στο εύρος 143° με 180° . Στην σκοτεινή ζώνη μεταξύ 103° και 143° , μόνο τα σεισμικά κύματα που ανακλώνται από τον εσωτερικό πυρήνα μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια. (Πηγή : Kramer, 1996).....	25
Εικόνα 2-6: Θεωρία του Wegener περί μετατόπισης των ηπείρων: (a) 270 εκατομμύρια έτη πριν; (b) 150 εκατομμύρια έτη πριν; (c) 1 εκατομμύριο έτη πριν. (Πηγή : Verney, 1979).....	26
Εικόνα 2-7: Αποτέλεσμα στατιστικής ανάλυσης σε σφαιρικά χωρικά δεδομένα των ηπείρων της Αμερικής, Αφρικής, Ευρώπης και Ασίας, χρησιμοποιώντας την κλίση των πλανών των υφαλοκρηπίδων, παρά τις ακτές. (Πηγή : Bullard κ.α, 1965)	27
Εικόνα 2-8: Οι κύριες τεκτονικές πλάκες, ωκεάνια ρήγματα, τάφροι και μετασχηματισμένα ρήγματα της Γης. Τα βελάκια υποδεικνύουν την κατεύθυνση της κίνησης των πλακών. (Πηγή : http://www.geogrify.net , 2011).....	28
Εικόνα 2-9: Παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα. Οι τελείες αναπαριστούν τα επίκεντρα σημαντικών σεισμών. Είναι προφανές ότι οι τοποθεσίες της σημαντικής πλειοψηφίας των	

σεισμών παρουσιάζονται στα όρια μεταξύ των πλακών. (Πηγή: www.nature.nps.gov/geology/monitoring , 2007)	29
Εικόνα 2-10: Η εσωτερική δομή της Γης και τα ρεύματα διάδοσης θερμότητας στον μανδύα. Κοντά στην κάτω επιφάνεια του φλοιού, οι οριζόντιες συνιστώσες των ρευμάτων προκαλούν διατμητικές τάσεις που μετακινούν τις πλάκες στην επιφάνεια της Γης. Η κίνηση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην απομάκρυνση ή σύγκλιση των πλακών μεταξύ τους. (Πηγή: http://www.sms-tsunami-warning.com , 2011)	29
Εικόνα 2-11: Όρια εξαπλωθείσας κορυφογραμμής. Το μάγμα αναδύεται στην επιφάνεια και ψύχεται στο κενό που δημιουργείται μεταξύ των αποκλινοσών πλακών. Επίσης, προβάλλονται μαγνητικές ανωμαλίες ως λωρίδες κανονικής και ανεστραμμένης μαγνητικής πολικότητας. (Πηγή: Foster, 1971).....	31
Εικόνα 2-12: Παράδειγμα ζώνης καταβύθισης, χωρίς κλίμακα. Αποτελεί την ζώνη καταβύθισης Cascadia, λίγο έξω από τις ακτές της Washington και του Oregon. Η πλάκα Juan de Fuca προέρχεται από την εξαπλωθείσα κορυφογραμμή Juan de Fuca και καταβυθίζεται κάτω από την Νοτιο-Αμερικάνικη πλάκα. Μάγμα αναδύεται από το βαθύτερο τμήμα της ζώνης σχηματίζοντας ένα ηφαιστειακό τόξο το οποίο είναι σχεδόν παράλληλο της ζώνης και βρίσκεται πάνω στην αναδυόμενη πλάκα. (Πηγή: Noson et. al, 1988).....	32
Εικόνα 2-13: (α) Πλάγια όψη; (β) κάτοψη του ρήγματος μετασχηματισμού και των γειτονικών ανενεργών ζωνών διάρρηξης. (Πηγή: Kramer, 1996).....	33
Εικόνα 2-14: Συσχετίσεις μεταξύ των τριών ειδών των ορίων : εξαπλωθείσες κορυφογραμμές, ζώνες καταβύθισης και ρήγματα μετασχηματισμού. (Πηγή: Kramer, 1996)	34
Εικόνα 2-15: (α) Δίκτυο γραμμών καταμέτρησης κατά μήκος των ρηγμάτων San Andreas και Cavaliers; (β) αλλαγή στο μήκος των γραμμών. (Πηγή: Bolt, 1993)	35
Εικόνα 2-16: Θεωρία ελαστικότητας για σεισμούς. Στην (α) η αργή παραμόρφωση του βράχου στην περιοχή εγγύτητας ενός ορίου της πλάκας οδηγεί στην συσσώρευση ελαστικής ενέργειας εντός του βράχου, με τον ίδιο τρόπο που η ίδια ενέργεια συσσωρεύεται σε ένα εύπλαστο ραβδί που παραμορφώνεται, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της εικόνας ; (β) Αν ξεπεραστεί η αντοχή του βράχου, εκείνος θα σπάσει, εκλύοντας ελαστική ενέργεια στη μορφή δονήσεων, όπως θα γινόταν και στην περίπτωση ενός εύθραυστου ραβδιού, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της εικόνας. (Πηγή: Kramer, 1996).....	36
Εικόνα 2-17: Σχηματική αναπαράσταση των κατευθυντικών επιπτώσεων στις εδαφικές κινήσεις στις τοποθεσίες προς (δεξιά) και από (αριστερά) από την κατεύθυνση του	

ρήγματος μετασχηματισμού. Η υπέρθεση παλμών, όπως φαίνεται δεξιά, μπορεί να οδηγήσει σε ισχυρούς παλμούς εκτίναξης (fling pulses) στις τοποθεσίες πλησίον του ρήγματος. (Πηγή: Singh, 1985).....	37
Εικόνα 2-18: Τομή ενός τμήματος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα από βόρεια του San Francisco μέχρι νότια του Parkfield: (α) σεισμικότητα των 20 ετών πριν τον σεισμό Loma Prieta του 1989, επισημαίνοντας το σεισμικό κενό Loma Prieta; (β) ο κύριος σεισμός και οι μετασεισμοί του 1989. (Πηγή: Housner et al., 1990)	38
Εικόνα 2-19: Γεωμετρική θεώρηση της τοποθεσίας του σεισμού, για τις ανάγκες της παραπάνω περιγραφής. (Πηγή: Kramer, 1996).....	40
Εικόνα 3-1: Υπολογισθέντα χρονικά ιστορικά στα σημεία $x=50$ m και $x=250$ m στην περίπτωση διέγερσης του παλμού Ricker με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA = 0,2g$. Επισημαίνεται ότι η επιτάχυνση στο ελεύθερο πεδίο ($=0,29g$) έχει ενισχυθεί στο άκρο του φαραγγιού ($=0,37g$). (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)	46
Εικόνα 3-2: Κατανομή της κανονικοποιημένης "παρασιτικής" εγκάρσιας επιφανειακής επιτάχυνσης και η κανονικοποιημένη οριζόντια συνιστώσα της επιφανειακής επιτάχυνσης στην περίπτωση διέγερσης παλμού Ricker. (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)	47
Εικόνα 3-3: Διάγραμμα πιθανοτήτων όπως προέκυψε από τους Youngs et al., όπου στον άξονα Y βρίσκεται η πιθανότητα εμφάνισης ρήγματος και στον άξονα X το σεισμικό μέγεθος Ms. (Πηγή: Youngs et al., 2003).....	48
Εικόνα 3-4: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων ρηγμάτων. (Πηγή: http://media-2.web.britannica.com , 2004)	49
Εικόνα 3-5: Αριστερά σχηματική αναπαράσταση της παραμόρφωσης του αγωγού, όταν εκτίθεται σε ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης και δεξιά πείραμα προσομοίωσης των συνθηκών. (Πηγή: Ίδια επεξεργασία από : Nyman (2008) και O'Rourke & Liu (2012)).	49
Εικόνα 3-6: Πλευρική εξάπλωση. Αριστερά σχηματική αναπαράσταση ολίσθησης εδαφικής ζώνης πάνω από ζώνη ρευστοποιημένου ιζήματος και δεξιά μία πραγματική περίπτωση από περιοχή του Καναδά. (Πηγή: Nyman, 2008)	51
Εικόνα 3-7: Αριστερά σχηματική αναπαράσταση άσκησης τάσεων στον αγωγό από εδαφική ροή και δεξιά θραύση αγωγού στο Εκουαδόρ, λόγω αυτού του φαινομένου. (Πηγή: Ίδια Επεξεργασία από: Nyman (2008) και American Geophysical Union (2009)).....	53
Εικόνα 3-8: Είδη κατολισθήσεων. (Α) Πτώσεις; (Β) Ανατροπές; (Γ) Περιστροφικές ολισθήσεις; (Δ) Μεταφορικές ολισθήσεις; (Ε) Εξαπλώσεις; (ΣΤ) Ροές. (Πηγή: http://earthquake.usgs.gov , 2015).....	54

Εικόνα 4-1: Οικονομικοί, μηχανικοί, βιοφυσικοί και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες επιρροής της επιλογής και αξιολόγησης της διαδρομής του αγωγού (Πηγή : Rizkalla, 2008)	61
Εικόνα 4-2: Ελαττώνοντας το πλάτος του "διαδρόμου" του αγωγού κατά τα στάδια του έργου (Πηγή : www.wiki.iploca.com , 2015)	62
Εικόνα 4-3: Βασικά περιβαλλοντικά και κανονιστικά βήματα κατά την διαδικασία της δρομολόγησης (Πηγή : www.wiki.iploca.com , 2015)	69
Εικόνα 4-4: Σχηματικές αναπαραστάσεις των αρθρώσεων συνεχών αγωγών : (α) Αυλακώδους περιφερειακής συγκόλλησης; (β) αυχενικής συγκόλλησης (γ) βιδωμένης φλάντζας (δ) πλευρικά συγχωνευμένη άρθρωση. (Πηγή: www.wermac.org , 2015)	73
Εικόνα 4-5: Σχηματικές αναπαραστάσεις και φωτογραφία των διατομών στο σημείο τοποθέτησης των αρθρώσεων τμηματικών γραμμών αγωγών. (α) άρθρωση σφραγισμένη με μόλυβδο; (β) άρθρωση με πιεστικά περιβλήματα από καουτσούκ; (γ) άρθρωση με περιβλήματα καουτσούκ, τα οποία έχουν καλυφθεί από τσιμεντοκονίαμα. (Πηγή: Προσωπικό αρχείο, 2015)	74
Εικόνα 5-1: Σχηματικές αναπαραστάσεις τριών βασικών τμημάτων ενός Γ.Π.Σ. : Του υλικού και του εξοπλισμού για συλλογή και προβολή της πληροφορίας, του λογισμικού και των μεθόδων για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων και της απόδοσης των τελικών προϊόντων. (Πηγή: http://xsomaras.somweb.gr/ , 2013)	79
Εικόνα 5-2: Εμφανής η διαφορά της αναπαράστασης των πραγματικών αντικειμένων κατά την διανυσματική (vector) και ψηφιδωτή (raster) αναπαράσταση αντίστοιχα. (Πηγή: www.geography.hunter.cuny.edu , 2015)	81
Εικόνα 5-3: Το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων αναπαριστά οντότητες του πραγματικού κόσμου ως σημεία, γραμμές και πολύγωνα, τα όρια των οποίων καθορίζονται από ζεύγη συντεταγμένων (x,y). (Πηγή: www.geography.hunter.cuny.edu , 2015)	82
Εικόνα 5-4: Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται η διάταξη κελιών των ψηφιδωτών δεδομένων, ενώ δεξιά η ανάθεση υψομετρικών τιμών σε κάθε κελί. (Πηγή: www.webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2 , 2008)	83
Εικόνα 5-5: Παράδειγμα υπέρθεσης θεματικών επιπέδων, με στόχο μία ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού κόσμου. (Πηγή: http://gis.sbccounty.gov , 2012)	86
Εικόνα 5-6: Το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου ArcCatalog, από το οποίο μπορεί ο χρήστης να οργανώσει και να διαχειριστεί τον όγκο πληροφορίας, με εμφανή την «δενδρική προβολή» στα αριστερά και τον πίνακα περιεχομένων της κάθε επεξεργαζόμενης οντότητας στα δεξιά. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	87

Εικόνα 5-7: Παράθυρο διαλόγου ArcMap v.10.2.2 όπου καθίσταται εμφανής η σύνδεση της εφαρμογής με τις προαναφερθείσες εφαρμογές ArcCatalog (δεξιά) και ArcToolbox (αριστερά). Επισημαίνεται ότι η εφαρμογή ModelBuilder περιέχεται στην ArcToolbox. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	89
Εικόνα 5-8: Στάδια από αριστερά προς τα δεξιά: (1) Ανάθεση τιμών στο ψηφιδωτό της επιφάνειας προέλευσης, η οποία συμβολίζεται με την τιμή 1, και του σημείου προορισμού, που συμβολίζεται με την τιμή 2. (2) Υπέρθωση αυτού του ψηφιδωτού με το ψηφιδωτό κόστους που έχει προκύψει από άλλο εργαλείο του προγράμματος (3) Τελικό ψηφιδωτό, το οποίο περιέχει τιμές συσσωρευτικού κόστους ανά κελί, όπου υπάρχει πληροφορία. (Πηγή: www.webhelp.esri.com , 2011)	91
Εικόνα 5-9: Οι διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού του συσσωρευτικού κόστους και οι αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού. (Πηγή: www.help.arcgis.com , 2011)	92
Εικόνα 5-10: Ο καθορισμός της μέγιστης ή "πραγματικής" ευκλείδειας απόστασης. (Πηγή: www.resources.arcgis.com , 2014)	93
Εικόνα 5-11: Σχηματική απεικόνιση συνύπαρξης 6 πολυγώνων εντός ενός κελιού, με πρωτεύων πεδίο τον αύξοντα αριθμό τους. Δίπλα από το κελί απεικονίζεται το αποτέλεσμα της μετατροπής σε ψηφιδωτή μορφή με τις τρεις μεθόδους ανάθεσης τιμών. (Πηγή: www.help.arcgis.com , 2011).....	94
Εικόνα 5-12: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων εξομάλυνσης, στην ίδια πολυγωνική γραμμή. Παρατηρώντας το τελικό αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος ΡΑΕΚ, παρόλο που μετακινεί τις κορυφές της πολυγωνικής γραμμής, προσεγγίζει καλύτερα το αρχικό σχήμα. (Πηγή: www.webhelp.esri.com , 2012)	95
Εικόνα 5-13: Αναπαράσταση της λογικής διαδικασίας που ακολουθεί το εργαλείο Union. Οι τρεις, αρχικά διαφορετικές, πολυγωνικές οντότητες ενώνονται μεταξύ τους, λαμβάνοντας και τις τιμές των αντίστοιχων συμμετεχόντων πολυγώνων. Για παράδειγμα, η τομή των δύο κύκλων στο output λαμβάνει τις τρεις τιμές : του παραλληλογράμμου και των δύο κύκλων. (Πηγή: www.resources.arcgis.com , 2013)	97
Εικόνα 6-1: Θέση του νομού Θεσπρωτίας στον Ελλαδικό χώρο και το πολύγωνο της περιοχής μελέτης, εντός των διοικητικών του ορίων. (Πηγή: Google Earth, 2015)	98
Εικόνα 6-2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους, χωρίς κλίμακα, του πολυγώνου της περιοχής μελέτης, όπως δημιουργήθηκε με την εντολή Topo to Raster. Οι διαφορετικοί τόνοι της κλίμακας μαύρο – λευκό υποδηλώνουν τις διαφορετικές τιμές υψομέτρου, όπως φαίνεται στο υπόμνημα. Οι αρνητικές τιμές προκύπτουν ως σημεία είτε χαμηλότερου υψομέτρου	

από την στάθμη της θάλασσας είτε ως μικρές περιοχές έλλειψης πλήρους υψομετρικής πληροφορίας. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	100
Εικόνα 6-3: Εδαφικές κατηγορίες εντός της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	100
Εικόνα 6-4 : Χάρτης απεικόνισης μέσω κλίσεων εδάφους της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	102
Εικόνα 6-5 : Πολύγωνα που περιέχουν την πληροφορία μέσης κλίσης εδάφους. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	102
Εικόνα 6-6 : Γραμμές κώδικα Visual Basic για την πλήρωση του πεδίου "Μέση κλίση εδάφους". Αρχικά δηλώνεται η μεταβλητή ψ με την έκφραση dim και έπειτα εφαρμόζεται μία συνάρτηση if για την πλήρωση του πεδίου ανάλογα με τον αύξοντα αριθμό της κλάσης gridcode. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	103
Εικόνα 6-7: Το εφαρμοζόμενο μοντέλο σε μορφή διαγράμματος ροής εργασιών. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	106
Εικόνα 6-8: Απεικόνιση του θεματικού επιπέδου ψηφιδωτής μορφής του στατικού συντελεστή ασφαλείας, χωρίς κλίμακα. Οι περιοχές με τιμές F.S. μικρότερες του 1 απεικονίζονται με την σκούρη απόχρωση του κόκκινου ενώ οι περιοχές με τιμές μεταξύ των 1 και 1,4 με την λίγο πιο ανοιχτή απόχρωση κόκκινου. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015). 107	
Εικόνα 6-9: Απεικόνιση του θεματικού επιπέδου ψηφιδωτής μορφής της κρίσιμης επιτάχυνσης, χωρίς κλίμακα. Οι περιοχές με τιμές κρίσιμης επιτάχυνσης μικρότερες της μέσης σεισμικής (0,24g) απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και αντιπροσωπεύουν τις δυνητικά επικίνδυνες περιοχές υπό σεισμικές συνθήκες. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	108
Εικόνα 6-10: Η θέση της περιοχής μελέτης του τμήματος του δήμου Πρέβεζας, όπως ορίζεται στον ελλαδικό χώρο. (Πηγή: Google Earth, 2015)	109
Εικόνα 6-11: Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο ευρύτερης περιοχής της Πρέβεζας. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	110
Εικόνα 6-12: Χάρτες : Εδαφικών κατηγοριών Δήμου Πρέβεζας, ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης και στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	111
Εικόνα 6-13: Το σταθμισμένο άθροισμα της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του σημείου πέρατος. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	113
Εικόνα 6-14: Περιοχές πιθανής ρευστοποίησης εδάφους, με λιγότερο επικίνδυνες τις πράσινες περιοχές και περισσότερο τις κόκκινες. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	114

Εικόνα 6-15: Η επιφάνεια κόστους ως αποτέλεσμα της σταθμισμένης υπέρθεσης όλων των κριτηρίων. Βασίζεται σε μία αυθαίρετη ποιοτική κλίμακα κόστους. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	115
Εικόνα 6-16: Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ της πολυγωνικής γραμμής της χάραξης και της εξομαλυμένης μορφής της. Χωρίς κλίμακα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	116
Εικόνα 6-17: Διαγραμματική αναπαράσταση του μοντέλου εξαγωγής της τελικής διαδρομής του αγωγού στην περιοχή μελέτης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	117
Εικόνα 6-18: Απεικόνιση των τεσσάρων διαφορετικών διαδρομών αγωγού μεταξύ των επιλεχθέντων σημείων εκκίνησης και πέρατος. Η διαφορά έγκειται στην διαφορετική στάθμιση των κριτηρίων. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	119
Εικόνα 6-19: Περιοχή μελέτης στο νότιο τμήμα της Αδριατικής Θάλασσας, μεταξύ Ιταλίας και Αλβανίας. (Πηγή: Google Earth, 2015).....	120
Εικόνα 6-20: Ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο της Αδριατικής θάλασσας. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	121
Εικόνα 6-21 : Δεδομένα εφαρμογής : Μέση επιφανειακή συγκέντρωση ιζημάτων, ζώνες επιτάχυνσης, ρήγματα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	122
Εικόνα 6-22: Περιοχές πιθανής ρευστοποίησης πυθμένα (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)	124
Εικόνα 6-23 : Ψηφιδωτό κόστους απόστασης από σημείο εκκίνησης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	125
Εικόνα 6-24: Το μοντέλο ροής εργασιών της διαδικασίας χάραξης της εξομαλυμένης γραμμής του αγωγού. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	127
Εικόνα 6-25: Οι τρεις εναλλακτικές χαράξεις της διαδρομής του υποθαλάσσιου αγωγού, όπως αναλύθηκαν προηγουμένως. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015).....	128

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των αγωγών μεταφοράς ενεργειακών υλών εντοπίζεται για πρώτη φορά λίγο μετά την πρώτη εξόρυξη πετρελαίου το 1859. Με το πέρασμα των δεκαετιών, οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη αυξήθηκαν ραγδαία και δυσανάλογα με τον πληθυσμό του, καθιστώντας την διακίνηση και διαχείριση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων ένα σημαντικό παγκόσμιο ζήτημα. Η τριβή των σχετικών επιστημόνων με τα συσχετιζόμενα, με το πρόβλημα, φαινόμενα οδήγησε στην όλο και πληρέστερη θεώρηση του και στον καθορισμό του περίπλοκου χαρακτήρα του, ο οποίος δομείται κυρίως από κοινωνικές, διοικητικές, οικονομικές, και χωρικές συνιστώσες. Επιπρόσθετα, για να ανταπεξέλθει στις αυξημένες παγκόσμιες απαιτήσεις, η επιστημονική κοινότητα ανέπτυξε την απαραίτητη τεχνολογία για την υποστήριξη αποφάσεων σχετικά με την διαδικασία επίλυσης του. Παρ'όλη, όμως, τη αυξημένη ευαισθητοποίηση, η συμπερίληψη των σεισμικών φαινομένων ως κριτήρια στην διαδικασία απέχει πολύ από το να κριθεί επιτυχημένη. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται, λοιπόν, ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων σε περιβάλλον γεωγραφικού πληροφοριακού συστήματος, με κύριο στόχο την διερεύνηση της χρησιμότητας των Γ.Π.Σ. στον καθορισμό των χωρικών συνιστωσών ενός αγωγού μεταφοράς ενεργειακών υλών μεγάλου μήκους και την τελική του χάραξη, στην χερσαία αλλά και υποθαλάσσια περίπτωση. Οι χωρικές συνιστώσες στις οποίες εστιάζει αποτελούν οι περιοχές πιθανής εμφάνισης γεωκινδύνων υπό σεισμικές, κυρίως, συνθήκες.

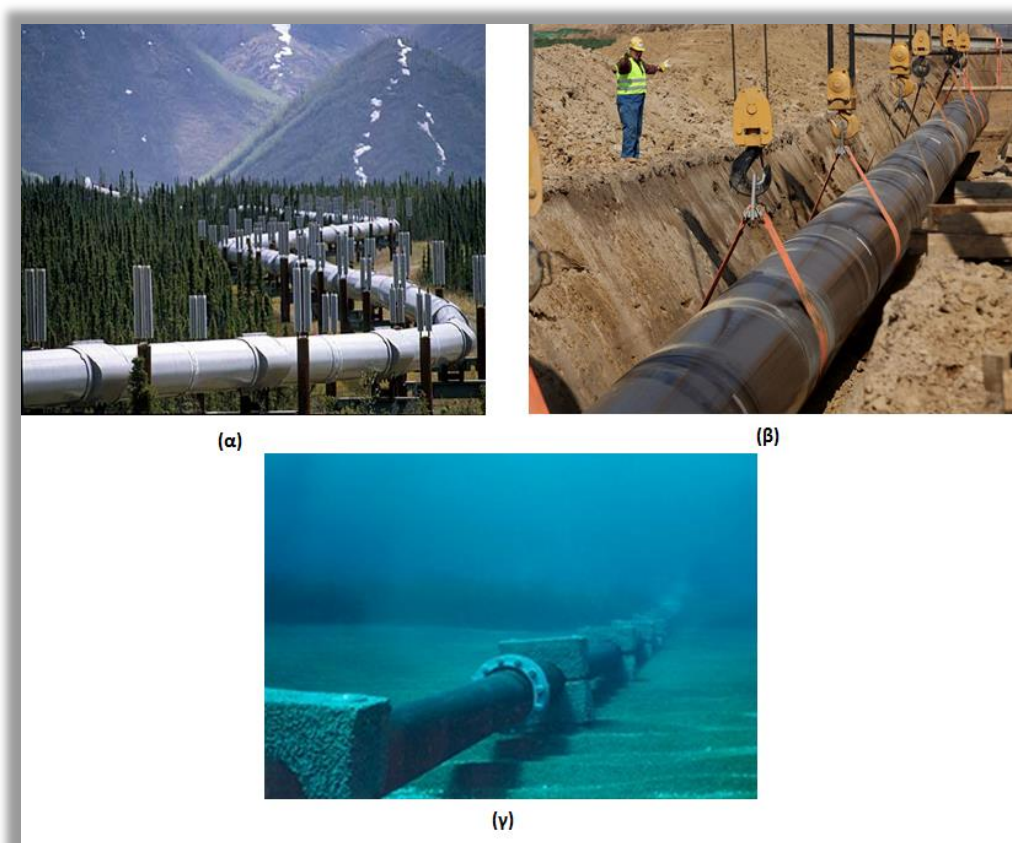
ABSTRACT

The use of pipelines in energy materials distribution was identified for the first time shortly after the first oil extraction in 1859. Over the decades, the planet's energy needs increased rapidly and disproportionately to the population, making the handling and management of available energy resources an important global issue. The scientists' involvement with the events associated with the problem, led to a more and more complete view of its complexity, which is constructed mainly of social, administrative, economic and spatial components. In addition, to cope with the increased global demands, the scientific community has developed the necessary technology to support decisions about the resolution process. Despite all, however, the increased awareness, the inclusion of seismic phenomena as criteria in the process is far from being judged successful and clearly defined. This study presents, therefore, a decision support tool developed in an geographical information system's environment, with the main objective to investigate the utility of GIS in determining the territorial components of a pipeline feature of great length and its final route, at onshore and offshore case. The spatial components which are focused upon are the areas of possible occurrence of geohazards, at mainly seismic conditions.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΘΕΜΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΘΕΣΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή στο θέμα

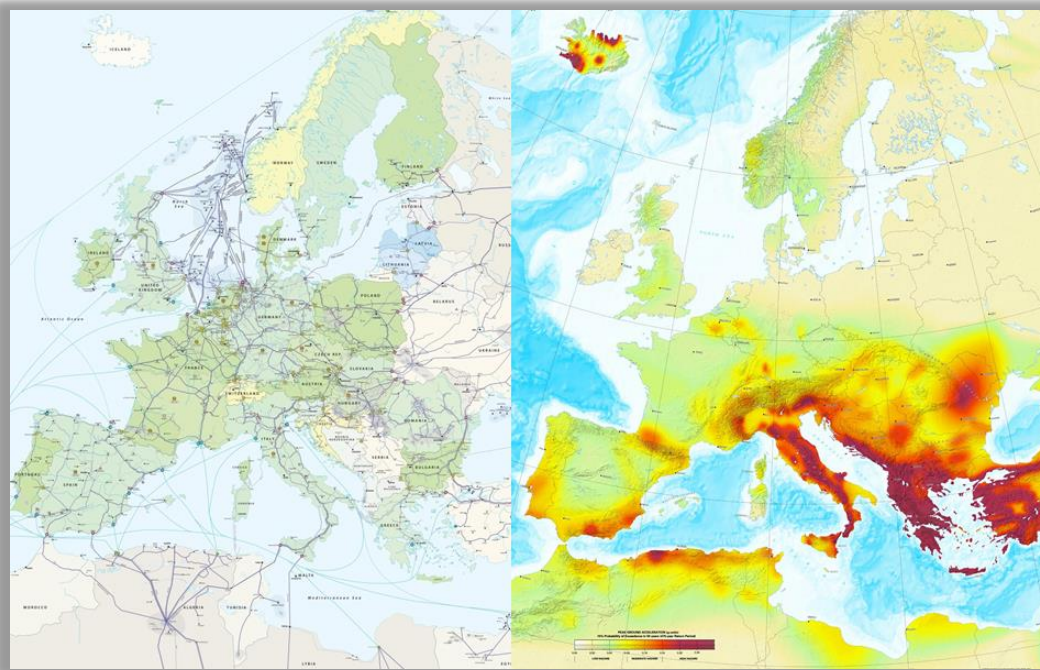
Οι αγωγοί μεγάλου μήκους κατέχουν σήμερα έναν σημαντικό ρόλο στην μεταφορά και διανομή διαφόρων κατηγοριών υλικών. Στα πιο αξιόπιστα στοιχεία, έτους 2014, συνολικά καταγράφονται ελαφρώς λιγότερα από 3,5 εκατομμύρια χιλιόμετρα αγωγών υπό λειτουργία, διασκορπισμένα σε 120 χώρες του κόσμου (https://en.wikipedia.org/wiki/Pipeline_transport, 2015), με την συντριπτική πλειοψηφία του παγκόσμιου αριθμού των αγωγών (75%), ωστόσο, να συγκεντρώνουν τρεις χώρες : οι Ηνωμένες Πολιτείες (65%), η Ρωσία (8%) και ο Καναδάς (3%). Επίσης, η παγκόσμια έρευνα της PGJ (Pipeline Gas Journal), έτους 2015, υποδεικνύει ότι 161.118 χιλιόμετρα γραμμών αγωγών βρίσκονται ακόμη υπό σχεδιασμό ή κατασκευή, από τα οποία τα 92.056 χιλιόμετρα βρίσκονται στην φάση σχεδιασμού και τα εναπομείναντα 69.062 χιλιόμετρα αντιπροσωπεύουν αγωγούς σε διαφορετικές φάσεις της κατασκευής.



Εικόνα 1-1 : Είδη αγωγών : (α) στην επιφάνεια του εδάφους; (β) υπό της επιφάνειας; (γ) υποθαλάσσιος. (Πηγή: <http://wiki.chemprime.chemeddl.org/>, 2015)

Η μεταφορά των επιθυμητών υλικών αποτελεί τον λόγο υλοποίησης των αγωγών ως κατασκευές. Τα μεταφερόμενα υλικά μπορεί να είναι υγρά ή αέρια, υπό την προϋπόθεση ότι αποτελούν χημικά σταθερές ουσίες. Τα σημαντικότερα παραδείγματα μεταφερόμενων υλικών είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα βιοκαύσιμα (ενεργειακές ύλες), ενώ δευτερευόντως άλλα υγρά συμπεριλαμβανομένων των λυμάτων και του νερού. Λόγω, όμως, του ότι η πλειοψηφία αυτών των υλικών είναι δυνητικά εύφλεκτες ή/και εκρηκτικές ύλες (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο), τίθενται ειδικά θέματα ασφαλείας τα οποία και επιβεβαιώνει η ύπαρξη διαφόρων ατυχημάτων, με πιο πρόσφατο και σημαντικό αυτό της έκρηξης σε αγωγό φυσικού αερίου της πετρελαϊκής εταιρείας Petronas πλησίον της πόλης Lawas της Μαλαισίας, που συνέβη τον Ιούνιο του 2014. Η έκρηξη δεν οδήγησε σε απώλειες ανθρώπινων ζωών, λόγω μεγάλης απόστασης από και έγκαιρης εκκένωσης των πλησιέστερων οικισμών, αλλά είχε σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο στην περιοχή.

Τέτοιου είδους επιβλαβείς συμπεριφορές του αγωγού παρατηρούνται σε σημεία όπου υπάρχει παρέμβαση από τρίτους ή σε σημεία που ο αγωγός έχει υποστεί ρήξη. Κατασκευαστική αστοχία παρουσιάζεται επί το πλείστον σε περιοχές ενδεχόμενης παρουσίας γεωκινδύνων, όπως τα ρήγματα, οι κατολισθήσεις και οι ρευστοποιήσιμου εδάφους τοποθεσίες. Λόγω αυξημένης ευαισθητοποίησης της επιστημονικής κοινότητας ως προς αυτό το θέμα, έχει αρχίσει να αναζητείται μία σαφής και, όσο δύναται, ορθή προσέγγιση για να συμπεριλαμβάνονται οι προαναφερθείσες περιοχές, η οποία όμως βρίσκεται ακόμη στα σπάργανα. Ουσιαστικά, σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχουν επιστήμονες με βαθειά γνώση αναφορικά με τον προσδιορισμό γεωκινδύνων (π.χ. Έλληνες, Ιταλοί, Ιάπωνες) και μηχανικοί με εμπειρία στον προσδιορισμό μίας χάραξης καλής ποιότητας ως προς τα βασικά κριτήρια (π.χ. Νορβηγοί), ωστόσο δεν έχει ακόμη επιτευχθεί η γεφύρωση αυτών των γνώσεων με στόχο την αποφυγή των γεωκινδύνων κατά την χάραξη του αγωγού. Στην Εικόνα 1-2 διαφαίνεται η έντονη παρουσία αγωγών στην Βόρεια Ευρώπη, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλό επίπεδο σεισμικότητας, και απουσία στην Νότια Ευρώπη, που αποτελεί περιοχή υψηλού σεισμικού κινδύνου.



Εικόνα 1-2 : Αριστερά απεικονίζεται το δίκτυο αγωγών της Ευρώπης, όπως το αποτυπώνει το Pipeline Technology Journal, ενώ δεξιά ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Ευρώπης, όπως τον αποτυπώνει η European Seismological Commission. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία από : <http://www.esc-web.org> και <http://www.pipeline-journal.net>, 2015)

Είναι προφανές, λοιπόν, η σημασία κατασκευής των αγωγών σε παγκόσμιο επίπεδο και η τήρηση της απαραίτητης προσοχής όσον αφορά την επίβλεψη και συντήρησή τους. Η διαδικασία, όμως, βελτιστοποίησης της χάραξης του αγωγού μπορεί να οδηγήσει στην αποφυγή του μεγαλύτερου μέρους αυτών των κινδύνων. Η καινοτομία της παρούσας εργασίας, λοιπόν, έγκειται στο ότι αναπτύσσεται ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων κατά την χάραξη ενός αγωγού, προσθέτοντας στα βασικά κριτήρια της χάραξης και την αποφυγή περιοχών που εγκυμονούν γεωκινδύνους.

1.2 Στόχοι εργασίας

Η κινητήριος δύναμη κάθε εργασίας αποτελεί η επίτευξη στόχων, υποβοηθώντας και την αποτίμηση των τελικών αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία, βασικός στόχος αποτελεί η ανάπτυξη ενός εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων κατά την χάραξη αγωγού μεγάλου μήκους. Ο βασικός αυτός στόχος, συγκεκριμενοποιείται και εκφράζεται μέσα από τους εξής υποστόχους :

- Ορισμός βασικών γεωκινδύνων, με έμφαση στις σεισμικές συνθήκες
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης των περιοχών των γεωκινδύνων
- Ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση κινδύνου
- Βελτιστοποίηση επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων
- Επιτάχυνση διαδικασίας λήψης αποφάσεων

1.3 Δομή εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, παρουσιάστηκαν αρχικά βασικές έννοιες και αρχές που αφορούν τις μετέπειτα διαδικασίες. Ακολούθησε η παρουσίαση του ανεπτυγμένου εργαλείου, καθώς και τρεις εφαρμογές, οι οποίες εκτελέστηκαν μέσω αυτού και βασίστηκαν στην ανάπτυξη πολυκριτηριακών αναλύσεων. Τέλος, παρουσιάστηκε η αποτίμηση του αποτελέσματος, όπως προέκυψε από τον παρών μηχανικό, και προτάθηκαν σημεία βελτιώσεων και προεκτάσεων της παρούσας μορφής του αναπτυγμένου εργαλείου. Ειδικότερα, τα κεφάλαια διαμορφώθηκαν ως εξής :

- Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται το θέμα της εργασίας, αποσαφηνίζεται η στοχοθεσία της και διευκρινίζεται η δομή της.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές αρχές της σεισμολογίας, που βοηθούν την πλήρη κατανόηση του θέματος και αποτελούν θεμελιώδεις έννοιες για τις μετέπειτα χρησιμοποιούμενες διαδικασίες.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά είδη γεωκινδύνων, δίνοντας έμφαση στις σεισμικές συνθήκες και σε χερσαίο έδαφος.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές αρχές και φάσεις της διαδικασίας χάραξης και υλοποίησης ενός αγωγού μεγάλου μήκους.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το χρησιμοποιούμενο λογισμικό ArcMap, μέσω του οποίου αναπτύσσεται το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων.
- Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τρεις εφαρμογές που εκτελέστηκαν στο προηγούμενος δημιουργηθέν εργαλείο, κατά την διάρκεια της εργασίας.
- Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μία αποτίμηση της εργασίας, διατυπώνοντας συμπεράσματα, περιορισμούς και προεκτάσεις του αναπτυχθέντος εργαλείου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Με στόχο την καλύτερη κατανόηση των γεωκινδύνων που σχετίζονται με το φαινόμενο του σεισμού και των συνιστωσών τους, οφείλεται να παρουσιαστούν και να κατανοηθούν, πριν το κεφάλαιο του ορισμού τους, διάφορες βασικές έννοιες και διαδικασίες με τις οποίες λαμβάνουν χώρα οι σεισμοί και οι επιπτώσεις τους στην εδαφική κίνηση.

2.2 Βασικές έννοιες

Ο σεισμός είναι μία δόνηση του εδάφους, που προκαλείται από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, τα οποία διαδίδονται μέσω των πετρωμάτων και πηγή τους αποτελεί η εστία του σεισμού ή εναλλακτικά : «Ο σεισμός αποτελεί μία έκκλιση ενέργειας που έχει συσσωρευτεί στα πετρώματα με την μορφή της ‘ελαστικής ενέργειας’» (Σακελλαρίου, 2008). Αποτελεί αντικείμενο της επιστήμης της σεισμολογίας, η οποία έχει συμβάλει στην καταγραφή και θεωρητική ανάλυση του φαινομένου με στόχο την ελάττωση του αριθμού των επιπτώσεων του.

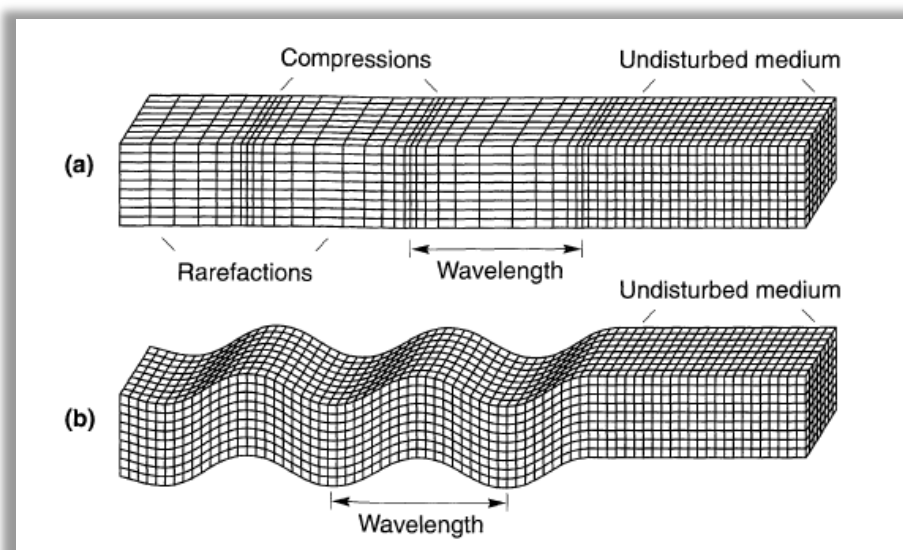
2.2.1 Δομή του εσωτερικού της Γης

Μεταξύ των προαναφερθέντων, η σεισμολογία αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στον προσδιορισμό της δομής του εσωτερικού της Γης. Η Γη, προσεγγιστικά, μπορεί να θεωρηθεί σφαιρική με διάμετρο ισημερινού περίπου 12.740 χιλιομέτρων και πολική διάμετρο 12.700 χιλιομέτρων. Η μεγαλύτερη διάμετρος του ισημερινού οφείλεται στις υψηλότερες ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά μήκος του ισημερινού, λόγω περιστροφής της Γης. Η Γη ζυγίζει περίπου $5,4 \times 10^{21}$ τόνους, ορίζοντας ως μέση τιμή του ειδικού βάρους στο 5,5. Εφόσον είναι γνωστό ότι το ειδικό βάρος των επιφανειακών βράχων είναι από 2,7 - 3 , είναι αυτονόητο ότι το ειδικό βάρος αυξάνεται σε μεγαλύτερα βάθη (Kramer, 1996).

Σεισμοί μεγάλου μεγέθους παράγουν αρκετή ενέργεια με αποτέλεσμα να προκαλούν μετρήσιμες μετακινήσεις σε σημεία σε όλο τον κόσμο. Τα διαφορετικά είδη κυμάτων ταξιδεύουν σε όλη τη Γη, διαθλώνται και ανακλώνται στα όρια διαφορετικών επιπέδων, φτάνοντας σε διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια της Γης μέσω διαφορετικών διαδρομών. Μελέτες αυτών των συμπεριφορών στα μέσα και τέλη του 20^{ου} αιώνα όπως αυτές των Gutenberg & Richter (1954), Richter (1958), Bullen (1975), Bath (1979), Bullen & Bolt (1985), Gubbins (1990), Bolt (1993), Lay & Wallace (1995) αποκάλυψαν την δομή επιπέδων της Γης και προσέφεραν τη γνώση των χαρακτηριστικών αυτής της δομής.

2.2.1.1 Σεισμικά κύματα

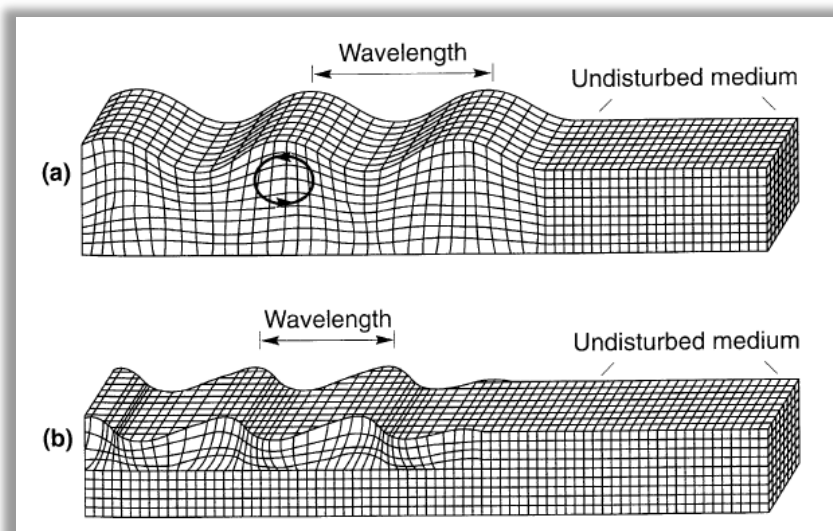
Όταν συμβαίνει ένας σεισμός, τα είδη κυμάτων που παράγονται είναι δύο : κύματα χώρου (body waves) και επιφανειακά κύματα (surface waves) (Σακελλαρίου, 2008). Τα κύματα χώρου, τα οποία μπορούν να διαδοθούν στο εσωτερικό της Γης, διακρίνονται σε διαμήκη κύματα P και εγκάρσια κύματα S (Εικόνα 2-1). Τα διαμήκη κύματα, γνωστά και ως πρωτεύοντα, προκαλούν ταλαντώσεις κατά την διεύθυνση της διάδοσης με αποτέλεσμα την αλλαγή πύκνωσης και αραιώσης στο μέσο διάδοσης, το οποίο μπορεί να είναι στερεό ή υγρό. Αποτελούν τα πρώτα κύματα που φτάνουν σε ένα σημείο, καθώς η ταχύτητα διάδοσης τους είναι η μεγαλύτερη, λόγω της αντοχής των γεωλογικών υλικών στην συμπίεση. Τα εγκάρσια κύματα, γνωστά και ως δευτερεύοντα, προκαλούν ταλαντώσεις, στην εγκάρσια προς την διάδοση διεύθυνση (διατμητικές παραμορφώσεις), και φθάνουν μετά από τα διαμήκη. Επιπρόσθετα, τα κύματα S δεν διαδίδονται σε υγρά σώματα, αφού δεν παρουσιάζουν διατμητική αντοχή. Η διαφορά άφιξης εξαρτάται από την απόσταση που διανύουν τα κύματα και βάσει αυτής προσδιορίζεται η απόσταση γένεσης ενός σεισμού ως προς κάποια θέση (Kramer, 1996).



Εικόνα 2-1: Προκαλούμενες παραμορφώσεις από : (a) P κύματα; (b) S κύματα. (Πηγή : Bolt, 1993)

Τα κύματα επιφανείας (surface waves) είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυμάτων χώρου (body waves) και των επιφανειακών στρωμάτων της Γης. Ταξιδεύουν κατά μήκος της επιφάνειας της Γης, με μήκη κύματος τα οποία ελαττώνονται, προσεγγιστικά, εκθετικά ανάλογα με το βάθος (Εικόνα 2-2). Λόγω της φύσης των αλληλεπιδράσεων που τα δημιουργούν, τα επιφανειακά κύματα είναι πιο ισχυρά σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την εστία του σεισμού. Ειδικότερα, σε αποστάσεις σε αποστάσεις μεγαλύτερες από το διπλάσιο του πάχους του φλοιού της Γης, το είδος κύματος που προκαλεί τις υψηλότερες μετακινήσεις εδάφους (peak ground motions) είναι το επιφανειακό. Τα σημαντικότερα είδη επιφανειακών κυμάτων, όσο αφορά την μηχανική, αποτελούν τα κύματα Love και τα κύματα Rayleigh. Τα κύματα Rayleigh παράγονται από την αλληλεπίδραση των διαμήκων P

κυμάτων και των κάθετων εγκάρσιων κυμάτων SV (είδος των S κυμάτων) με την επιφάνεια της Γης και περιλαμβάνουν κάθετη και οριζόντια μετακίνηση σωματιδίων. Τα κύματα Love παράγονται από την αλληλεπίδραση των οριζόντιων εγκάρσιων κυμάτων SH (είδος των S κυμάτων) με το ανώτερο μαλακό επίπεδο της επιφάνειας και δεν περιλαμβάνουν κάθετη κίνηση σωματιδίων.



Εικόνα 2-2: Προκαλούμενες παραμορφώσεις από κύματα επιφανείας (a) Κύματα Rayleigh; (b) Κύματα Love. (Πηγή : Bolt, 1993)

Τα σεισμικά κύματα, λοιπόν, είναι εκδηλώσεις δυναμικών μεταβολών τάσεων και διαδίδονται εντός του στερεού σώματος, το οποίο δεν βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας, με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης. Οι εξισώσεις των κυμάτων P και S παρουσιάζονται παρακάτω και είναι οι σχέσεις (2.1) και (2.2) αντίστοιχα.

$$V_P = \sqrt{\frac{E_s}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_s g}{\gamma}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)E g}{(1+\nu)(1-2\nu)\gamma}} \quad (2.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{G g}{\gamma}} = \sqrt{\frac{E g}{2(1+\nu)\gamma}} \quad (2.2)$$

Με τις σχέσεις μεταξύ των E_s , G , E και ν να είναι :

$$E_s = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.4)$$

όπου : E_s : μέτρο συμπίεστικότητας διαμηκών κυμάτων

G (ή μ) : μέτρο διάτμησης εγκάρσιων κυμάτων

E : μέτρο ελαστικότητας

ν : λόγος Poisson

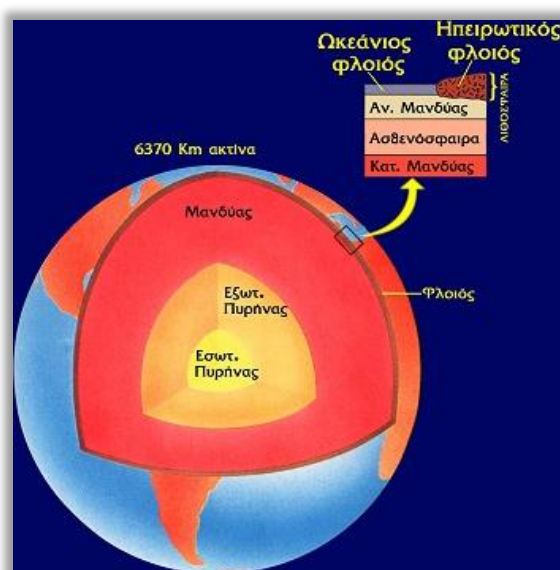
Ειδικότερα, παρατίθεται ο Πίνακας 2.1 που δίνει τυπικές τιμές αυτών των ταχυτήτων. Τα διαμήκη έχουν μέση τιμή διάδοσης στον φλοιό 6 km/s. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται με ταχύτητα περίπου ίση με το 60% αυτής των διαμηκών και έχουν εύρος ταλάντωσης μεγαλύτερο από αυτό των διαμηκών. Όσον αφορά τα είδη των επιφανειακών κυμάτων, τα κύματα Rayleigh έχουν ταχύτητα διάδοσης ίση προς το 70% της αντίστοιχης των εγκάρσιων κυμάτων, ενώ τα κύματα Love ίση με περίπου το 90% της ταχύτητας των κυμάτων Rayleigh (Σακελλαρίου, 2008).

Πίνακας 2.1 : Ταχύτητες διάδοσης σεισμικών κυμάτων. (Πηγή: Σακελλαρίου, 2008)

Είδος κύματος	Ταχύτητα διάδοσης
P	Στα πετρώματα του φλοιού : $V_p \sim 5 - 7$ km/s Στον μανδύα και τον πυρήνα : $V_p > 8$ km/s Στο νερό : $V_p > 1,5$ km/s Στον αέρα : $V_p \sim 0,3$ km/s
S	Στα πετρώματα του φλοιού : $V_s \sim 3 - 4$ km/s Στον μανδύα : $V_s > 4,5$ km/s Στον στέρεο πυρήνα : $V_s \sim 2,5 - 3$ km/s
Love	$V_L \sim 2 - 4,4$ km/s. Εξαρτάται από την συχνότητα.
Rayleigh	$V_R \sim 2 - 4,2$ km/s. Εξαρτάται από την συχνότητα.

2.2.1.2 Δομή εσωτερικού Γης

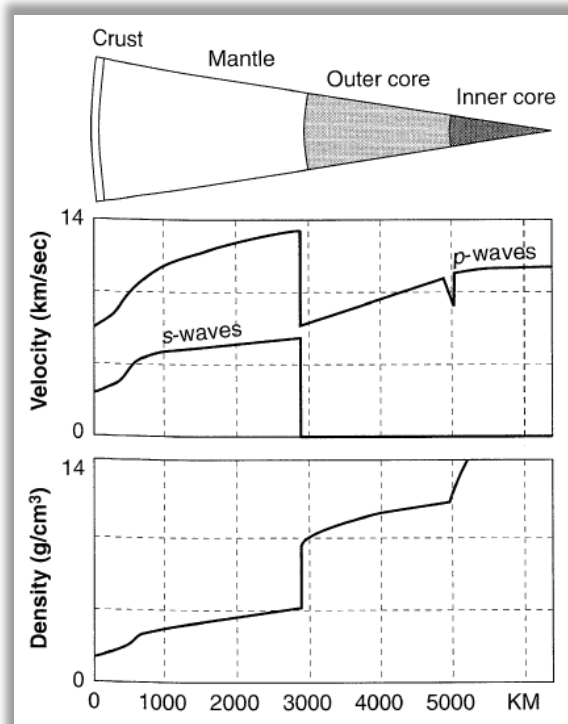
Το εσωτερικό της Γης (Εικόνα 2-3) είναι διαχωρισμένο σε ένα πυριτικό εξωτερικό φλοιό (crust), ο οποίος είναι συμπαγής, έναν ημίρρευστο μανδύα που χωρίζεται σε άνω και κάτω (upper and lower mantle), έναν ρευστό εξωτερικό πυρήνα ο οποίος είναι αρκετά πιο ιξώδης από τον μανδύα (outer core), καθώς και έναν στερεό εσωτερικό πυρήνα (inner core) (www.el.wikipedia.org/wiki/Γη, 2015).



Εικόνα 2-3: Δομή του εσωτερικού της Γης. (Πηγή : <http://www.oasp.gr>, 2015)

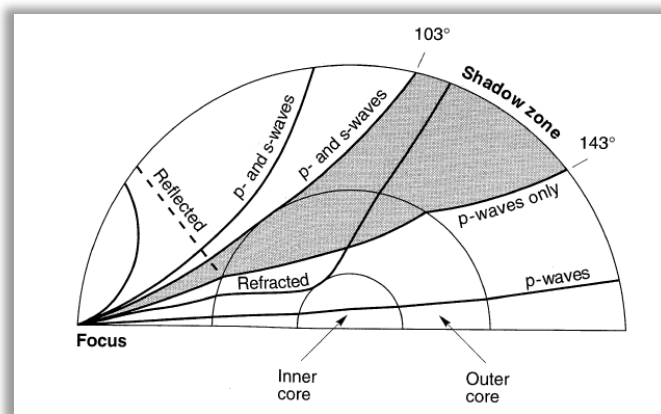
Ο φλοιός, στου οποίου την επιφάνεια κατοικούν οι άνθρωποι, αποτελεί το πλέον εξωτερικό επίπεδο της δομής της Γης. Το πάχος του κυμαίνεται από 25 έως 40 χιλιόμετρα κάτω από τις ηπείρους (με εξαίρεση του πάχους από 60 έως 70 χιλιόμετρα σε περίπτωση νέων ορεινών όγκων) έως μόλις 5 περίπου χιλιόμετρα κάτω από τους ωκεανούς (σε ένα πολύ μικρό ποσοστό της διαμέτρου της Γης). Η εσωτερική δομή του φλοιού είναι αρκετά περίπλοκη, αλλά μπορεί να αναπαρασταθεί με μία βασαλτική ζώνη με υπέρθεση γρανίτη στις τοποθεσίες των ηπείρων. Επιπρόσθετα, αφού βρίσκεται εκτεθειμένος στην ατμόσφαιρα και τους ωκεανούς, ο φλοιός έχει σημαντικά μικρότερη θερμοκρασία από τα υλικά που βρίσκονται από κάτω του. Ο «ωκεανικός φλοιός», εκτός από το μικρότερο πάχος του, θεωρείται γενικά πιο ομοιόμορφος και συμπαγής από τον «ηπειρωτικό φλοιό».

Η διακριτή αλλαγή στην διάδοση των κυμάτων ορίζει το όριο μεταξύ του φλοιού και του υποκείμενου μανδύα. Το όριο αυτό είναι γνωστό και ως ασυνέχεια Mohorovicic (Mohorovicic discontinuity) ή Moho, όπως πήρε το όνομα της από τον σεισμολόγο που την ανακάλυψε το 1909. Αν και η ειδική φύση της ασυνέχειας Moho δεν έχει κατανοηθεί ακόμη επαρκώς, ο διαθλαστικός και ανακλαστικός ρόλος της όσο αφορά τα σεισμικά κύματα είναι καλά ορισμένος. Ο μανδύας έχει πάχος περίπου 2850 χιλιομέτρων και μπορεί να διαιρεθεί σε άνω μανδύα, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά 650 χιλιόμετρα ρηχότερος, και κάτω μανδύα. Δεν έχουν καταγραφεί σεισμοί στον κάτω μανδύα, γεγονός το οποίο υποδεικνύει μία δομή ομοιόμορφης ταχύτητας και χημικής ομοιογένειας, εξαιρουμένου του κατώτατου ορίου του. Ο μανδύας είναι ψυχρότερος κοντά στον φλοιό από ότι σε μεγαλύτερα βάθη, ωστόσο διατηρεί, προσεγγιστικά, μία μέση θερμοκρασία 2204 °C, με αποτέλεσμα την ιξώδη και ημίρρευστη μορφή των υλικών του. Ειδικότερα, τα υλικά του συμπεριφέρονται ως στερεά όταν υποβληθούν σε ταχύτατα εφαρμοζόμενες τάσεις, όπως αυτές που προκύπτουν εκ των σεισμικών κυμάτων, αλλά μπορούν να κυλίσουν με αργό ρυθμό και ως ρευστά σε περίπτωση τάσεων μακράς διάρκειας. Το υλικό του μανδύα έχει ειδικό βάρος που κυμαίνεται από το 4 έως το 5. Ο εξωτερικός (ή ρευστός) πυρήνας (outer -fluid- core) έχει πάχος της τάξης των 2260 χιλιομέτρων. Ως ρευστός, δεν μπορεί να μεταδώσει εγκάρσια κύματα S. Όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 2-4, η ταχύτητα των S κυμάτων μηδενίζεται στο όριο μεταξύ μανδύα και εξωτερικού πυρήνα, ορίζοντας την ασυνέχεια Gutenberg (Gutenberg discontinuity). Επισημαίνεται, ωστόσο, ότι σημαντική πτώση παρουσιάζεται στο ίδιο σημείο για την ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών P κυμάτων. Ο εξωτερικός πυρήνας αποτελείται κυρίως από λιωμένο σίδηρο, γεγονός που βοηθά και στην αιτιολόγηση του υψηλού ειδικού βάρους του (από 9 έως 12). Ο εσωτερικός ή στέρεος πυρήνας (inner -solid-core) , με ειδική βαρύτητα περίπου 15, αποτελείται από ένα πολύ πυκνό και στέρεο υλικό νικελίου – σιδήρου, το οποίο έχει συμπιεστεί κάτω από πολύ δυνατές πιέσεις. Η θερμοκρασία του εσωτερικού πυρήνα εκτιμάται ως σχετικά ομοιόμορφη στους 2760 °C.



Εικόνα 2-4 : Μεταβολή της πυκνότητας και της ταχύτητας των S και P κυμάτων στο εσωτερικό της Γης. (Πηγή : Kramer, 1996)

Έπειτα, η Εικόνα 2-5 παρουσιάζει την επιρροή της δομής της Γης στην κατανομή των σεισμικών κυμάτων κατά την διάρκεια σεισμών. Αφού οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων, γενικά, αυξάνονται με το βάθος, οι διαδρομές των κυμάτων συνήθως διαθλώνται προς τα πίσω, δηλαδή προς την επιφάνεια της Γης. Μία εξαίρεση παρουσιάζεται στο όριο πυρήνα - μανδύα, όπου η ταχύτητα εντός του πρώτου είναι μικρότερη από αυτήν του δεύτερου.

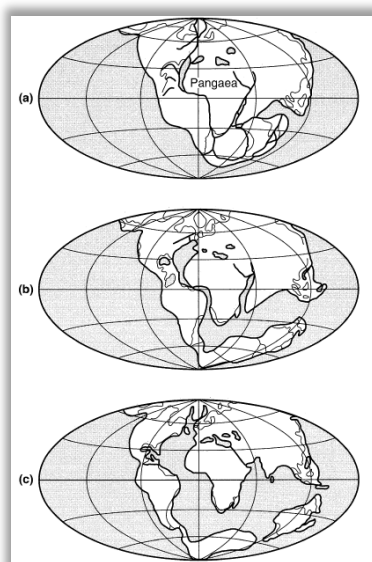


Εικόνα 2-5 : Αναπαράσταση των διαδρομών των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης από την εστία του σεισμού στα διαφορετικά επίπεδα της προαναφερθείσας δομής, δίνοντας βάρος στην διάθλαση και ανάκλαση τους. Παρατηρείται ότι μόνο τα σεισμικά κύματα P φτάνουν στην επιφάνεια της Γης μεταξύ 0° και 103° , λόγω της ρευστής φύσης του εξωτερικού πυρήνα που αποτρέπει τα S κύματα να κινηθούν στο εύρος 143° με 180° . Στην σκοτεινή ζώνη μεταξύ 103° και 143° , μόνο τα σεισμικά κύματα που ανακλώνται από τον εσωτερικό πυρήνα μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια. (Πηγή : Kramer, 1996)

2.2.2 Μετακίνηση των ηπείρων και τεκτονική των πλακών

Παρόλο που οι παρατηρήσεις της ομοιότητας των ακτογραμμών και της γεωλογίας του ανατολικού τμήματος της Λατινικής Αμερικής με των αντίστοιχων της δυτικής Αφρικής, του νότιου τμήματος της Ινδίας και του νότιου τμήματος της Αυστραλίας ενδιέφεραν τους επιστήμονες από την αρχή του 17^{ου} αιώνα (Kramer, 1996), η θεωρία που είναι γνωστή και ως «μετακίνηση των ηπείρων» (continental drift) δεν είχε προταθεί μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, όταν παρουσιάστηκε από τον Taylor (1910) και τον Wegener (1915). Ο Wegener, ειδικότερα, πίστευε ότι η Γη είχε μόνο μία μεγάλη ήπειρο εν ονόματι Παγγαία (Pangaea) πριν από διακόσια εκατομμύρια χρόνια (www.geo.auth.gr, 2007), η οποία διαχωρίστηκε σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία με την διάρκεια του χρόνου μετακινήθηκαν, με αργό ρυθμό, στην παρούσα θέση τους (Εικόνα 2-6). Μια πιο λεπτομερής απεικόνιση των τρεχουσών ομοιοτήτων μεταξύ των ακτών της Αφρικής και της Λατινικής Αμερικής αποδίδεται στην Εικόνα 2-7.

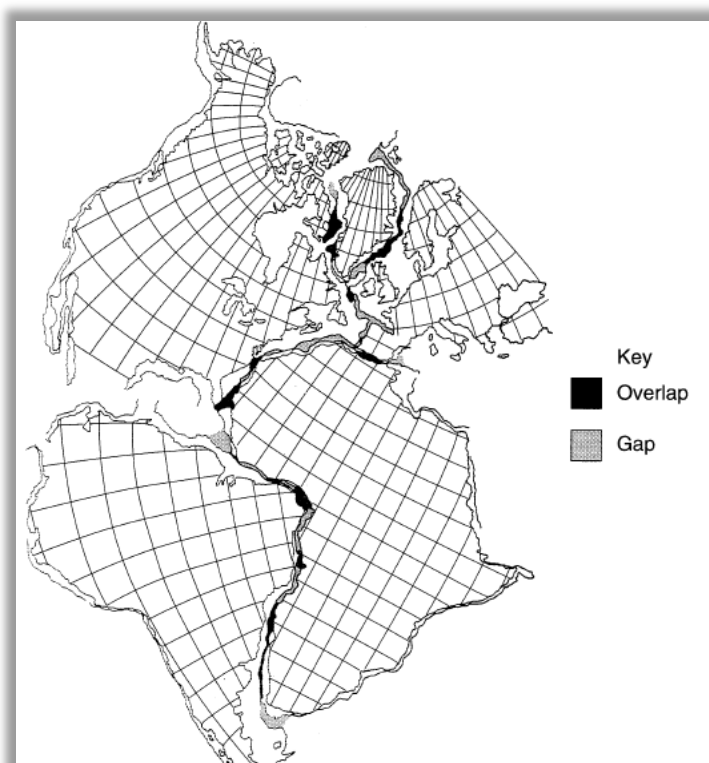
Η θεωρία της μετακίνησης των ηπείρων δεν έλαβε μεγάλη προσοχή έως, περίπου, το 1960 όταν το, αντίστοιχης χρονολογίας, παγκόσμιο δίκτυο σειсмоγράφων έκανε εφικτό τον ακριβή προσδιορισμό των τοποθεσιών των σεισμών και κατάφερε να επιβεβαιώσει ότι οι παραμορφώσεις μακράς διάρκειας επικεντρώνονταν σε ζώνες μικρού πλάτους μεταξύ σχετικά απόφικων κομματιών του φλοιού. Επίσης, η εξερεύνηση του ωκεάνιου πυθμένα δεν παρουσίασε μεγάλη άνθιση λόγω έλλειψης απαραίτητης τεχνολογίας και τεχνικών, μέχρι που, μετά το πέρας του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου, παρουσιάστηκαν οι τεχνικές της σεισμικής διάθλασης (seismic refraction), της πυρηνοληψίας με έμβολο (piston coring) και του σόναρ μεγάλου βάθους (deep-water echo sounding). Ακολούθησε, λοιπόν, η λεπτομερής μελέτη του ωκεάνιου πυθμένα η οποία έδωσε αρκετά σημαντικά στοιχεία για την υποστήριξη της θεωρίας, η οποία έγινε αποδεκτή εντός χρονικού διαστήματος δέκα ετών.



Εικόνα 2-6: Θεωρία του Wegener περί μετατόπισης των ηπείρων: (a) 270 εκατομμύρια έτη πριν; (b) 150 εκατομμύρια έτη πριν; (c) 1 εκατομμύριο έτη πριν. (Πηγή : Verney, 1979)

2.2.2.1 Τεκτονική των πλακών

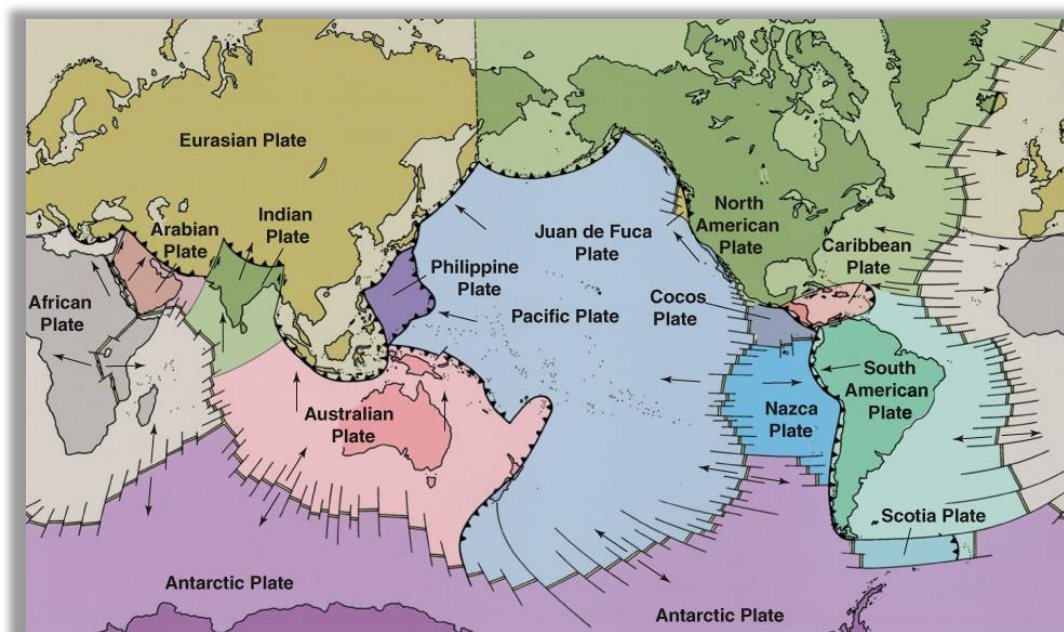
Η θεωρία της μετακίνησης των ηπείρων πρότεινε ότι οι, τεραστίων διαστάσεων, ήπειροι μετακινούνταν μαζί με την περιρρέουσα ποσότητα θάλασσας στην επιφάνεια του ωκεάνιου πυθμένα. Ήταν γνωστό, ωστόσο, ότι ο ωκεάνιος πυθμένας είναι πολύ ισχυρός για να επιτρέψει τέτοιου είδους κίνηση και για αυτό η θεωρία είχε απορριφθεί αρχικά από αρκετούς επιστήμονες. Βάσει όμως αυτής της θεωρίας, ξεκίνησε να διαμορφώνεται και να αναπτύσσεται η σύγχρονη θεωρία της τεκτονικής των πλακών (plate tectonics theory). Η βασική υπόθεση της θεωρίας αποτελεί το γεγονός ότι η επιφάνεια της Γης αποτελείται από έναν αριθμό μεγάλων, συμπαγών τμημάτων γης τα οποία ονομάζονται πλάκες (plates), τα οποία κινούνται το ένα σχετικά με το άλλο.



Εικόνα 2-7: Αποτέλεσμα στατιστικής ανάλυσης σε σφαιρικά χωρικά δεδομένα των ηπείρων της Αμερικής, Αφρικής, Ευρώπης και Ασίας, χρησιμοποιώντας την κλίση των πρηνών των υφαλοκρηπίδων, παρά τις ακτές. (Πηγή : Bullard κ.α, 1965)

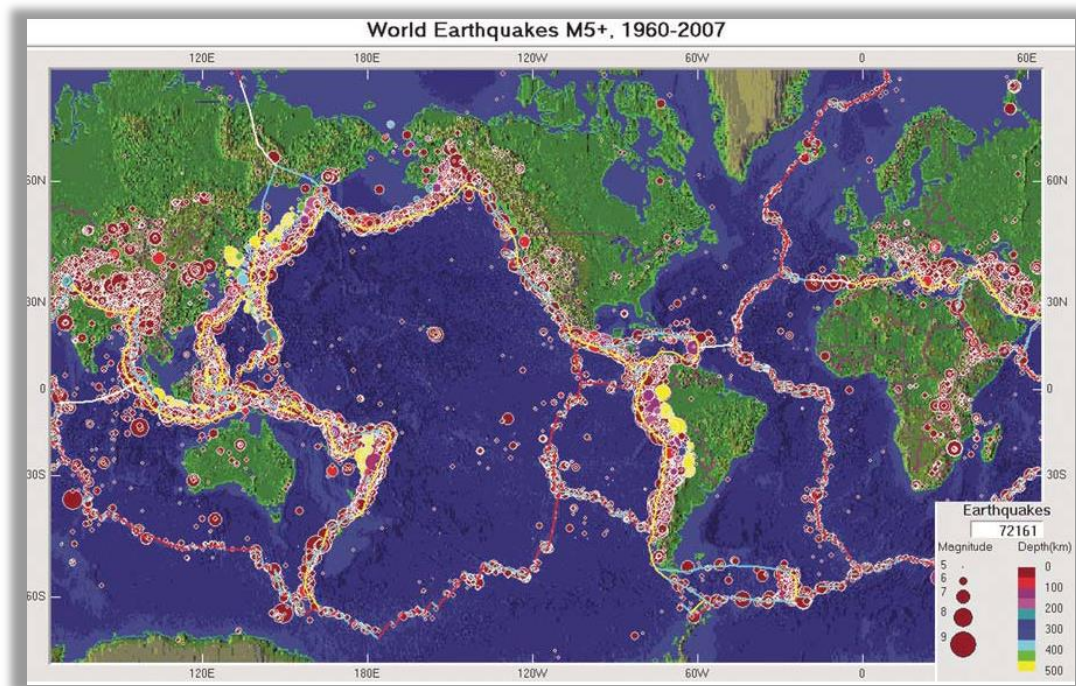
Ο φλοιός της Γης χωρίζεται σε έξι πλάκες μεγέθους μεγαλύτερου της ηπείρου (Αφρικανική, Ευρασιατική, Ειρηνικού Ωκεανού, Αμερικάνικη, Ανταρκτική και Ινδο - Αυστραλιανή) , οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 2-8, και περίπου 14 μικρότερου μεγέθους (Kramer, 1996). Οι μικρότερες πλάκες ή μικρο-πλάκες (microplates) έχουν προκύψει από την διάσπαση τμημάτων στο εγγύς περιβάλλον των μεγαλύτερων πλακών. Η σχετική παραμόρφωση μεταξύ των πλακών λαμβάνει μέρος μόνο σε ζώνες μικρού πλάτους, κοντά στα όρια τους. Αυτή η παραμόρφωση μπορεί να συμβεί με αργό και συνεχή ρυθμό (ασεισμική παραμόρφωση) ή μπορεί να λάβει μέρος σπασμωδικά με τη μορφή σεισμών (σεισμική παραμόρφωση). Αφού η παραμόρφωση

αυτή συμβαίνει κατά την συντριπτική πλειοψηφία στα όρια μεταξύ των πλακών, είναι πιθανό οι τοποθεσίες των σεισμών να είναι συγκεντρωμένες στα εγγύς όρια μεταξύ των πλακών (Σακελλαρίου, 2008). Ο χάρτης των σεισμικών επίκεντρων της Εικόνας 2-9 επιβεβαιώνει τις προαναφερθείσες υποψίες, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο ισχυρή υποστήριξη για την θεωρία των τεκτονικών πλακών.



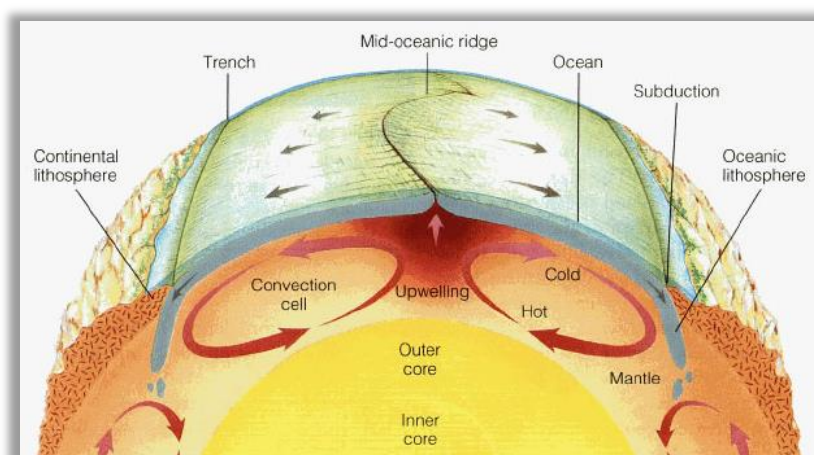
Εικόνα 2-8: Οι κύριες τεκτονικές πλάκες, ωκεάνια ρήγματα, τάφροι και μετασηματισμένα ρήγματα της Γης. Τα βελόνια υποδεικνύουν την κατεύθυνση της κίνησης των πλακών. (Πηγή : <http://www.geogrify.net>, 2011)

Η θεωρία των τεκτονικών πλακών αποτελεί μία κινηματική θεωρία (π.χ. εξηγεί την γεωμετρία της κίνησης των πλακών χωρίς να αναλύει τα αίτια κίνησης τους). Μία κινητήριος δύναμη απαιτείται για να κινηθεί η τεράστια μάζα των κινούμενων πλακών και το μέγεθος της πρέπει, συνεπώς, να είναι πολύ μεγάλο. Η πιο κοινά αποδεκτή εξήγηση για την πηγή αυτής της κίνησης βασίζεται στην απαίτηση του θερμομηχανικού ισοζυγίου των υλικών της Γης. Το άνω τμήμα του μανδύα βρίσκεται σε επαφή με έναν, σχετικά, ψυχρό φλοιό ενώ το κάτω τμήμα του με τον θερμό εξωτερικό πυρήνα. Προφανώς, μία βαθμιδωτά αυξανόμενη θερμοκρασία πρέπει να παρουσιάζεται εντός του μανδύα. Η μεταβολή της πυκνότητας του μανδύα λόγω της θερμοκρασίας διαμορφώνει μία ασταθή κατάσταση ενός συμπαγούς (ψυχρότερου) υλικού, το οποίο εναπόκειται πάνω από λιγότερο συμπαγές (θερμότερο) υλικό. Με το πέρασ του χρόνου, το ψυχρότερο και πυκνό υλικό ξεκινά να βυθίζεται υπό την επίρεια της βαρύτητας και το θερμότερο, λιγότερο πυκνό υλικό ξεκινά να αναδύεται. Το βυθιζόμενο υλικό θερμαίνεται βαθμιδωτά όσο περισσότερο βυθίζεται και μετατρέπεται σε λιγότερο πυκνό: τελικά, θα κινηθεί πλαγίως και θα ξεκινήσει ξανά την ανάδυση όταν άλλο ψυχρό και πυκνό υλικό βυθιστεί. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και ως διάδοση θερμότητας (convection).



Εικόνα 2-9: Παγκόσμια σεισμική δραστηριότητα. Οι τελείες αναπαριστούν τα επίκεντρα σημαντικών σεισμών. Είναι προφανές ότι οι τοποθεσίες της σημαντικής πλειοψηφίας των σεισμών παρουσιάζονται στα όρια μεταξύ των πλακών. (Πηγή: www.nature.nps.gov/geology/monitoring, 2007)

Τα ρεύματα διάδοσης θερμότητας στον ημίρρευστο βράχο του μανδύα, τα οποία αναπαριστώνται σχηματικά στην Εικόνα 2-10, επιβάλλουν διατμητικές τάσεις στο κάτω μέρος των πλακών, συνεπώς μετακινώντας τις σε διάφορες κατευθύνσεις στην επιφάνεια της Γης. Άλλα φαινόμενα, όπως η ώθηση των κορυφογραμμών (ridge push) και το τράβηγμα των πλακών (slab pull), μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην κίνηση των πλακών (Hager, 1978).



Εικόνα 2-10: Η εσωτερική δομή της Γης και τα ρεύματα διάδοσης θερμότητας στον μανδύα. Κοντά στην κάτω επιφάνεια του φλοιού, οι οριζόντιες συνιστώσες των ρευμάτων προκαλούν διατμητικές τάσεις που μετακινούν τις πλάκες στην επιφάνεια της Γης. Η κίνηση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην απομάκρυνση ή σύγκλιση των πλακών μεταξύ τους. (Πηγή: <http://www.sms-tsunami-warning.com>, 2011)

2.2.2.2 Όρια των πλακών

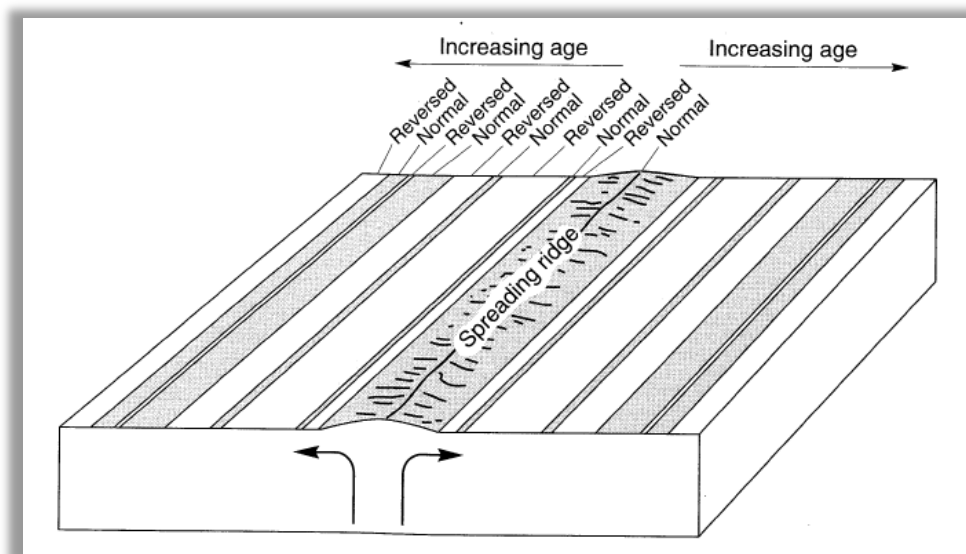
Τα όρια των πλακών κατατάσσονται σε τρία διαφορετικά είδη που έχουν αναγνωριστεί επιστημονικά, τα οποία αναλύονται σε αυτό το υποκεφάλαιο με σκοπό την γνώση της κίνησης που σχετίζεται με το κάθε ένα αντίστοιχα και, συνεπώς, την καλύτερη κατανόηση της τεκτονικής των πλακών. Τα χαρακτηριστικά των ορίων των πλακών επηρεάζουν επίσης την μορφή των σεισμών που πραγματοποιούνται κατά το μήκος τους.

Όρια εξαπλωθεισών κορυφογραμμών ή αποκλίνοντα

Σε συγκεκριμένες περιοχές, οι πλάκες έχουν την τάση να απομακρύνονται η μία από την άλλη, στα όρια που ονομάζονται εξαπλωθείσες κορυφογραμμές (spreading ridges) ή εξαπλωθέντα ρήγματα (spreading rifts). Βράχοι σε ρευστή μορφή αναδύονται από τον υποκείμενο μανδύα στην επιφάνεια όπου ψύχονται και ενσωματώνονται στις εξαπλωθείσες πλάκες (Εικόνα 2-11). Με αυτόν τον τρόπο, οι πλάκες «επεκτείνονται» στο σημείο της εξαπλωθείσας κορυφογραμμής. Οι ρυθμοί εξάπλωσης κυμαίνονται από περίπου 2 έως 18 εκατοστά ανά έτος (cm/year); οι υψηλότερες τιμές συναντώνται σε κορυφογραμμές του Ειρηνικού Ωκεανού και οι χαμηλότερες κατά μήκος της Μεσοκεάνιας Ατλαντικής κορυφογραμμής (Mid-Atlantic Ridge) (Kramer, 1996). Εκτιμάται ότι ο νέος ωκεάνιος φλοιός, εν έτι 1996, αναπτυσσόταν με ρυθμό περίπου 3,1 τετραγωνικά χιλιόμετρα ανά έτος (km²/yr) παγκοσμίως. Ο φλοιός, κυρίως νέα, ηλικιακά, βασαλτική ζώνη, έχει μικρό πάχος στο εγγύς περιβάλλον των εξαπλωθεισών κορυφογραμμών. Ενδέχεται να διαμορφώνεται από μία, σχετικά αργή, ανοδική κίνηση του μάγματος, ή μπορεί να αναδύεται ακαριαία κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα, η πλειονότητα της οποίας λαμβάνει μέρος κάτω από την ωκεάνια επιφάνεια, είναι συχνό φαινόμενο πλησίον αυτού του είδους ορίων, όπως έχει αποτυπωθεί από υποβρύχιες φωτογραφίες. Οι εξαπλωθείσες κορυφογραμμές, λοιπόν, μπορεί να προεξέχουν πάνω από τον ωκεανό; παράδειγμα αποτελεί το νησί της Ισλανδίας, όπου η ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι σχεδόν συνεχής (υπάρχουν πάνω από 150 ενεργά ηφαίστεια).

Το υλικό του μανδύα ψύχεται αφού φτάσει στην επιφάνεια, στο κενό μεταξύ των εξαπλωθεισών πλακών. Όσο ψύχεται, μαγνητίζεται (μαγνητικό υπόλοιπο – remnant magnetism) αποκτώντας μία πολικότητα η οποία εξαρτάται από την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το μαγνητικό πεδίο της Γης δεν είναι σταθερό σε μία γεωλογική χρονική κλίμακα; έχει παρουσιάσει μεταβολές και έχει αντιστραφεί σε ακανόνιστα χρονικά διαστήματα, συνεπώς δημιουργώντας μαγνητικές ανωμαλίες (αναστροφές πολικότητας) στον βράχο που σχηματίζεται στα όρια των εξαπλωθεισών κορυφογραμμών. Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε κατεύθυνση κάθετη ενός σχηματιζόμενου ορίου, αποκαλύπτει ένα μοτίβο μεταβολών της μαγνητικής ισχύος. Αυτές οι μαγνητικές ανωμαλίες έχουν επιτρέψει την χρονολόγηση μεγάλου μέρους των κύριων πλακών. Η σύγκριση των ηλικιών των διάφορων υλικών επιτρέπει την αναγνώριση της γεωμετρίας και της

κίνησης των διάφορων πλακών και έχει αποδειχθεί ανεκτίμητη στην επιβεβαίωση και αποδοχή της θεωρίας των τεκτονικών πλακών.



Εικόνα 2-11: Όρια εξαπλωθείσας κορυφογραμμής. Το μάγμα αναδύεται στην επιφάνεια και ψύχεται στο κενό που δημιουργείται μεταξύ των αποκλινοσών πλακών. Επίσης, προβάλλονται μαγνητικές ανωμαλίες ως λωρίδες κανονικής και ανεστραμμένης μαγνητικής πολικότητας. (Πηγή: Foster, 1971)

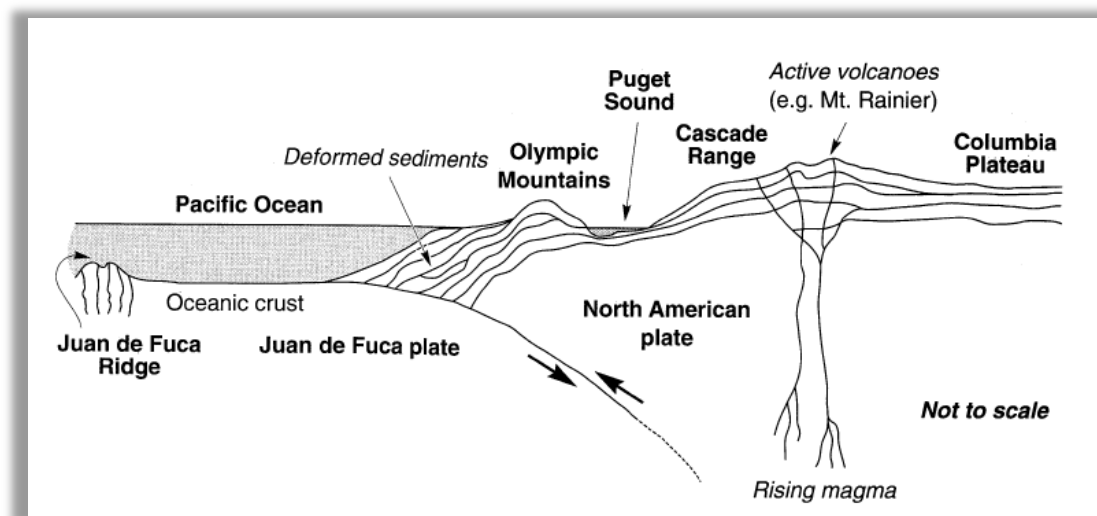
Όρια ζωνών καταβύθισης ή συγκλίνοντα

Από την χρονική στιγμή που το μέγεθος της Γης παραμένει σταθερό, η δημιουργία νέου υλικού των πλακών στα όρια εξάπλωσης των κορυφογραμμών πρέπει να αντισταθμιστεί από την κατανάλωση υλικού σε άλλες τοποθεσίες. Αυτό το γεγονός συμβαίνει στα όρια των ζωνών καταβύθισης (subduction zones boundaries) όπου η σχετική κίνηση των πλακών είναι συγκλίνουσα. Στο σημείο επαφής, η μία πλάκα καταδύεται ή καταβυθίζεται, κάτω από την άλλη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-12. Τα όρια αυτού του είδους, συνήθως, συναντώνται κοντά στα άκρα των ηπείρων.

Επειδή ο ωκεανικός φλοιός είναι, γενικά, ψυχρός και συμπαγής, βυθίζεται λόγω του ιδιοβάρους του κάτω από τον ελαφρύτερο ηπειρωτικό φλοιό. Όταν ο ρυθμός σύγκλισης των πλακών είναι μεγάλου μεγέθους, σχηματίζεται μία τάφρος στο όριο μεταξύ των πλακών. Για αυτό και τα όρια αυτά ονομάζονται και όρια τάφρου (trench boundaries). Σεισμοί παράγονται στην κεκλιμένη ζώνη Benioff, στην επιφάνεια μεταξύ της υπερκείμενης και της υποκείμενης πλάκας. Όταν ο ρυθμός σύγκλισης είναι χαμηλός, συγκεντρώνονται ιζήματα σε μία σφήνα εδάφους (accretionary wedge) στην κορυφή του βράχου του φλοιού, αποκρύπτοντας έτσι την σχηματιζόμενη τάφρο.

Η βυθιζόμενη πλάκα θερμαίνεται και γίνεται λιγότερο δύσκαμπτη όσο βυθίζεται. Τελικώς, προκύπτει τόσο εύπλαστη που καθίσταται αδύνατη η παραγωγή σεισμών; το μεγαλύτερος βάθος σεισμού που έχει καταγραφεί έως τώρα είναι περίπου 700 χιλιόμετρα και υποστηρίζει αυτή την υπόθεση. Τμήματα της βυθιζόμενης πλάκας

λιώνουν, παράγοντας μάγμα το οποίο μπορεί να αναδυθεί στην επιφάνεια και να σχηματίζει μία ηφαιστειακή γραμμή, προσεγγιστικά παράλληλη στην ζώνη καταβύθισης, πάνω στην αναδύομενη πλάκα.



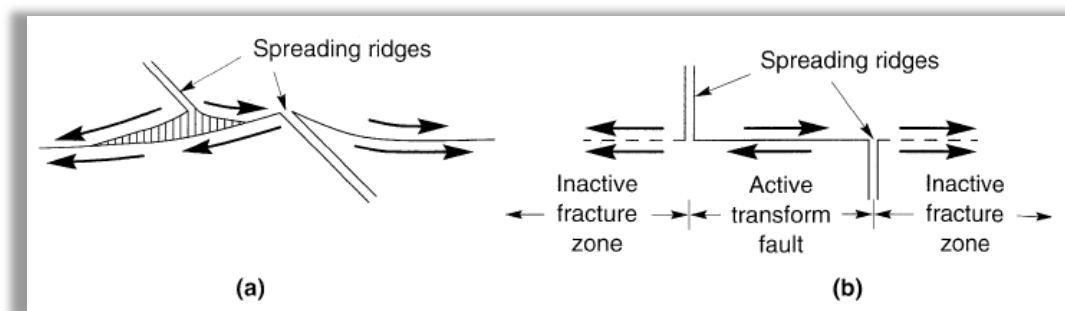
Εικόνα 2-12: Παράδειγμα ζώνης καταβύθισης, χωρίς κλίμακα. Αποτελεί την ζώνη καταβύθισης Cascadia, λίγο έξω από τις ακτές της Washington και του Oregon. Η πλάκα Juan de Fuca προέρχεται από την εξαπλωθείσα κορυφογραμμή Juan de Fuca και καταβυθίζεται κάτω από την Νοτιο-Αμερικάνικη πλάκα. Μάγμα αναδύεται από το βαθύτερο τμήμα της ζώνης σχηματίζοντας ένα ηφαιστειακό τόξο το οποίο είναι σχεδόν παράλληλο της ζώνης και βρίσκεται πάνω στην αναδύομενη πλάκα. (Πηγή: Noson et. al, 1988)

Όταν οι πλάκες που φέρουν ηπείρους συγκλίνουν, ηπειρωτικές συγκρούσεις (continental collisions) μπορούν να οδηγήσουν στον σχηματισμό ορεινών όγκων (www.el.wikipedia.org/wiki/Τεκτονικές_πλάκες, 2015). Τα Ιμαλία αποτελούνται από δύο επίπεδα φλοιού, τα οποία παράχθηκαν μετά την σύγκρουση της Ευρασιατικής με την Ινδο-Αυστραλιανή πλάκα. Ηπειρωτικές συγκρούσεις των πλακών που φέρουν την Αφρική και την Ευρώπη, την τρέχουσα χρονική στιγμή, ελαττώνουν το μέγεθος της Μεσογείου Θάλασσας και θα οδηγήσουν, τελικώς, στον σχηματισμό ορεινών όγκων μετά από πολλαπλές συγκρούσεις.

Όρια ρηγμάτων μετασχηματισμού ή πλευρικός ολισθαίνοντα

Τα ρήγματα (ή ρηξιγενείς ζώνες) μετασχηματισμού (transform faults or fault zones) είναι μεγάλης κλίμακας ενεργές τεκτονικές δομές, που αποτελούν όρια τεκτονικών λιθοσφαιρικών πλακών. Η κίνηση μεταξύ τους χαρακτηρίζεται από οριζόντια ολίσθηση, δηλαδή πρόκειται για όρια κατά μήκος των οποίων, ούτε δημιουργείται (όπως στις αποκλίνουσες πλάκες) αλλά ούτε και καταστρέφεται (όπως στις συγκλίνουσες πλάκες) υλικό της λιθόσφαιρας (www.labtect.geol.uoa.gr, 2007). Συνήθως βρίσκονται μετατοπίζοντας τις εξαπλωθείσες κορυφογραμμές, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 2-13. Αυτά τα ρήγματα, λοιπόν, αναγνωρίζονται από τις μετατοπίσεις των ζωνών μαγνητικών ανωμαλιών και, όπου διατηρούνται, από σχηματιζόμενους γκρεμούς στην επιφάνεια του φλοιού. Οι μετατοπίσεις των

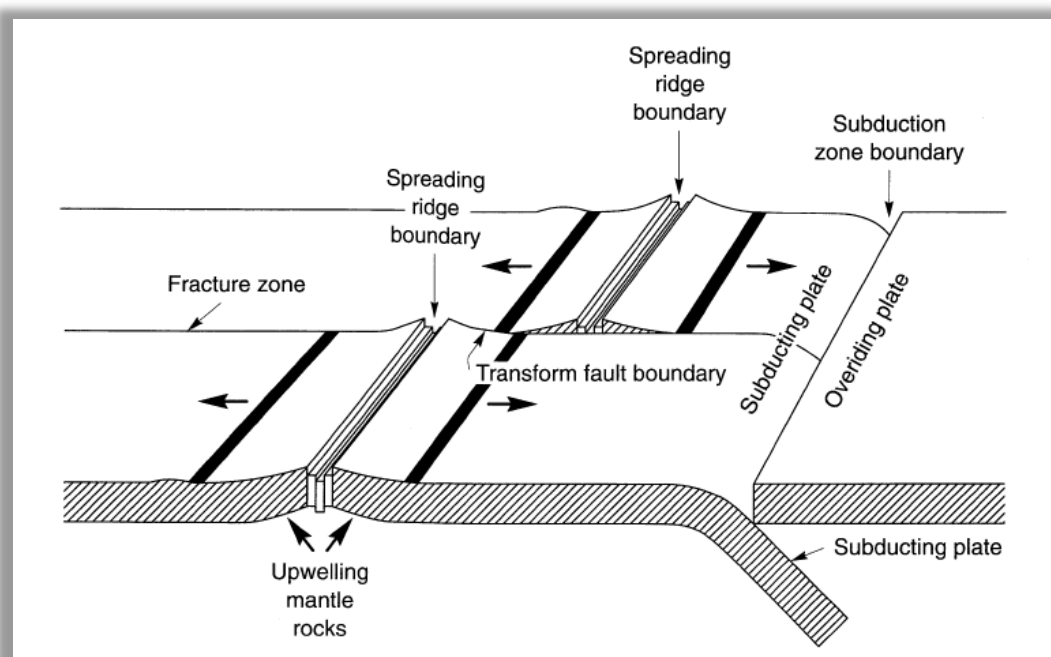
μαγνητικών ανωμαλιών, που ορίζουν τις ζώνες διάρρηξης (fracture zones), μπορούν να παρατηρηθούν κατά μήκος χιλιάδων χιλιομέτρων; ωστόσο, μόνο το τμήμα της ζώνης διάρρηξης μεταξύ των εξαπλωθισών κορυφογραμμών μπορεί να θεωρηθεί ρήγμα μετασχηματισμού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-13, η κίνηση των τμημάτων της ζώνης διάρρηξης που επεκτείνονται πέρα του ρήγματος μετασχηματισμού έχουν την ίδια κατεύθυνση και στις δύο πλευρές της ζώνης; οπότε και δεν υπάρχει σχετική κίνηση. Τα ανενεργά αυτά τμήματα των ζωνών μπορούν να θεωρηθούν ρήγματα ορυκτών (fossil faults) που δεν παράγουν σεισμούς.



Εικόνα 2-13: (α) Πλάγια όψη; (β) κάτοψη του ρήγματος μετασχηματισμού και των γειτονικών ανενεργών ζωνών διάρρηξης. (Πηγή: Kramer, 1996)

Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα (San Andreas Ridge), για παράδειγμα, έχει κατηγοριοποιηθεί ως ρήγμα μετασχηματισμού (Wilson, 1965), συνδέοντας εκείνο του Ανατολικού Ειρηνικού, έξω από την ακτή του Μεξικού, με το Juan de Fuca, έξω από την ακτή της πολιτείας Washington. Στην πραγματικότητα, η γεωμετρία αυτού του είδους είναι αρκετά πολύπλοκη με πολλές ακανόνιστες γωνίες και καμπύλες, για αυτό και συνήθως χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα (fault segments). Το βάθος τους είναι τυπικά περιορισμένο, αλλά το οριζόντιο μήκος τους μπορεί να φτάσει μεγάλο αριθμό χιλιομέτρων. Άλλα σημαντικά ρήγματα της κατηγορίας αποτελούν: το Motagua (που διαχωρίζει την Νοτιο-Αμερικάνικη πλάκα από εκείνη της Καραϊβικής), το Αλπικό ρήγμα της Νέας Ζηλανδίας και το δίκτυο ρηγμάτων της Νεκράς Θάλασσας, που συνδέει την Ερυθρά Θάλασσα με τα όρη Bitlis της Τουρκίας.

Τελικά, η τεκτονική των πλακών διαμορφώνει και παρέχει ένα πολύ χρήσιμο πλαίσιο κατανόησης και εξήγησης των κινήσεων επί της επιφάνειας της Γης και των τοποθεσιών των σεισμών και ηφαιστείων. Η τεκτονική των πλακών, λοιπόν, ευθύνεται για την διαμόρφωση των νέων και την κατανάλωση των παλιών υλικών του γήινου φλοιού στη μορφή τριών διαφορετικών ειδών κίνησης των πλακών (Εικόνα 2-14). Επισημαίνεται, όμως, ότι δεν αποτελεί πανάκεια, αφού δεν εξηγεί όλα τα καταγραφέντα σεισμικά συμβάντα. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι έχουν συμβεί σεισμοί εντός των πλακών, μακριά των ορίων τους με τις υπόλοιπες πλάκες, (intraplate earthquakes), στις περισσότερες ηπείρους.



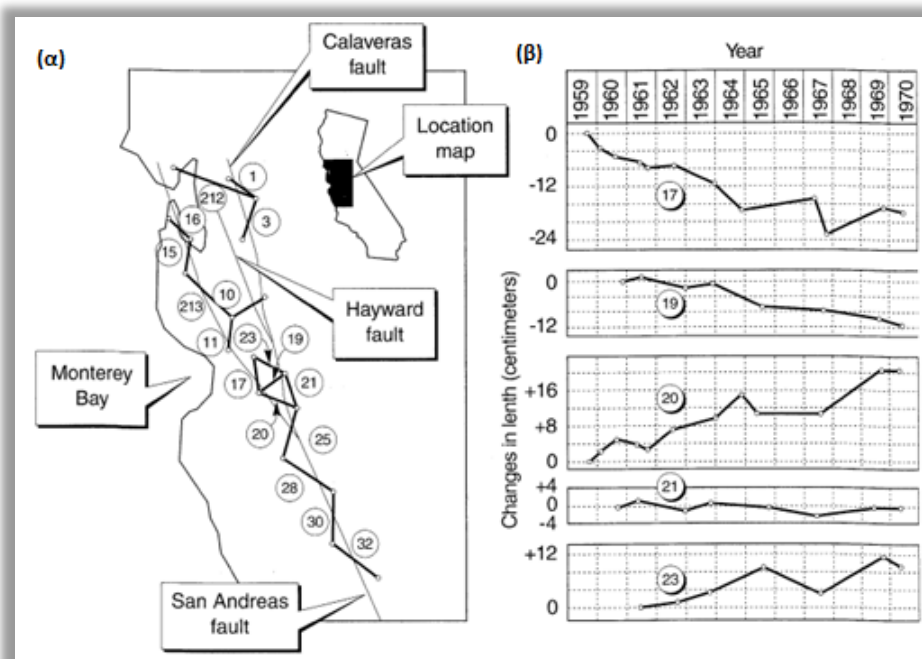
Εικόνα 2-14: Συσχετίσεις μεταξύ των τριών ειδών των ορίων : εξαπλωθείσες κορυφογραμμές, ζώνες καταβύθισης και ρήγματα μετασχηματισμού. (Πηγή: Kramer, 1996)

2.2.3 Θεωρία ελαστικότητας

Οι πλάκες της Γης, όπως προαναφέρθηκε, βρίσκονται σε συνεχή κίνηση και η τεκτονική των πλακών υποδεικνύει ότι η πλειοψηφία των σχετικών κινήσεων λαμβάνει χώρα πλησίον των ορίων τους. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις αυτών των κινήσεων μπορούν να παρατηρηθούν στο γεωλογικό ιστορικό (geologic record), το οποίο διατηρεί πληροφορίες για παραμορφώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια μιας μεγάλης χρονικής περιόδου. Με την άφιξη του μοντέρνου ηλεκτρονικού εξοπλισμού μετρήσεων, ωστόσο, οι κινήσεις μπορούν να παρακολουθηθούν μέσα σε μία μικρότερη χρονική περίοδο. Στην Εικόνα 2-15 απεικονίζεται ένα παράδειγμα αποτελεσμάτων μετρήσεων στο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα και στο ρήγμα Calaveras, στο οποίο παρατηρείται συστολή των γραμμών 17 και 19 και επιμήκυνση των γραμμών 20 και 23, υποδεικνύοντας την ύπαρξη κίνησης του ρήγματος (Kramer, 1996).

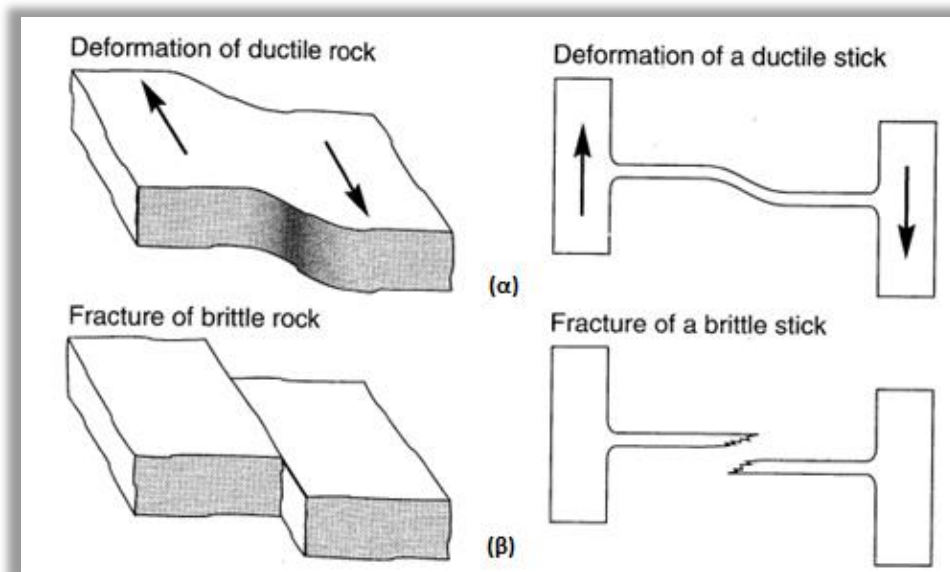
Όπως διαδραματίζεται η σχετική κίνηση των πλακών, ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης (elastic strain energy) αποθηκεύεται στα υλικά κοντά στα όρια των πλακών, όσο αυξάνονται οι διατμητικές τάσεις στα επίπεδα του ρήγματος που διαχωρίζουν τις πλάκες. Όταν οι διατμητικές τάσεις εξισωθούν με την διατμητική τάση του βράχου που βρίσκεται κατά μήκος του ρήγματος, ο βράχος αστοχεί και η συγκεντρωμένη ελαστική ενέργεια ελευθερώνεται. Οι επιπτώσεις της αστοχίας εξαρτώνται από την κατάσταση του βράχου που βρίσκεται κατά μήκος του ρήγματος. Εάν είναι αδύναμο και όλκιμο, όση μικρή ελαστική ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει, θα ελευθερωθεί σχετικά αργά και η κίνηση θα πραγματοποιηθεί σεισμικά. Εάν, από την άλλη, ο βράχος είναι δυνατός και εύθραυστος, η αστοχία θα είναι ακαριαία. Η ρήξη του θα ελευθερώσει την ενέργεια με εκρηκτικό τρόπο,

μερικώς στην μορφή θερμότητας και μερικώς ως κύματα καταπόνησης (stress waves), τα οποία φαντάζουν ως σεισμοί. Η θεωρία της ελαστικότητας, όπως διατυπώθηκε από τον Reid το 1911, περιγράφει αυτή την διαδικασία της επιτυχούς συγκέντρωσης και ελευθέρωσης της ελαστικής ενέργειας εντός ενός βράχου πλησίον των ρηγμάτων (Εικόνα 2-16).



Εικόνα 2-15: (α) Δίκτυο γραμμών καταμέτρησης κατά μήκος των ρηγμάτων San Andreas και Calaveras; (β) αλλαγή στο μήκος των γραμμών. (Πηγή: Bolt, 1993)

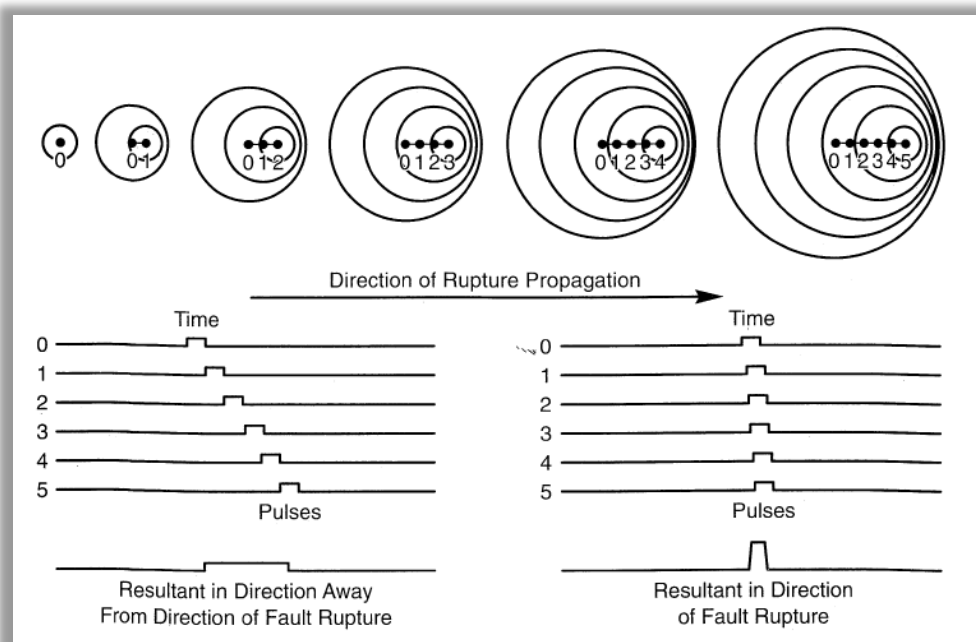
Η φύση της συγκέντρωσης και έκλυσης ενέργειας παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον. Τα ρήγματα δεν είναι ομοιόμορφα, γεωμετρικά ή/και στα υλικά – μπορούν να υπάρχουν δυνατές αλλά και ασθενείς ζώνες πάνω από την επιφάνεια ενός ρήγματος. Οι ισχυρότερες ζώνες, γνωστές ως εξογκώματα (asperities) ή φράγματα (barriers), είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Το μοντέλο εξογκωμάτων (asperity model) ενός ρήγματος μετασηματισμού υποθέτει ότι οι διατμητικές τάσεις πριν από σεισμό δεν είναι ομοιόμορφες κατά μήκος του ρήγματος λόγω της ελευθέρωσης ενέργειας στις ασθενέστερες ζώνες, μέσω ερπυσμού (creep) ή πρόωρων δονήσεων (foreshocks). Η έκλυση των εναπομεινάντων σεισμικών καταπονήσεων που ήταν αποθηκευμένες στα εξογκώματα, παράγουν τον κύριο σεισμό που αφήνει την επιφάνεια έκρηξης στην κατάσταση ομοιόμορφης πρόωρης καταπόνησης. Στο μοντέλο των φραγμάτων (barrier model), οι προγενέστερες, του σεισμού, πρόωρες καταπονήσεις εκτιμώνται ως ομοιόμορφες. Όταν συμβαίνει ο κύριος σεισμός, αυτές ελευθερώνονται από όλα τα τμήματα του ρήγματος, εκτός από εκείνες των δυνατώτερων φραγμάτων; μεταγενέστερες δονήσεις, έπειτα, λαμβάνουν χώρο όσο ο βράχος προσαρμόζεται στο νέο πεδίο ομοιόμορφης καταπόνησης.



Εικόνα 2-16: Θεωρία ελαστικότητας για σεισμούς. Στην (α) η αργή παραμόρφωση του βράχου στην περιοχή εγγύτητας ενός ορίου της πλάκας οδηγεί στην συσσώρευση ελαστικής ενέργειας εντός του βράχου, με τον ίδιο τρόπο που η ίδια ενέργεια συσσωρεύεται σε ένα εύπλαστο ραβδί που παραμορφώνεται, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της εικόνας ; (β) Αν ξεπεραστεί η αντοχή του βράχου, εκείνος θα σπάσει, εκλύοντας ελαστική ενέργεια στη μορφή δονήσεων, όπως θα γινόταν και στην περίπτωση ενός εύθραυστου ραβδιού, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της εικόνας. (Πηγή: Kramer, 1996)

Αφού πρόωρες δονήσεις και μετασεισμοί (aftershocks) συχνά παρατηρούνται, ενδέχεται ότι κάποιες ισχυρές ζώνες συμπεριφέρονται ως εξογκώματα και άλλες ως φράγματα (Aki, 1984). Η μηχανική σημασία των εξογκωμάτων και των φραγμάτων εντοπίζεται στην επιρροή τους στα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης πλησίον του ρήγματος. Μία περιοχή που βρίσκεται κοντά σε μία από αυτές τις ισχυρές ζώνες μπορεί να αντιμετωπίσει ισχυρότερες δονήσεις από μία άλλη περιοχή σε ίδια απόσταση από το ρήγμα αλλά μακρύτερα από αυτές τις ζώνες. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το ρήγμα οι επιπτώσεις του ελαττώνονται ανομοιόμορφα. Δυστυχώς, οι μέθοδοι για τον εντοπισμό αυτών των ζωνών πριν την ρήξη δεν έχουν, ακόμη, αναπτυχθεί επαρκώς.

Η ρήξη, γενικά, προχωρά κατά μήκος του ρήγματος ως μία σειρά διαδοχικών μετακινήσεων (κάποιοι σεισμοί μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύνολο πολλών μικρότερων σεισμών που συμβαίνουν εντός μίας σύντομης χρονικής και μικρής χωρικής εγγύτητας). Οι μικροί σεισμοί μπορούν να μοντελοποιηθούν ως σημειακές διαδικασίες, αφού οι επιφάνειες ρήξης συνήθως επεκτείνονται μόνο λίγα χιλιόμετρα. Για παράδειγμα, κύματα παράγονται από το ρήγμα με διαφορετική ισχύ σε διαφορετικές τοποθεσίες; κατευθυντικές επιπτώσεις (directivity effects) αυτού του είδους μπορεί να παράξουν αξιωματικές διαφορές στα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης (Εικόνα 2-17). Η παρεμβολή των κυμάτων προκαλείται από ισχυρές διαδοχικές μετακινήσεις που παράγουν με την σειρά τους ισχυρούς παλμούς μεγάλων μετατοπίσεων (εν ονόματι παλμοί εκτίναξης - fling pulses), σε γειτονικές τοποθεσίες προς τις οποίες κινείται το ρήγμα.



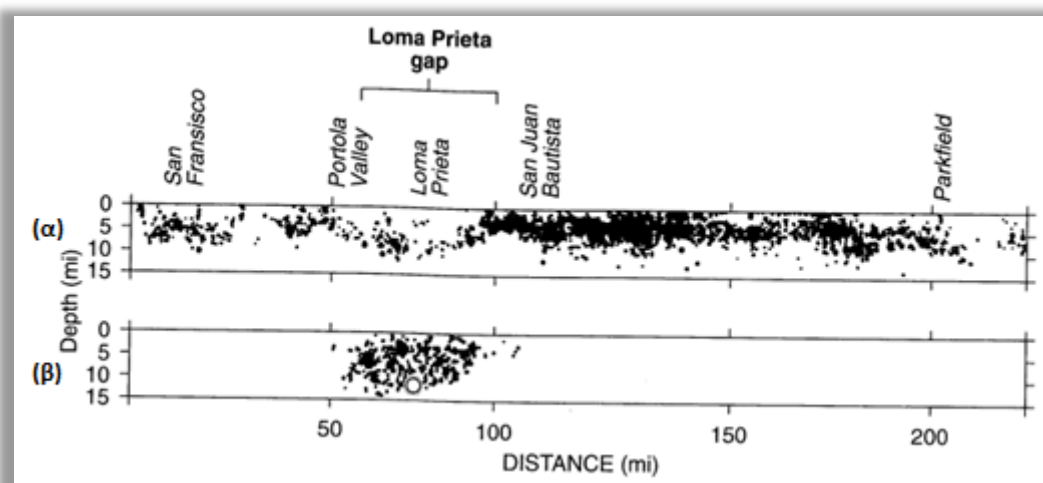
Εικόνα 2-17: Σχηματική αναπαράσταση των κατευθυντικών επιπτώσεων στις εδαφικές κινήσεις στις τοποθεσίες προς (δεξιά) και από (αριστερά) από την κατεύθυνση του ρήγματος μετασηματισμού. Η υπέρθεση παλμών, όπως φαίνεται δεξιά, μπορεί να οδηγήσει σε ισχυρούς παλμούς εκτίναξης (fling pulses) στις τοποθεσίες πλησίον του ρήγματος. (Πηγή: Singh, 1985)

2.2.3.1 Συσχέτιση της θεωρίας ελαστικότητας με την επανάληψη σεισμών

Η θεωρία ελαστικότητας υπονοεί το γεγονός ότι η εμφάνιση των σεισμών ανακουφίζει τις πιέσεις κατά μήκος τμήματος του ρήγματος όπου η ρήξη πραγματοποιείται, και ότι δεν θα επαναληφθεί στο συγκεκριμένο τμήμα μέχρι να συσσωρευτεί ξανά η κατάλληλη ποσότητα ενέργειας. Συνεπώς, οι πιθανότητες εμφάνισης ενός σεισμού σε συγκεκριμένη τοποθεσία πρέπει να συσχετιστούν, με κάποιο τρόπο, με τον χρόνο που έχει περάσει από τον τελευταίο σεισμό και, πιθανότατα, την ενέργεια που τότε ελευθερώθηκε. Υπό ένα πιθανολογικό πρίσμα, συνεπώς, μεμονωμένοι σεισμοί σε συγκεκριμένο τμήμα ρήγματος δεν πρέπει να θεωρούνται τυχαία, ανεξάρτητα συμβάντα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι σημαντικό κατά την ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας (seismic hazard analysis).

Επειδή οι σεισμοί «ανακουφίζουν» την ελαστική ενέργεια που συσσωρεύεται στα ρήγματα, θα έπρεπε να είναι πιο πιθανή η εμφάνιση τους σε περιοχές όπου έχει παρατηρηθεί μικρή έως και καθόλου σεισμική δραστηριότητα, για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Παρακολουθώντας και καταγράφοντας την κίνηση των ρηγμάτων και το ιστορικό της σεισμικής δραστηριότητας κατά μήκος αυτών, είναι πιθανό να αναγνωριστούν κενά στην σεισμική δραστηριότητα σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Σύμφωνα με την θεωρία της ελαστικότητας, η κίνηση συμβαίνει ασεισμικά ή η ελαστική ενέργεια συσσωρεύεται κοντά σε αυτά τα «σεισμικά κενά» (seismic gaps). Οπότε, στις περιοχές όπου είναι γνωστό ότι αυτό συμβαίνει, τα σεισμικά κενά θα έπρεπε να εκπροσωπούν τις περιοχές που είναι πιθανό να πληγούν από σεισμό. Ένας μεγάλος αριθμός σεισμικών κενών έχουν αναγνωριστεί παγκοσμίως, με χαρακτηριστικό παράδειγμα να αποτελεί το κενό Loma Prieta (Loma Prieta gap), που

αποτελεί τμήμα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα (San Andreas fault) και απεικονίζεται στην Εικόνα 2-18, στο οποίο έλαβε χώρα καταστροφικός σεισμός με μέγεθος σεισμικής ροπής 6,9 (en.wikipedia.org/wiki/1989_Loma_Prieta_earthquake, 2015). Τελικώς, η χρήση των σεισμικών κενών προσφέρει τον χώρο για βελτίωση των διαδικασιών της πρόβλεψης των σεισμών και της εκτίμησης του σεισμικού ρίσκου.



Εικόνα 2-18: Τομή ενός τμήματος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα από βόρεια του San Francisco μέχρι νότια του Parkfield: (α) σεισμικότητα των 20 ετών πριν τον σεισμό Loma Prieta του 1989, επισημαίνοντας το σεισμικό κενό Loma Prieta; (β) ο κύριος σεισμός και οι μετασεισμοί του 1989. (Πηγή: Housner et al., 1990)

2.2.3.2 Συσχέτιση της θεωρίας ελαστικότητας με το τεκτονικό περιβάλλον

Η ελαστική θεωρία επίσης υπονοεί ότι τα τεκτονικά περιβάλλοντα τα οποία είναι ικανά να αποθηκεύσουν διαφορετικές ποσότητες ενέργειας, θα παράξουν και σεισμούς διαφορετικού μεγέθους. Ας ληφθεί ως παράδειγμα το τεκτονικό περιβάλλον στην περιοχή εγγύτητας ενός ορίου πλάκας του τύπου εξαπλωθείσας κορυφογραμμής (spreading ridge boundary). Πρώτον, ο φλοιός είναι λεπτός; για αυτό και ο όγκος του βράχου στον οποίο μπορεί να αποθηκευθεί ελαστική ενέργεια είναι μικρός. Δεύτερον, η οριζόντια συνιστώσα της σχετικής κίνησης των πλακών έχει επιμηκυνθεί; για αυτό και η πίεση στο επίπεδο του ρήγματος (fault plane), μαζί με την δύναμη της ρήξης, έχουν χαμηλή τιμή. Τρίτον, ο βράχος είναι σχετικά θερμός και εύπλαστος, άρα δεν θα ελευθερώσει ελαστική ενέργεια σπασμωδικά. Λαμβάνοντας τους υπόψη, οι προαναφερθέντες παράγοντες περιορίζουν την συνολική ελαστική ενέργεια που μπορεί να συσσωρευτεί σε ένα αποκλίνων όριο πλάκας και εξηγούν την παρατηρηθείσα απουσία πολύ μεγάλων σεισμών σε αυτό το είδος ορίων.

Μέχρι ο ωκεανικός φλοιός να μετακινηθεί από ένα όριο εξαπλωθείσας κορυφογραμμής σε μία ζώνη καταβύθισης, έχει ψυχθεί, αποκτήσει μεγαλύτερο πάχος και ισχυροποιηθεί. Η σχετική κίνηση των πλακών, σε αυτή την περίπτωση, είναι συγκλίνουσα (όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.2.2.2), άρα οι θλιπτικές τάσεις αυξάνουν την δύναμη ρήξης στο επίπεδο του ρήγματος. Επειδή τα όρια των πλακών στις ζώνες καταβύθισης είναι κεκλιμένα, η περιοχή πιθανής ρήξης έχει

μεγάλη έκταση. Όλοι αυτοί οι παράγοντες υποστηρίζουν τις πιθανότητες συσσώρευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας η οποία, όταν ελευθερωθεί, μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μεγάλων σεισμών. Στην πραγματικότητα, οι μεγαλύτεροι σεισμοί που έχουν συμβεί και καταγραφεί αποδίδονται στις ζώνες καταβύθισης.

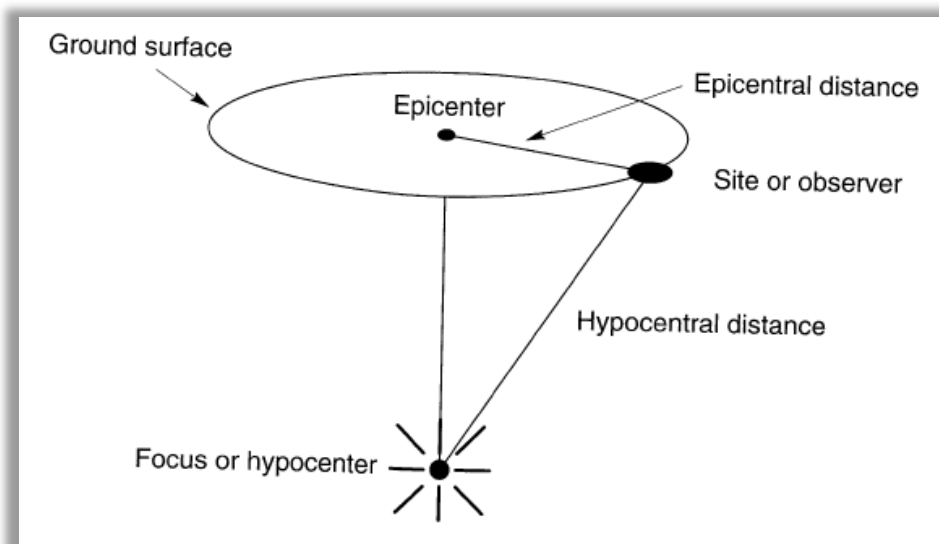
Στα ρήγματα μετασχηματισμού, ο βράχος είναι γενικά ψυχρός και εύθραυστος αλλά μεγάλες θλιπτικές τάσεις, συνήθως, δεν εμφανίζονται επειδή τα όρια έχουν συχνά κάθετη μορφή και η κίνηση, τυπικά, είναι οριζόντιας ολίσθησης. Επειδή το βάθος αυτών των ρηγμάτων είναι περιορισμένο, η συνολική ποσότητα ελαστικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευθεί ελέγχεται από το μήκος της ρήξης. Έχουν καταγραφεί αρκετοί, μεγάλης έκτασης, σεισμοί που εμπλέκουν ρήξεις μεγάλου μήκους (αρκετών χιλιομέτρων) σε τέτοιου είδους ρήγματα, ωστόσο σημαντικά μεγάλοι σεισμοί είναι πιθανό να μην παρατηρηθούν.

2.2.4 Η γεωμετρική θεώρηση και οι παράμετροι ενός σεισμού

Με σκοπό την καλύτερη δυνατή κατανόηση του φαινομένου του σεισμού, οφείλεται, επιπρόσθετα των προαναφερθέντων βασικών εννοιών, να θεωρηθεί γεωμετρικά και να παρουσιαστούν οι σημαντικότεροι εκ των παραγόντων του.

2.2.4.1 Γεωμετρική θεώρηση του φαινομένου

Για να περιγραφεί η τοποθεσία ενός σεισμού, καθίσταται απαραίτητη η χρήση περιγραφικής ορολογίας. Οι σεισμοί παράγονται από ρήξεις του εδάφους κατά μήκος ενός ρήγματος, και ακόμη και αν η ρήξη μπορεί να περιλαμβάνει χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα επιφάνειας του επιπέδου του ρήγματος, πρέπει να ξεκινά από κάπου. Το σημείο στο οποίο ξεκινά η ρήξη και από το οποίο προέρχονται τα πρώτα σεισμικά κύματα ονομάζεται εστία (focus) ή υπόκεντρο (hypo-center) του σεισμού. Ξεκινώντας από την εστία, η ρήξη εκτείνεται κατά μήκος του ρήγματος σε ταχύτητες 2 – 3 km/sec (Bolt, 1989). Παρόλο που η ρήξη του ρήγματος μπορεί να επεκταθεί μέχρι την εδαφική επιφάνεια, η εστία εντοπίζεται σε ένα εστιακό ή υποκεντρικό βάθος (focus depth or hypocentral depth) κάτω από την επιφάνεια. Το σημείο στην εδαφική επιφάνεια, που αποτελεί την προβολή του εστιακού σημείου σε αυτήν, ονομάζεται επίκεντρο (epicenter) του σεισμού. Η απόσταση στην εδαφική επιφάνεια μεταξύ ενός τοπίου ή ενός παρατηρητή και του επικέντρου είναι γνωστή ως επικεντρική απόσταση (epicentral distance), και η απόσταση μεταξύ του ίδιου τοπίου ή του ίδιου παρατηρητή και την εστία ονομάζεται εστιακή ή υποκεντρική απόσταση (focal or hypocentral distance) (Εικόνα 2-19).



Εικόνα 2-19: Γεωμετρική θεώρηση της τοποθεσίας του σεισμού, για τις ανάγκες της παραπάνω περιγραφής. (Πηγή: Kramer, 1996)

2.2.4.2 Παράμετροι των σεισμών

Οι βασικότεροι παράμετροι, οι οποίες βοηθούν στην πληρέστερη και, συνεπώς, καλύτερη κατανόηση του φαινομένου του σεισμού είναι το μέγεθος και η εκλυόμενη εκ αυτού ενέργεια του. Στόχος των δύο παραμέτρων αποτελεί η, όσο το δυνατόν, ακριβέστερη εκτίμηση του μεγέθους των καταστροφών που μπορεί να αποφέρει ένας σεισμός.

Μέγεθος ενός σεισμού : Κλίμακες σεισμικού μεγέθους

Ο Charles Richter, Αμερικάνος σεισμολόγος, εισήγαγε το 1930 την έννοια του σεισμικού μεγέθους στην μελέτη του φαινομένου. Η βασική του ιδέα ήταν πολύ απλή: γνωρίζοντας την απόσταση μεταξύ σειсмоγράφου και επικέντρου και καταγράφοντας το μέγιστο εύρος ταλάντωσης, θα ήταν δυνατή η εμπειρική εκτίμηση του μεγέθους του σεισμού. Η αρχική κλίμακα του Richter (M_L) επεκτεινόταν σε καταγραφές σεισμών οποιασδήποτε απόστασης και με εστιακό βάθος 0 έως 700 χιλιόμετρα. Όμως, όπως έχει προαναφερθεί, λόγω της ύπαρξης δύο ειδών κυμάτων (χώρου και επιφανείας), γίνεται διάκριση σε δύο κλίμακες, δηλαδή στη κλίμακα m_b για τα κύματα χώρου και στην κλίμακα M_s για τα κύματα επιφανείας (Σακελλαρίου, 2008), οι οποίες ορίζονται ως εξής (με τις εξισώσεις 2.5 και 2.6 αντίστοιχα) :

$$m_b = \log_{10}\left(\frac{A}{T}\right) + Q(D, h) \quad (2.5)$$

$$M_s = \log_{10}\left(\frac{A}{T}\right) + 1,66 \log_{10}(D) + 3,3 \quad (2.6)$$

όπου : A : εύρος εδαφικής κίνησης [μm]

T : χρονική περίοδος [sec]

$Q(D, h)$: συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από την γωνιακή απόσταση D [μοίρες] μεταξύ επικέντρου και σταθμού και του εστιακού βάθους h [km]

Η κλίμακα m_b , βάσει πρόσφατων παρατηρήσεων, χρησιμοποιεί διαμήκη κύματα P που βασίζονται σε χρονικές περιόδους ενός δευτερολέπτου, ενώ η κλίμακα M_s χρησιμοποιεί επιφανειακά κύματα Rayleigh με περιόδους από 18 έως 22 δευτερόλεπτα. Αρχικά, είχε θεωρηθεί ότι η σεισμική ενέργεια είναι ανεξάρτητη της περιόδου T. Οι μετέπειτα έρευνες, όμως, έδειξαν ότι οι πολύ μεγάλοι σεισμοί με μεγάλες επιφάνειες ρήξης χαρακτηρίζονται από ενέργεια μεγάλων περιόδων, με αποτέλεσμα η κλίμακα m_b να υποτιμά το μέγεθος τους. Προτάθηκε, λοιπόν, από τον Ιάπωνα σεισμολόγο Hiroyo Kanamori μια νέα κλίμακα, η οποία βασίζεται σε παραμέτρους που εξαρτώνται από το σεισμολόγο ρήγμα μελέτης και το μέγεθος της σχετικής μετατόπισης - ολίσθησης των τοιχωμάτων του. Αυτή η κλίμακα ονομάζεται κλίμακα σεισμικής ροπής (seismic moment). Πρέπει, ωστόσο, να οριστεί πρώτα η σεισμική ροπή :

$$M_o = \mu S d \quad (2.7)$$

όπου : μ (ή G) : μέτρο διάτμησης ή ολίσθησης των πετρωμάτων

S : εμβαδόν της επιφάνειας του ρήγματος [km^2]

d : μέση ολίσθηση ρήγματος

Το μέγεθος της σεισμικής ροπής ορίζεται με την εξίσωση 2.8, με μονάδες της σεισμικής ροπής M_o σε dyn (x) cm :

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_o) - 10,7 \quad (2.8)$$

Σεισμική ενέργεια

Η συνολική σεισμική ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί μέτρο του μεγέθους των καταστροφών που αποφέρει. Με ολοκλήρωση σειсмоγραφημάτων από σεισμούς αναφοράς των Gutenberg & Richter (1956), προέκυψε η σχέση 2.9, μεταξύ της εκλυόμενης ενέργειας E και της κλίμακας μεγέθους M_s :

$$\log_{10} E = 11,8 + 1,5 M_s \quad (2.9)$$

, όπου η ενέργεια E μετριέται σε ergs. Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι, για αύξηση του μεγέθους M_s κατά μία μονάδα, αντιστοιχεί ενέργεια 32 φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη (Σακελλαρίου, 2008). Στον Πίνακα 2.2 διαφαίνεται η πολύ μεγάλη διαφορά έκλυσης ενέργειας ανά μονάδα μεγέθους Richter, η οποία εκφράζεται σε ισοδύναμη μάζα εκρηκτικής ύλης TNT σε αντιστοιχία με το μέγεθος της κλίμακας Richter.

Πίνακας 2.2 : Αντιστοίχιση διαφορετικών μεγεθών της κλίμακας Richter με την απαιτούμενη ισοδύναμη μάζα σε εκρηκτική ύλη TNT για την έκλυση ίσου ποσού ενέργειας. Επίσης, παρατίθενται καταγραφέντα παραδείγματα, για καλύτερη κατανόηση της αντιστοίχισης. (Πηγή: Σακελλαρίου, 2008)

Μέγεθος Richter	Ισοδύναμη μάζα TNT	Παράδειγμα
-1,5	1 gr	Θραύση δείγματος βράχου
1,0	170 gr	Ανατίναξη σε εργοστάσιο
1,5	0,907 kg	
2,0	5,9 kg	
2,5	28,6 kg	
3,0	180 kg	
3,5	453,6 kg	Ανατίναξη σε μεταλλείο
4,0	5442 kg	
4,5	29024 kg	Τυφώνας
5,0	180493 kg	
5,5	453500 kg	
6,0	5686890 kg	Σεισμός Καλαμάτας
6,5	28615850 kg	Σεισμός Αλκυονίδων
7,0	180493 Mg	Σεισμός Αταλάντης
7,5	907000 Mg	Σεισμός Φιλιατρών
8,0	5686890 Mg	Σεισμός Ρόδου
8,5	28615850 Mg	Anchorage, CA Quake, 1964
9,0	181399093 Mg	Σεισμός Χιλής, 1960
10,0	5,7 δις Mg	Ρήγμα διατρέχον όλη τη Γη
12,0	1 τρις Mg	Θραύση της Γης στα δύο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΕΙΔΗ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Βασικό θέμα του παρόντος κεφαλαίου αποτελούν οι βασικοί γεωκινδύνοι που καθίσταται πιθανόν να εμφανιστούν στην περιοχή διέλευσης ενός αγωγού. Οι γεωκίνδυνοι είναι αντικείμενα μελέτης της γεωτεχνικής μηχανικής, η οποία «αποτελεί ένα πολύ ευρύ επιστημονικό πεδίο, συντελούμενη από συνιστώσες τεχνικής γεωλογίας, τεχνικής σεισμολογίας, εδαφομηχανικής και βραχομηχανικής» (Σακελλαρίου, 2008).

Οι γεωκίνδυνοι αποτελούν φυσικές καταστροφές που εμφανίζονται σε στατικές και σεισμικές συνθήκες. Ουσιαστικά, ο γεωκίνδυνος είναι ένα φαινόμενο που ενδέχεται να προκληθεί από τις γεωλογικές διεργασίες ή/και την ανθρώπινη δραστηριότητα και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές συνέπειες στο περιβάλλον το οποίο διαδραματίζεται (<https://en.wikipedia.org/wiki/Geohazard>, 2015). Τα βασικότερα είδη γεωκινδύνων είναι τα εξής :

- Κατολισθήσεις (χερσαίες και υποθαλάσσιες)
- Ροές συντριμμίων
- Αυξημένη συγκέντρωση υδρογονανθράκων
- Ζώνες υπερπίεσης
- Ηφαιστειακή δραστηριότητα
- Σεισμοί
- Παλιρροϊκά κύματα και περιοχές seiche
- Φαινόμενα karst
- Ρευστοποίηση του εδάφους
- Γεωλογικά ρήγματα

Κρίνεται, ωστόσο, απαραίτητο να τονιστεί ότι στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται τα είδη γεωκινδύνων που ενδιαφέρουν αμεσότερα την κατασκευή του αγωγού. Ειδικότερα, οι γεωκίνδυνοι αναφέρονται σε στατικές και σεισμικές συνθήκες, ωστόσο, το μεγαλύτερο βάρος εντοπίζεται στην δεύτερη κατηγορία, η οποία και αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο.

3.2 Κίνδυνος εδαφικής φόρτισης λόγω σεισμικών κυμάτων

3.2.1 Γενικά

Οι δύο βασικές και ευρύτερες κατηγορίες κινδύνων που ταλανίζουν την κατασκευή του αγωγού αποτελούν η εδαφική φόρτιση λόγω σεισμικών κυμάτων και οι μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις. Σημαντικότερη και πιο συχνά εμφανιζόμενη σε όλα τα είδη αγωγών αποτελεί η δεύτερη κατηγορία, ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί

και η πρώτη με σκοπό την πληρέστερη θεώρηση των πιθανών κινδύνων για την κατασκευή.

Κατά την σεισμική ανάλυση και τον σχεδιασμό των σημαντικών και/ή ευαίσθητων κατασκευών, η εκπόνηση μελέτης ενίσχυσης (amplification study) και των αντίστοιχων αναλύσεων απόκρισης εδάφους (ground response analyses) θεωρούνται το πρώτο σημαντικό και απαραίτητο βήμα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση κατασκευών μεγάλου μήκους, όπως γραμμές αγωγών και γέφυρες, οι οποίες συνήθως διέρχονται από περιοχές με πολλές τοπογραφικές ιδιαιτερότητες και ανωμαλίες, η επιτυχία στον υπολογισμό του σεισμικής καταπόνησης εναπόκειται, πρωταρχικώς, στην ικανότητα του υπεύθυνου γεωτεχνικού μηχανικού να εκτιμήσει, ρεαλιστικά, το μέγεθος του φορτίου των σεισμικών κυμάτων στο, εγγύς της κατασκευής, έδαφος υπό συνθήκες κενού χώρου (θεωρείται ότι αρχικά δεν υπάρχει η κατασκευή). Το πεδίο δυναμικών τάσεων που αναπτύσσεται στο έδαφος είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην βάση των εδαφικών αποθέσεων και των τοπικών συνθηκών (local site conditions). Γενικά, η χρήση του όρου «τοπικές συνθήκες» χρησιμοποιείται για την περιγραφή του εδαφικού υλικού και των γεωμορφικών και τοπογραφικών συνθηκών (Ψαρρόπουλος κ.α., 2012).

Η μελέτη ενίσχυσης και η ανάλυση εδαφικής απόκρισης πρέπει να βασιστούν στα διαθέσιμα γεωλογικά, γεωτεχνικά και τοπογραφικά δεδομένα (ορισμός του σεισμικού υποβάθρου, εδαφικού προφίλ – ταξινόμηση, ιδιοτήτων εδάφους) και τα σεισμολογικά δεδομένα στο σεισμικό υπόβαθρο (τιμές αιχμής των παραμέτρων εδαφικής κίνησης – peak ground motion parameters, φάσμα απόκρισης – response spectra, επιταχυνσιογραφήματα – accelerograms), όπως αναλύονται στο υποκεφάλαιο 3.5.

3.2.2 Γεωμορφικές συνθήκες και οι επιπτώσεις τους

Καταγραφές και αναλύσεις (π.χ. Aki [1988], Finn [1991], Gatmiri & Arson [2008]) έχουν δείξει ότι, εκτός από τις συνθήκες των εδαφικών υλικών και οι γεωμορφικές συνθήκες τείνουν να αλλάζουν το πλάτος, την συχνότητα, την διάρκεια και την χωρική μεταβλητότητα της εδαφικής κίνησης. Για αυτό και η συμπερίληψη τους στο σεισμικό σχεδιασμό ευαίσθητων και μεγάλου μήκους κατασκευών, όπως οι αγωγοί, κρίνεται ουσιαστική. Στην παρούσα στιγμή επισημαίνεται το γεγονός ότι οι σεισμολογικές μελέτες συνήθως αγνοούν τις τοπικές συνθήκες, εκτιμώντας τα επίπεδα των επιταχύνσεων μόνο στο σεισμικό υπόβαθρο (seismic bedrock), το οποίο, γενικά, ορίζεται ως η επιφάνεια μεταξύ των μαλακών εδαφικών αποθέσεων και του υποκείμενου τους σκληρού βράχου. Είναι προφανές ότι, σε περίπτωση που οι εδαφικές ζώνες δεν υφίστανται, το υπόβαθρο συμπίπτει με την επιφάνεια του εδάφους, γεγονός που καθιστά πολλές φορές απαραίτητη την πείρα εντοπισμού του σεισμικού υποβάθρου, αφού οι όροι μαλακό και σκληρό δεν θεωρούνται πλήρως ορισμένοι.

Στην γεωτεχνική μηχανική, αποτελεί συχνή διαδικασία η εκτίμηση της εδαφικής σεισμικής απόκρισης εκτελώντας μονοδιάστατες αναλύσεις, υποθέτοντας ότι οι εδαφικές στρώσεις είναι παράλληλες μεταξύ τους και άπειρου μήκους, αδιαφορώντας

για την πιθανή επιρροή των γεωμορφικών συνθηκών. Από την άλλη πλευρά, αντικειμενικές δυσκολίες στην κατηγοριοποίηση της μεγάλης ποικιλίας των γεωμορφικών και τοπογραφικών συνθηκών καθιστούν δύσκολη την ένταξη τέτοιων παραγόντων σε απλοποιημένες και κωδικοποιημένες διαδικασίες. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, εκπονούνται δισδιάστατες ή και τρισδιάστατες αναλύσεις των τοπικών εδαφικών συνθηκών, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στην καλύτερη θεώρηση της εκτίμησης του προβλήματος. Οι δισδιάστατες αναλύσεις, οι οποίες είναι γραμμικής μορφής, καθώς και καταγραφές από μικρές δονήσεις και σεισμούς μικρού μεγέθους, έχουν δείξει πολύ καθοριστικές τοπικές συνθήκες. Ωστόσο, υπήρξαν μελετητές που αμφισβήτησαν το μέγεθος αυτής της επιδείνωσης, όπως οι Zhang & Παπαγεωργίου (1996), οι οποίοι προσομοίωσαν τη σεισμική απόκριση της λεκάνης απορροής της περιοχής Marina District του San Francisco της Καλιφόρνιας κατά τον σεισμό Loma Prieta του 1989 χρησιμοποιώντας μία ισοδύναμη γραμμική μέθοδο για να συμπεριλάβουν την μη γραμμική εδαφική συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι στην περίπτωση ισχυρής κινητικής διέγερσης (strong-motion excitation) οι μεταβολές λόγω τοπικών συνθηκών, αν και υπαρκτές, δεν ήταν το ίδιο ισχυρές όσο στο παράδειγμα της ασθενούς κινητικής διέγερσης. Επιπρόσθετα, η παραπάνω μελέτη υπογράμμισε το ότι η διάχυση ενέργειας κατά την διάρκεια της ισχυρής κινητικής διέγερσης αποσβένει σημαντικά τα επιφανειακά κύματα και άρα η απόκριση κυριαρχείται από τα σχεδόν κάθετα διαδιδόμενα κύματα (Ψαρρόπουλος κ.α., 2012).

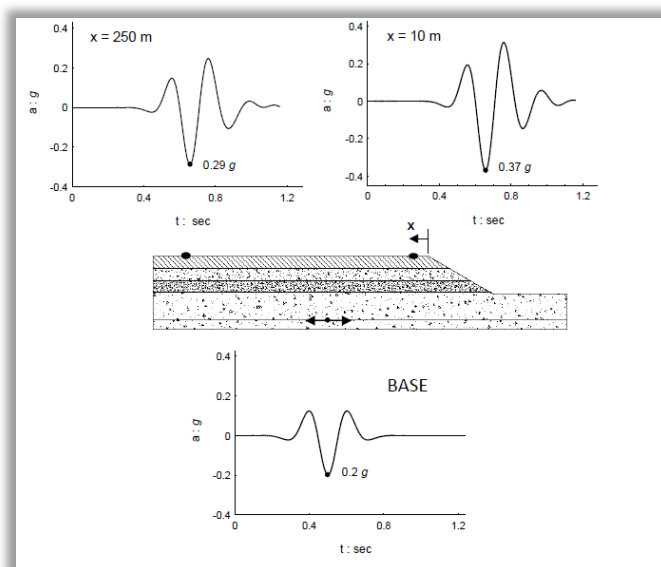
3.2.3 Τοπογραφικά χαρακτηριστικά και οι επιπτώσεις τους

Όπως προαναφέρθηκε, η κίνηση της εδαφικής επιφάνειας μπορεί να μεταβληθεί και λόγω ύπαρξης τοπογραφικών ιδιαιτεροτήτων και ανωμαλιών. Οι σεισμικές επιπτώσεις της μη συχνής τοπογραφίας όπως η ανώμαλη εδαφική επιφάνεια, τα φαράγγια, οι λόφοι, τα ρήγματα και οι βραχώδεις όγκοι, για τις κατασκευές έχουν αποδειχθεί πολλάκις επιβλαβείς, ιδιαίτερα πλησίον αυτών. Επιπρόσθετα, υπάρχουν άφθονες και καθοριστικές αποδείξεις της τοπογραφικής ενίσχυσης σε ασθενή σεισμικά περιβάλλοντα, αλλά περιορισμένες στην περίπτωση ισχυρών και καταστροφικών σεισμικών δονήσεων. Επίσης, ένας μεγάλος αριθμός αναλυτικών και αριθμητικών μελετών έχουν παρέχει σημαντικά υποστηρικτικά στοιχεία πάνω στην σημασία των τοπογραφικών χαρακτηριστικών.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους μελέτης αποτελεί αυτή που εκπόνησε ο Ψαρρόπουλος (2001) στα πλαίσια των καταστροφών που είχε υποστεί η συνοικία Αδάμες του Δήμου Κηφισιάς κατά την διάρκεια του σεισμού της Πάρνηθας του 1999, μεγέθους M_s 5,9. Στην συνοικία παρατηρήθηκε μεγάλη συγκέντρωση ζημιών σε κατοικίες και βιομηχανικά κτήρια, συγκεκριμένα στο τμήμα που συνορεύει με τις όχθες του φαραγγιού του ποταμού Κηφισού, στο βαθύτερο του σημείο. Με σκοπό την εξερεύνηση των τοπογραφικών συνθηκών και το πραγματικό εδαφικό προφίλ και το πώς και αν συμμετείχε στην παρατηρηθείσα ανομοιόμορφη διανομή των ζημιών εντός μίας ζώνης πλάτους 300 μέτρων από την άκρη του φαραγγιού, περαιώθηκαν αναλύσεις κυματικής διάδοσης (wave propagation analyses) σε μία και δύο

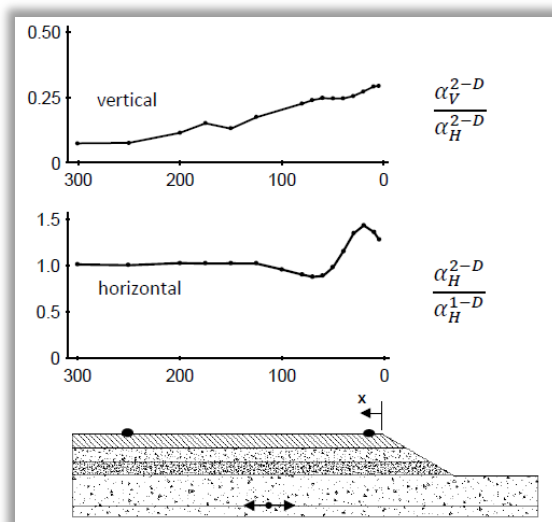
διαστάσεις. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία (finite elements) και φασματικά στοιχεία (spectral elements). Για αποφυγή νόθων αντανάκλασεων των κυμάτων στα όρια, οι δισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων αξιοποίησαν την μέθοδο αποτελεσματικής σεισμικής διέγερσης (seismic excitation method) του Bielak, ενώ τα εδαφικά επίπεδα και η αντίστοιχη δυσκαμψία τους καθορίστηκαν από δέκα γεωτρήσεις SPT και τέσσερις ελέγχους παράλληλων γεωτρήσεων (cross-hole tests). Ως διέγερση, χρησιμοποιήθηκαν κυματισμοί Ricket (Ricket wavelets) και έξι ρεαλιστικά επιταχυνσιογραφήματα; δύο από τα τελευταία επιλέχθηκαν από την βιβλιογραφία και τέσσερα βασίστηκαν σε τέσσερις ισχυρές δονήσεις, όπως καταγράφηκαν στην Κεντρική Αθήνα.

Στις Εικόνες 3-1 και 3-2 είναι εμφανές ότι οι δισδιάστατες τοπογραφικές επιπτώσεις ήταν ουσιώδεις μόνο εντός μίας ζώνης 50 μέτρων από το άκρο του φαραγγιού, αλλά αυτές οι επιπτώσεις έλαβαν υπόσταση μόνο στην παρουσία μαλακών εδαφικών υλικών, τα οποία εντοπίστηκαν σε ένα ρηχό βάθος στη σύνταξη του εδαφικού προφίλ.



Εικόνα 3-1: Υπολογισθέντα χρονικά ιστορικά στα σημεία $x=50\text{ m}$ και $x=250\text{m}$ στην περίπτωση διέγερσης του παλμού Ricket με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA = 0,2g$. Επισημαίνεται ότι η επιτάχυνση στο ελεύθερο πεδίο ($=0,29g$) έχει ενισχυθεί στο άκρο του φαραγγιού ($=0,37g$). (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

Ο αποκαλούμενος «παράγοντας τοπογραφικής επιδείνωσης» (Topographic Aggravation Factor) κυμαίνεται από 1,5 έως 2 σε ένα ευρείας συχνότητας κανάλι το οποίο καλύπτει τις σημαντικές συχνότητες διέγερσης. Τέλος, στην τοποθεσία τεσσάρων κατεστραμμένων κτηρίων, σχεδόν 250 μέτρα από το άκρο του φαραγγιού, οι δισδιάστατες τοπογραφικές επιπτώσεις είναι αμελητέες, αλλά τα ειδικά εδαφικά προφίλ ενισχύουν μονοδιάστατα και τις έξι εδαφικές διεγέρσεις σε φασματικά επίπεδα επιτάχυνσης που συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με την παρατηρηθείσα ένταση των καταστροφών.



Εικόνα 3-2: Κατανομή της κανονικοποιημένης "παρασιτικής" εγκάρσιας επιφανειακής επιτάχυνσης και η κανονικοποιημένη οριζόντια συνιστώσα της επιφανειακής επιτάχυνσης στην περίπτωση διέγερσης παλμού Ricker. (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

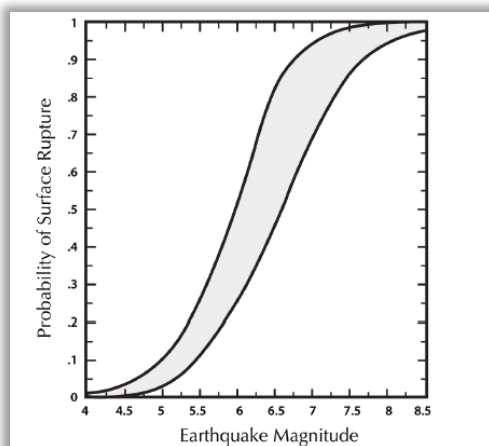
3.3 Γεωκίνδυνοι και μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις

Οι μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις (PGDs : Permanent Ground Deformations) αποτελούν την δεύτερη ευρύτερη κατηγορία κινδύνων που αντιμετωπίζουν οι κατασκευές σε περίπτωση σεισμού. Όπως προαναφέρθηκε, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον σεισμικό σχεδιασμό της γραμμής του αγωγού και αντιμετωπίζονται, γενικά, ως ένα πιο δριμύ είδος φόρτισης από εκείνο που προκαλούν τα σεισμικά κύματα. Αυτό συμβαίνει διότι οι αξονικές και οι εφελκυστικές τάσεις προκαλούμενες στον αγωγό από μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις μπορεί να αποκτήσουν μεγάλο μέγεθος οδηγώντας στην ρήξη του, είτε λόγω εφελκυσμού (tension) είτε λόγω τοπικού λυγισμού (local buckling). Αυτές οι παραμορφώσεις μπορεί να προκληθούν από τα υπάρχοντα ρήγματα, την ενδεχόμενη αστάθεια πρανών και την πιθανή ρευστοποίηση εδάφους και ανοδική ανάταση, οι οποίοι αποτελούν τους γεωκινδύνους ενδιαφέροντος της εργασίας και συμπεριλαμβάνονται στην μετέπειτα σύνταξη της διαδικασίας χάραξης της διαδρομής του αγωγού.

3.3.1 Ρήγματα

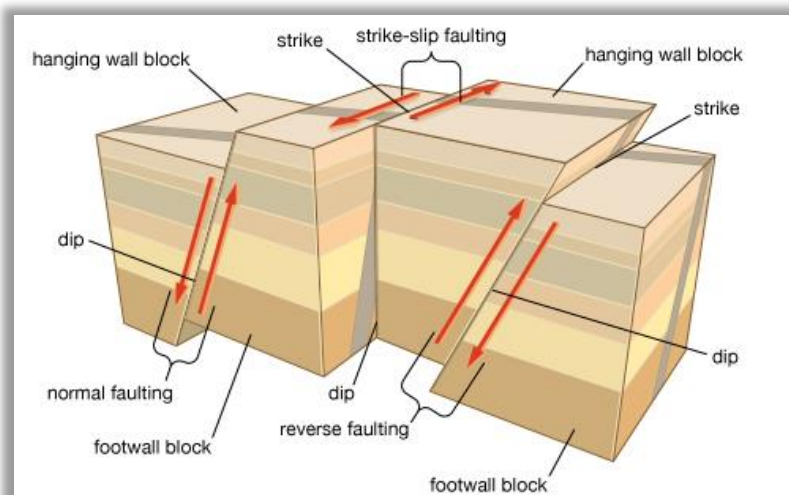
Όπως αναλύθηκε στα υποκεφάλαια 2.2.1 και 2.2.2, οι πηγές των σεισμών εντοπίζονται πολύ κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος των ρηγμάτων στον φλοιό της Γης. Εάν το μέγεθος του σεισμού είναι αρκετά μεγάλο, η μετατόπιση του εδάφους (offset) διαδίδεται μέχρι την επιφάνεια, με αποτέλεσμα επιφανειακή ρήξη ή επιφανειακές εκφράσεις μίας βιαίας μετατόπισης ρηγματος. Οι Youngs et al., εν έτι 2003, παρουσίασαν έναν αριθμό εξισώσεων για την πιθανότητα επιφανειακής ρήξης σε συνάρτηση με το σεισμικό μέγεθος. Στην Εικόνα 3-3, υπάρχει λιγότερο του 10% πιθανότητα για δημιουργία ρήξης από έναν σεισμό $M_s = 5$, περίπου 50% για συμβάντα μεγέθους $M_s \sim 6-6,5$, και πιθανότητα μεγαλύτερη του 90 % για έναν

σεισμό μεγέθους $M_s = 7,5$, χωρίς, ωστόσο, να αποφεύγεται ένας σημαντικός βαθμός αβεβαιότητας.



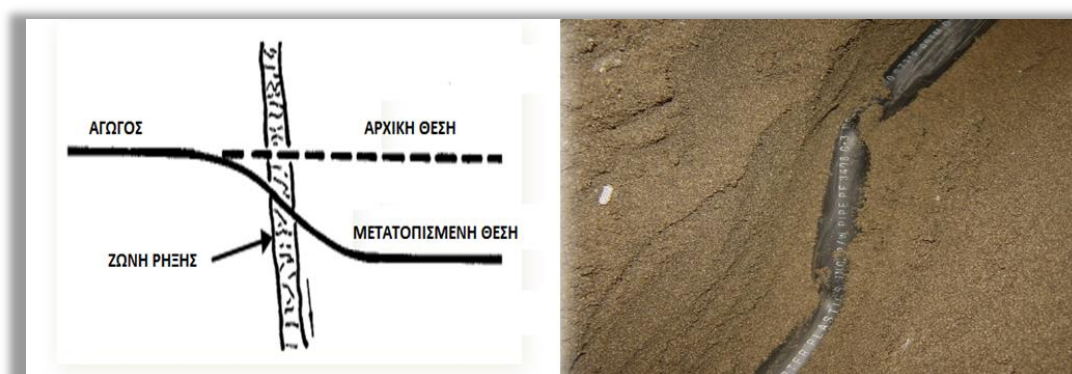
Εικόνα 3-3: Διάγραμμα πιθανοτήτων όπως προέκυψε από τους Youngs et al., όπου στον άξονα Y βρίσκεται η πιθανότητα εμφάνισης ρήγματος και στον άξονα X το σεισμικό μέγεθος M_s . (Πηγή: Youngs et al., 2003)

Τα ρήγματα κατατάσσονται βάσει της κατεύθυνσης της κίνησης ή της ολίσθησης σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους. Οι κύριες μορφές της κίνησης τους περιλαμβάνουν την οριζόντια ολίσθηση (strike-slip), την κανονική κάθετη ολίσθηση (normal-slip) και την ολίσθηση αντίστροφης φοράς (reverse slip), όπως φαίνονται στην Εικόνα 3-4. Σε ένα ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης (strike-slip fault), η μετατόπιση συμβαίνει σε ένα οριζόντιο επίπεδο, η οποία παραμορφώνει μία συνεχή γραμμή αγωγών εφελκύνοντας ή συμπιέζοντας με αποτέλεσμα τον λυγισμό του αγωγού, ανάλογα με την γωνία ρήγματος – αγωγού. Στα ρήγματα κανονικής και αντίστροφης ολίσθησης, η κύρια διεύθυνση της εδαφικής μετατόπισης είναι κάθετη. Όταν η προεξέχουσα πλευρά του ρήγματος κινείται προς τα κάτω, το ρήγμα θεωρείται κανονικής ολίσθησης και παραμορφώνει έναν οριζόντιο αγωγό προκαλώντας κάμψη και αξονικό εφελκυσμό. Όταν η προεξέχουσα πλευρά κινείται προς τα άνω, το ρήγμα θεωρείται αντίστροφης ολίσθησης και προκαλεί αξονική συμπίεση και κάμψη (O' Rourke & Liu, 2012).



Εικόνα 3-4: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων ρηγμάτων. (Πηγή: <http://media-2.web.britannica.com>, 2004)

Σημαντική νύξη, ωστόσο, πρέπει να γίνει στην παραμόρφωση που προκαλείται στον αγωγό από τα ρήγματα. Λόγω των βίαιων εδαφικών μετακινήσεων ο αγωγός υπόκειται σε φόρτιση όταν κινείται σχετικά με το, περιρρέων αυτού, έδαφος. Η Εικόνα 3-5 δείχνει το παραμορφωμένο σχήμα ενός θαμμένου αγωγού ο οποίος εκτίθεται σε ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, προκαλώντας την πλάγια, σχετική μετατόπιση της κατασκευής. Επίσης, είναι εμφανής η άσκηση εφελκυστικών τάσεων και κάμψης του και στις δύο πλευρές του ρήγματος. Όσο αφορά την κάθετη κίνηση ρηγμάτων, η γραμμή του αγωγού παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή. Για μία, ρηγά, θαμμένη γραμμή αγωγού, η αντοχή προς την άνω κίνηση (uplift resistance) του εδάφους είναι τυπικά πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη σε κίνηση προς τα κάτω (downward bearing resistance). Για αυτό και ο αγωγός ενδέχεται να ανεβεί προς τα επάνω με σχετική άνεση, υποδεχόμενος την κάθετη κίνηση του ρήγματος.



Εικόνα 3-5: Αριστερά σχηματική αναπαράσταση της παραμόρφωσης του αγωγού, όταν εκτίθεται σε ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης και δεξιά πείραμα προσομοίωσης των συνθηκών. (Πηγή: ίδια επεξεργασία από : Nyman (2008) και O'Rourke & Liu (2012)).

Για την εκτίμηση και τον σχεδιασμό μίας υπεδάφιας γραμμής αγωγού είναι, λοιπόν, απαραίτητο να αποσαφηνιστούν η τοποθεσία και η κατεύθυνση του ρήγματος, τα χαρακτηριστικά της ολίσθησης και η ζώνη επιρροής του ρήγματος για εκτίμηση της ποσότητας και του είδους της πιθανής μετατόπισης. Λόγω της απώλειας μεθόδων ακριβούς πρόβλεψης των μελλοντικών μετατοπίσεων λόγω ρήγματος και επειδή οι βασικοί μηχανισμοί αυτών των φαινομένων μετρούνται σε όρους γεωλογικής ώρας (δηλαδή η κατασκευή έχει έναν ορίζοντα σχεδιασμού που καθορίζεται από ένα σεισμικό μέγεθος σχεδιασμού), η εκτίμηση και ο σχεδιασμός των διαβάσεων αγωγών από περιοχές ενεργών ρηγμάτων πρέπει να αξιοποιούν την κρίση έμπειρων μηχανικών και τις παρατηρηθείσες μετατοπίσεις ρηγμάτων κατά την διάρκεια προηγούμενων σεισμών. Η προτιμώμενη μέθοδος εκτίμησης της μετατόπισης λόγω ρήγματος είναι η συλλογή ιστορικών και παλαιο-σεισμικών δεδομένων σχετικά με την μετατόπιση και τα αποτελέσματα επιτόπιων ερευνών που ενδέχεται να περιλαμβάνουν τοπογραφικά στοιχεία, παρατηρήσεις γεωμορφικών στοιχείων πληροφοριών κατά μήκος του ρήγματος. Με την ύπαρξη αυτών των δεδομένων, συνήθως οι εκτιμήσεις βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους (Wells & Copper-Smith, 1994) επηρεασμένες από την πείρα και την κρίση του κάθε μηχανικού. Τυπικά, οι διαδικασίες εκτιμήσεων μπορούν να βασιστούν και σε μετατοπίσεις σχεδιασμού (design displacements), που οι Nyman et al. το 2003 πρότειναν να ληφθούν ως τα 2/3 της μέγιστης μετατόπισης που συνδέεται με έναν χαρακτηριστικό σεισμό του ρήγματος, αποτελώντας την «μέγιστη αξιόπιστη μετατόπιση» (maximum credible displacement).

Ισοδύναμα σημαντικός για την διαδικασία σχεδιασμού αποτελεί ο ορισμός της αποδεκτής συμπεριφοράς του αγωγού σε περίπτωση μετατόπισης. Λόγω του ότι η εμφάνιση ρήγματος αποτελεί σπάνιο γεγονός, οι περισσότερες εταιρίες εγκατάστασης δικτύων αγωγών αποδέχονται το ρίσκο της ζημίας με την προϋπόθεση η πίεση του εσωτερικού του αγωγού να διατηρηθεί (π.χ. μη επιθυμητές διαρροές). Ο καθορισμός των κριτηρίων αντοχής του αγωγού πρέπει να οριστεί στις δύο πρώτες φάσεις υλοποίησης του έργου, όπως αυτές αναλύονται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας.

3.3.2 Ρευστοποίηση εδάφους

Η ρευστοποίηση του εδάφους (soil liquefaction) ορίζεται ως «ο μετασχηματισμός ενός κοκκώδους εδάφους από μία στερεά σε μία υγροποιημένη κατάσταση ως συνέπεια της αυξημένης πίεσης των πόρων νερού και της φθίνουσας διατμητικής αντοχής» (Committee on Soil Dynamics, 1978). Η ρευστοποίηση συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διέλευσης των σεισμικών κυμάτων μέσα από κορεσμένες αποθέσεις κοκκωδών υλικών, αφού προκαλείται κυκλική διατμητική παραμόρφωση (cyclic shear deformation) και υποχώρηση των χαλαρών δομών σωματιδίων (loose particulate structures).

Η ρευστοποίηση ως ανεξάρτητο φαινόμενο παρουσιάζει μικρό αριθμό ζημιών στους αγωγούς. Ωστόσο, όταν οδηγεί σε αστοχία εδαφικής ροής (flow failure), πλευρική εξάπλωση (lateral spread), εδαφική ταλάντωση (ground oscillation), ανοδική ανάταση

(buoyant rise) ή υποχώρηση εδάφους (ground settlement) προκαλεί σημαντικές ζημιές στις κατασκευές. Το είδος και η έκταση της εδαφικής αστοχίας εξαρτάται από την γεωμετρία της περιοχής και το βάθος, πάχος και έκταση της προς ρευστοποίηση ζώνης, όπως περιγράφει ο Kramer (1996).

Οι αστοχίες εδαφικής ροής και η πλευρική εξάπλωση θεωρούνται τα πιο σημαντικά είδη ρευστοποίησης για τις υπεδάφειες γραμμές αγωγών. Ειδικότερα, αγωγοί που διέρχονται από ζώνες πλευρικής εξάπλωσης μπορεί να υποκύψουν σε εδαφικές παραμορφώσεις αρκετών μέτρων (Εικόνα 3-6). Σε σημεία διέλευσης του αγωγού πάνω από ποτάμια και πλημμυρισμένες περιοχές, οι αστοχίες εδαφικής ροής και οι πλευρικές εξαπλώσεις τείνουν να εμφανίζονται στις όχθες, όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αρκετά ανεβασμένος. Στην περίπτωση που ο αγωγός περάσει κάθετα από το κύριο ρέμα, ο μετακινημένος όγκος εδάφους θα φορτίσει τον αγωγό αξονικά και θα τον κάμψουν μόνο στις θέσεις εισόδου και εξόδου από το εύρος του ρέματος. Στην περίπτωση όπου περάσει διαγώνια θα δεχτεί συνδυαζόμενο καμπτικό και αξονικό φορτίο κατά το μήκος του. Τέλος, αν η γραμμή των αγωγών ευθυγραμμιστεί παράλληλα με τη κοίτη του ποταμιού, θα φορτιστεί κυρίως καμπτικά.



Εικόνα 3-6: Πλευρική εξάπλωση. Αριστερά σχηματική αναπαράσταση ολίσθησης εδαφικής ζώνης πάνω από ζώνη ρευστοποιημένου ιζήματος και δεξιά μία πραγματική περίπτωση από περιοχή του Καναδά. (Πηγή: Nyman, 2008)

Οι εδαφικές ταλαντώσεις μπορεί να οδηγήσουν τον αγωγό στην έκθεση σε επαναλαμβανόμενους κύκλους καμπτικής και αξονικής καταπόνησης. Ωστόσο, τα επίπεδα έντασης που συνδέονται με τις εδαφικές ταλαντώσεις είναι, γενικά, πολύ χαμηλότερα αυτών που μία σύγχρονη και καλά κατασκευασμένη γραμμή αγωγού μπορεί να αντέξει χωρίς να δείξει σημάδια ενόχλησης (Nyman et al., 2008).

Η ανοδική ανάταση (buoyant rise) ενός αγωγού σε ρευστοποιημένο έδαφος μπορεί να συμβεί όταν το μετατοπισμένο βάρος αυτού του εδάφους ξεπερνά το βάρος του αγωγού και του περιεχομένου του συν την αντίσταση του σε ανοδική κίνηση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, καλά κατασκευασμένες ατσαλένιες γραμμές αγωγών μπορούν να υποδεχθούν το φαινόμενο χωρίς να ξεπεραστεί η καμπτική τους αντοχή, ιδίως αν το φορτίο απλώνεται κατά μήκος πολλών μέτρων. Ωστόσο, μπορεί να αποτελέσει απαραίτητη μία επιδιορθωτική επιχείρηση για την αναπροσαρμογή του αγωγού στο αρχικό του υψόμετρο.

Εκτιμήσεις των ειδών ρευστοποίησης κατά μήκος του αγωγού μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω συστηματικής επίβλεψης των γεωλογικών συνθηκών, αξιολόγησης των επιτόπιων γεωτεχνικών δεδομένων για καθορισμό της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση, εκτίμησης των εδαφικών ροών αστοχίας και των μετατοπίσεων πλευρικής εξάπλωσης κατά μήκος του, εκτίμησης των καταπονήσεων και ανάπτυξης μέτρων άμβλυνσης.

Όσο αφορά την ποσότητα των δεδομένων που αφορούν την περιοχή μελέτης, είναι σπάνια επαρκής για τον αυστηρό προσδιορισμό της μετατόπισης του εδάφους και των εδαφικών αντοχών, ειδικά για αγωγούς μεγάλου μήκους που διασχίζουν απομακρυσμένες περιοχές με πολλές περιοχές που είναι δυνητικά επικίνδυνες για ρευστοποίηση. Πρακτικοί περιορισμοί όπως η έλλειψη πρόσβασης στην τοποθεσία και διαθέσιμων τεχνικών πόρων, οι καθυστερήσεις στην αδειοδότηση και έγκριση των διαδρομών των αγωγών κ.α. οδηγούν σε περιορισμένης έκτασης πληροφορίες. Έτσι, ο προσδιορισμός της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση (liquefaction susceptibility) και η εκτίμηση των πλευρικών μετατοπίσεων απαιτούν κρίσεις βασιζόμενες και στην πείρα.

3.3.3 Κατολισθήσεις και ευστάθεια πρανών

Σύμφωνα με τον Κουμαντάκη (1984) «οι οποιοσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων ασχέτως μορφής, έκτασης και γενεσιουργών αιτίων, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρανή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα, φέρονται με τον γενικό όρο κατολισθήσεις». Οι κατολισθήσεις, λοιπόν, αποτελούν καθοδικές κινήσεις εδαφικών μαζών οι οποίες συμβαίνουν συνήθως υπό στατικές συνθήκες λόγω αλλαγών στις συνθήκες του υδροφόρου ορίζοντα ή στην γεωμετρία των πρανών, όπως η αποκόλληση εδαφικού όγκου. Μπορούν, όμως, να προκληθούν και από εφαρμογή σεισμικών συνθηκών (αδρανειακές δυνάμεις) σε πλαγιά που, τυπικά, υπό στατικές συνθήκες (υγρασία, επίπεδο υδροφόρου ορίζοντα, κλίση) ήταν σταθερή.

Σε ορεινό έδαφος, οι κατολισθήσεις αποτελούν το κύριο γεωκίνδυνο προς αντιμετώπιση. Η βιομηχανική πείρα έχει δείξει ότι το φαινόμενο κυριαρχεί στα στατιστικά ρήξης των αγωγών σε αυτά τα είδη εδαφών. Για παράδειγμα, η BP διαμόρφωσε μία βάση δεδομένων για ρήξεις αγωγών που συσχετίζονται με κατολισθήσεις στα βουνά των Άνδεων (Sweeney, 2004), όπου οι αγωγοί χωρίστηκαν σε δύο είδη:

- «Παλιοί, παραδοσιακοί αγωγοί», οι οποίοι είχαν κατασκευαστεί δίνοντας ελάχιστο βάρος στην έρευνα και την διαχείριση των γεωκινδύνων. Για αυτό το είδος, ο ρυθμός καταστροφών καθορίστηκε στις 2,8/1000 χιλιόμετρα ανά χρόνο.
- «Σύγχρονοι, γεω-μηχανικά σχεδιασμένοι αγωγοί» βασιζόμενοι στις στενές συνεργασίες μεταξύ ειδικών μηχανολόγων και γεωτεχνικών μηχανικών, για

τους οποίους ο ρυθμός καταστροφών υπολογίστηκε στις 0,33/1000 χιλιόμετρα ανά έτος.

Ενδιαφέρον, ωστόσο, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της 6^{ης} αναφοράς του EGIG το 2005 (European Gas Pipeline Incident Data Group), τα οποία αναφέρονταν στην συχνότητα όλων των πιθανών καταστροφών σε γραμμές αγωγών που διασχίζουν επίπεδες περιοχές, όπου οι παρεμβάσεις από τρίτα πρόσωπα κατέχουν το 50%, η κατασκευαστική / υλική αστοχία το 17% και η διάβρωση το 12%, με γενική συχνότητα συμβάντων 0,4/ 1000 χιλιόμετρα ανά έτος. Η συχνότητα συμβάντων λόγω εδαφικής κίνησης είναι 0,08/1000 χιλιόμετρα ανά έτος, ενώ το 52% καταλαμβάνουν οι κατολισθήσεις με 0,04/1000 χιλιόμετρα ανά έτος, συνεπώς το 10% επί του συνολικού ποσοστού των συμβάντων. Αυτή η, σχετικά μικρή, συμμετοχή των κατολισθήσεων στα πιθανά συμβάντα και η δεκαπλάσια, σχεδόν, διαφορά από την συμμετοχή τους στα ορεινά εδάφη ενδέχεται να εξηγείται από την απομακρυσμένη θέση τους (στην πρώτη περίπτωση είναι πολύ μεγάλο το ποσοστό των εξωτερικών παρεμβάσεων) αλλά και επισημαίνει την σημασία τους στο σχεδιασμό αγωγών σε ορεινά εδάφη.



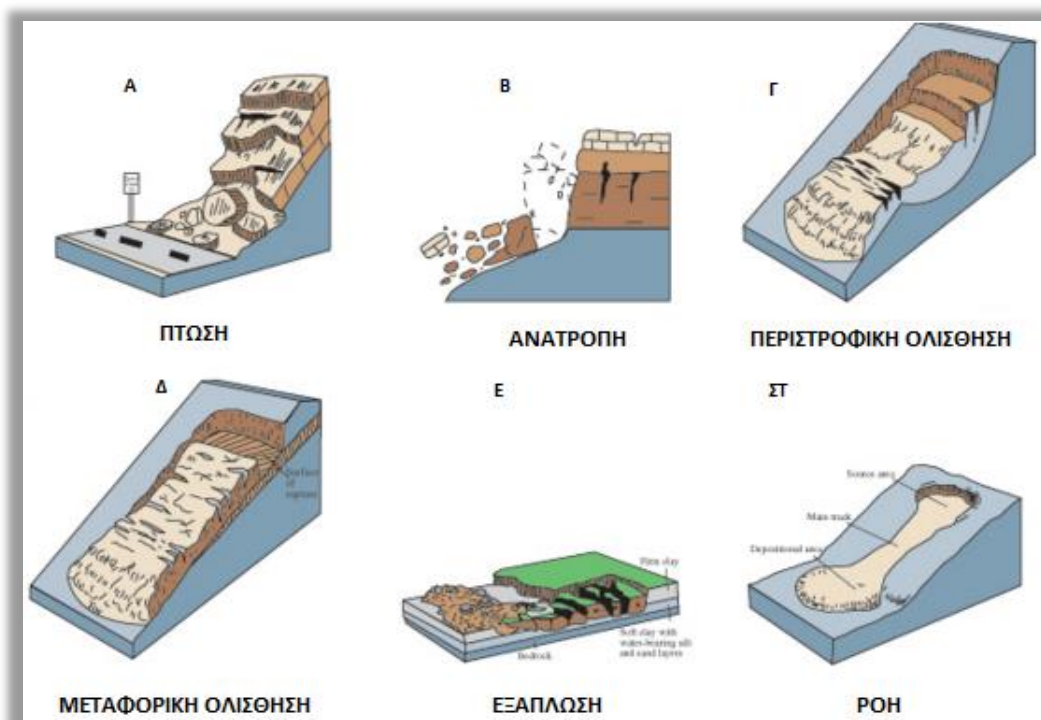
Εικόνα 3-7 : Αριστερά σχηματική αναπαράσταση άσκησης τάσεων στον αγωγό από εδαφική ροή και δεξιά θραύση αγωγού στο Εκουαδόρ, λόγω αυτού του φαινομένου. (Πηγή: Ίδια Επεξεργασία από: Nyman (2008) και American Geophysical Union (2009).

Τα είδη των κατολισθήσεων που μπορεί να πλήξουν έναν αγωγό, όπως τα παρουσιάζει ο Σακελλαρίου (2008) είναι τα εξής (Εικόνα 3-8):

- Πτώσεις (falls) : Καθοδική κίνηση υλικού που κατρακυλά στην πλαγιά με μεγάλη ταχύτητα, η οποία με την αποκόλληση εδάφους ή βράχου από μία απότομη πλαγιά, κατά μήκος μίας επιφάνειας που έχει από μικρή έως και μηδενική διατμητική αντοχή.
- Ανατροπές (topples) : Αποτελεί μία προς τα εμπρός περιστροφή της μάζας του βράχου γύρω από ένα σημείο ή άξονα, κάτω από το κέντρο βάρους της μάζας. Μερικές φορές προκαλείται από το βάρος του υλικού που βρίσκεται στο πάνω μέρος της πλαγιάς ενώ άλλες φορές λόγω υγρασίας και υπαρχόντων ρωγμών. Εδώ επισημαίνεται ότι τα πρώτα δύο είδη σπάνια επηρεάζουν σημαντικά τον αγωγό, αφού έχει σχεδιαστεί να αντέχει την πλειονότητα των συγκρούσεων

αυτής της μορφής, καθιστώντας τα επόμενα τρία είδη τα σημαντικότερα και πιο επιβλαβή.

- Ολισθήσεις (slides) : Αποτελεί μία καθοδική κίνηση εδαφικής ή βραχώδους μάζας που συμβαίνει, κυρίως, κατά την επιφάνεια αστοχίας ή σε λεπτές ζώνες έντονης διατμητικής τάσης. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
 - Περιτροφικές ολισθήσεις (rotational slides) : Ολισθήσεις που κινούνται κατά μήκος μίας επιφάνειας αστοχίας, η οποία είναι κοίλη.
 - Μεταφορικές ολισθήσεις (translational slides) : Ολισθήσεις στις οποίες η μάζα μετατοπίζεται κατά μήκος μίας επίπεδης ή κυματιστής επιφάνειας αστοχίας, ολισθαίνοντας πάνω από την αρχική επιφάνεια εδάφους.
- Εξαπλώσεις (spreads) : Ορίζονται ως μία επέκταση ενός συνεκτικού εδάφους ή μιας βραχώδους μάζας συνδυασμένης με μία γενική υποχώρηση της τεμαχισμένης μάζας του συνεκτικού υλικού, μέσα σε μαλακότερο υλικό.
- Ροές (flows) : Αποτελεί μία συνεχής κίνηση στον χώρο, στην οποία οι επιφάνειες διάτμησης έχουν μικρή διάρκεια ζωής, είναι συνήθως η μία κοντά στην άλλη και δεν διατηρούνται. Η κατανομή των ταχυτήτων στο μετατιθέμενο υλικό μοιάζει με εκείνη ενός παχύρευστου υγρού.



Εικόνα 3-8: Είδη κατολισθήσεων. (Α) Πτώσεις; (Β) Ανατροπές; (Γ) Περιτροφικές ολισθήσεις; (Δ) Μεταφορικές ολισθήσεις; (Ε) Εξαπλώσεις; (ΣΤ) Ροές. (Πηγή: <http://earthquake.usgs.gov>, 2015)

3.4 Εκτίμηση των γεωκινδύνων : οι απαραίτητες μελέτες πριν την δρομολόγηση του αγωγού

Έχοντας παρουσιάσει, αναλύσει και κατανοήσει τους γεωκινδύνους ενδιαφέροντος και τις πιθανές επιπτώσεις τους σε γραμμές αγωγών, κρίνεται απαραίτητο να επισημανθούν οι απαραίτητες μελέτες για την εκτίμηση αυτών, πριν την μετάβαση στην φάση υλοποίησης του έργου, η οποία αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Χωρίς αμφιβολία, η εκτίμηση των γεωκινδύνων (geohazard assessment) αποτελεί ένα εκ των σημαντικότερων θεμάτων του μηχανικού σχεδιασμού γραμμών αγωγών, ανεξάρτητα περιεχομένου προϊόντος, συμπεριλαμβάνοντας τις περιφερειακές συνδεδεμένες στο δίκτυο κατασκευές όπως σταθμοί συμπίεσης, κτήρια, πλωτές κατασκευές κ.λπ.. Για αυτό και είναι απαραίτητη η ασφάλεια της κατασκευής, η οποία είναι άμεσα συσχετιζόμενη με : (α) την εδραίωση της κατασκευής έναντι αναγνωρισμένων γεωκινδύνων και (β) την πρόταση και τον σχεδιασμό μέτρων άμβλυνσης των επιπτώσεων ή προστασίας της κατασκευής στην χειρότερη και αποφευκτέα περίπτωση.

Στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλή σεισμικότητα η εκτίμηση των γεωκινδύνων απαιτείται να λαμβάνει υπόψη όλων των πιθανών κινδύνων που συνδέονται με κάποιο τρόπο με την σεισμική δραστηριότητα. Για αυτό, έχοντας αναφερθεί προηγουμένως στις σημαντικές κατηγορίες γεωκινδύνων, ο μηχανικός σχεδιασμός (engineering design) πρέπει να περιλαμβάνει τον σεισμικό σχεδιασμό του αγωγού (pipeline seismic design), ο οποίος αποτελείται από:

- Επιβεβαιωμένη προστασία της κατασκευής έναντι του φορτίου σεισμικών κυμάτων και των μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων.
- Βέλτιστος σχεδιασμός των μέτρων άμβλυνσης και προστασίας (τα οποία απαιτούνται μόνο στην περίπτωση που η αντίστοιχη επιβεβαίωση δεν έχει επιτευχθεί).

Για την σχετικά ακριβή εκτίμηση των προαναφερθέντων βασικών κατηγοριών γεωκινδύνων κατά μήκος του αγωγού απαιτείται μία γεωτεχνική σεισμική έρευνα (geotechnical earthquake engineering study), η οποία θα βασίζεται σύμφωνα με τους Ψαρρόπουλο κ.α. (2012) στις εξής μελέτες:

- *Τοπογραφική μελέτη*, η οποία πρέπει να εκτελείται σε μία ευρεία ζώνη γύρω από τη διαδρομή του αγωγού για να καταγραφούν όλα τα τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής μελέτης.
- *Γεωλογική χαρτογράφηση/έρευνα*, η οποία περιλαμβάνει μία λεπτομερή περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών και μια ποιοτική αναγνώριση των πιθανών γεωκινδύνων (κατολισθήσεις, βραχοπτώσεις, φαινόμενα καρστ, ρευστοποιημένες περιοχές κ.λπ..).
- *Τεκτονική ή σεισμοτεκτονική έρευνα/μελέτη*, η οποία είναι απαραίτητη σε σεισμογενείς περιοχές, για αναγνώριση και ταξινόμηση των πιθανά ενεργών ρηγμάτων. Επίσης, πρέπει να περιλαμβάνει μία ρεαλιστική εκτίμηση των

δυναμικών ρήξεων της κατασκευής για να ποσοτικοποιήσει την αναμενόμενη μετατόπιση.

- *Σεισμολογική μελέτη*, η οποία στοχεύει στην ντετερμινιστική ή/και πιθανολογική εκτίμηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς του υποβάθρου a_{gR} . Ωστόσο, σε λιγότερο σημαντικές κατασκευές, μπορεί να αγνοηθεί.
- *Γεωτεχνική μελέτη/έρευνα*, η οποία εστιάζει στις προβληματικές περιοχές. Βασίζεται στην γεωτεχνική επιτόπια έρευνα, στις αναλύσεις εργαστηρίου και δευτερευόντως στην γεωφυσική έρευνα (π.χ. παράλληλες γεωτρήσεις). Στόχος είναι η αναγνώριση του εδαφικού προφίλ (πάχος ζωνών, μορφολογία, υδάτινο δυναμικό κ.α.) και ο καθορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των διάφορων γεωλογικών σχηματισμών.

Είναι προφανές ότι, μετά από τις γεωτεχνικές και γεωφυσικές έρευνες, ένας έμπειρος γεωλόγος μηχανικός πρέπει να αξιολογήσει τις γεωτεχνικές παραμέτρους και να συνθέσει την *Αναφορά Εδαφικής Έρευνας* (Ground Investigation Report) η οποία, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 7 (EC7 : Geotechnical Design), περιέχει:

- Την παρουσίαση όλων των διαθέσιμων γεωτεχνικών πληροφοριών συμπεριλαμβάνοντας γεωλογικά στοιχεία και σχετικά δεδομένα.
- Μια γεωτεχνική αξιολόγηση των δεδομένων, εκφράζοντας τις υποθέσεις που έγιναν για τα συμπεράσματα των τελικών αποτελεσμάτων.

Η γεωτεχνική σεισμική μελέτη (geotechnical earthquake engineering study) στην ρεαλιστική ποσοτικοποίηση των προηγούμενων αναφερθέντων γεωκινδύνων, οδηγώντας σε απαιτούμενες ποσότητες για τον μηχανικό σχεδιασμό της κατασκευής (όπως συντελεστές ασφαλείας, επίπεδα επιτάχυνσης, μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις κ.λπ.). Τέλος, η μελέτη προτείνεται να περιλαμβάνει τουλάχιστον τα παρακάτω:

- *Μελέτη ενίσχυσης*, στην οποία, κυρίως, εκτελούνται αναλύσεις εδαφικής απόκρισης σε μία και δύο διαστάσεις (1-D & 2-D). Οι αναλύσεις απαιτείται να εκτιμούν την εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε διάφορες τοποθεσίες, καθορίζοντας έτσι και το φορτίο των σεισμικών κυμάτων. Βασίζεται στα αποτελέσματα των γεωλογικών, γεωτεχνικών και γεωφυσικών ερευνών, λαμβάνοντας ρεαλιστικά υπόψη την πιθανή μη-γραμμική δυναμική συμπεριφορά του εδάφους.
- *Εκτίμηση της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση*, βάσει των υπολογισθέντων επιπέδων επιταχύνσεων και των γεωτεχνικών αποτελεσμάτων.
- *Εκτίμηση σεισμικής ευστάθειας πρανών*. Απαιτεί όλες τις προαπαιτούμενες μελέτες και τις αναλύσεις εδαφικής απόκρισης, για τον ορισμό του ανεκτού επιπέδου παραμορφώσεων του αγωγού.

Έχοντας παρουσιάσει τις απαραίτητες μελέτες, επισημαίνεται ότι αυτές συμπεριλαμβάνονται στον αριθμό των απαραίτητων μελετών που παρουσιάζονται

στο επόμενο κεφάλαιο, και διεκπεραιώνονται κατά τα πρώτα τρία στάδια της αναλυόμενης διαδικασίας δρομολόγησης πριν την κατασκευή του έργου, όπως προτείνεται από τον Διεθνή Ένωση IPLOCA.

3.5 Γεωκινδύνοι υπεράκτιων αγωγών

Οι γεωκινδύνοι που μόλις αναλύθηκαν αναφέρονταν, κυρίως, στις χερσαίες κατασκευές αγωγών. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία, μελετάται, αν και σε μικρότερο βάθος, και η χάραξη διαδρομής υπεράκτιων αγωγών. Εκτός των σημαντικών παραγόντων που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4 αναφορικά με την δρομολόγηση τους, οφείλεται να παρουσιαστούν αρχικά οι γεωκινδύνοι ενδιαφέροντος που ενδέχεται να παρουσιάσουν επιπτώσεις στην υπεράκτια διαδρομή και των οποίων η πρόβλεψη θα οδηγήσει στο πληρέστερο και, συνεπώς, καλύτερο σεισμικό σχεδιασμό.

Εκτός των παρεμβάσεων από τρίτα άτομα και των κατασκευαστικών κωλυμάτων, οι γεωκινδύνοι ενδιαφέροντος, όπως μελετήθηκαν μέσω του Dean (2009), είναι οι εξής :

- Γεωλογικά ρήγματα. Αποτελούν σημαντικούς υπεράκτιους γεωκινδύνους, γιατί ορίζουν τις περιοχές στις οποίες μπορεί να λάβει μέρος ισχυρή εδαφική κίνηση. Μία γραμμή αγωγού μεγάλου μήκους μπορεί να διέλθει από περιοχές διαφορετικού σεισμικού ρίσκου και διαφορετικών υδροδυναμικών κλιμάτων. Οι κυκλικές φορτίσεις από σεισμούς και υδάτινα κύματα ενδέχεται να οδηγήσουν σε άμεση ρευστοποίηση του αμμώδους πυθμένα, επιτρέποντας την ανοδική ανάταση της ελαφριάς γραμμής από το βάθος στο οποίο είχε τοποθετηθεί, ή την βύθιση μίας βαριάς. Ωστόσο, οι πιέσεις των κυμάτων μπορεί να οδηγήσουν και σε συμπαγές υλικό τάφρου (Clukey et al., 1980).
- Υποβρύχιες κατολισθήσεις. Κάποια τμήματα του πυθμένα μπορούν να θεωρηθούν λοφώδη ακόμη και ορεινά, αναδεικνύοντας το κίνδυνο υποβρύχιων κατολισθήσεων. Ολίσθηση όγκου λάσπης μπορεί να προκληθεί από τυφώνες, σεισμούς ή και απλή συσσώρευση ιζημάτων κατά την διάρκεια του χρόνου. Οι επίπεδοι πυθμένες (seafloor valleys) μπορεί να μεταδώσουν εδαφικές ροές (debris flows) ή ρεύματα από κατολισθήσεις που συμβαίνουν σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα σε αγωγούς ή καλώδια που διέρχονται από αυτού του είδους πυθμένες. Τα «πεδία αυλακίων» (furrow fields) είναι, επίσης, πολύ γνωστές τοπογραφικές ανωμαλίες μεγάλης κλίμακας στον ωκεάνιο πυθμένα που, ανάμεσα σε πλήθος επιπτώσεων που μπορούν να αποφέρουν, ενδέχεται να διαδώσουν ισχυρά υποθαλάσσια ρεύματα με τρόπο που μπορεί να μεγεθύνει την ένταση τους και να πλήξει την κατασκευή.
- Τοπογραφικές ιδιαιτερότητες του πυθμένα. Κάποιες περιοχές του πυθμένα περιέχουν θύλακες αέρα (rock marks) ή/και ηφαιστεια λάσπης (mud volcanoes) τα οποία μπορεί να προκαλέσουν έντονη εδαφική κίνηση κατά τόπους στον αγωγό, με αποτέλεσμα την φόρτιση του και την ενδεχόμενη αποκόλληση της υποστήριξης του.

- Ακτογραμμές. Οι ακτογραμμές, λόγω του μικρού βάθους νερού, ενδέχεται να περικλείουν βίαιες κινήσεις όγκων νερού που συνδέονται με κύματα και ρεύματα που μπορούν να οδηγήσουν στην μεταφορά επιβλαβών υλικών, στην διάβρωση και τελικά στην ρήξη ενός αγωγού. Επίσης, βάσει των τοπικών συνθηκών και των λοιπών γεωμορφικών παραγόντων, μπορεί να ενισχύσουν κύματα νερού ή και σεισμικά κύματα, με σημαντικότερες επιπτώσεις στην κατασκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΕΠΙΛΟΓΗ, ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΞΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

4.1 Εισαγωγή

4.1.1 Γενικά

Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου περιγράφεται η διαδικασία χάραξης διαδρομής ενός αγωγού μεγάλου μήκους και αναφέρονται οι σημαντικότεροι εκ των παραγόντων που την επηρεάζουν. Η διαδικασία που αναλύεται παρακάτω αποτελεί μία τυπική προσέγγιση της χάραξης της διαδρομής ενός αγωγού μεταξύ ενός σημείου έναρξης και πολλαπλών σημείων πέρατος, χωρίς να αποκλείεται η διέλευση της από ενδιάμεσα σημεία παροχής του μεταφερόμενου προϊόντος, όπως προτείνεται από την Διεθνή Ένωση IPLOCA (International Pipe Line & Offshore Contractors Association).

4.1.2 Πλαίσιο υλοποίησης της διαδικασίας

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι μία περιγραφή που θα καλύπτει όλα τα πιθανά ενδεχόμενα μίας προς χάραξη διαδρομής καθίσταται αδύνατη, αφού καμία διαδικασία επιλογής διαδρομής δεν μπορεί να είναι παρόμοια με κάποια άλλη λόγω των διαφορετικών παραγόντων της κάθε περιοχής μελέτης όπως : οι εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες, οι χρήσεις γης, οι υπάρχουσες υποδομές, το περιβάλλον, οι αρχαιολογικές περιοχές και, τελικώς, οι τοπικοί κανονισμοί και απαραίτητες άδειες. Επιπρόσθετα, κάθε φάση της διαδικασίας θα εξαρτάται από το χρονοδιάγραμμα του προς υλοποίηση έργου. Είναι απόλυτα θεμιτό να ολοκληρωθεί και να εγκριθεί η τελική διαδρομή στην φάση του σχεδιασμού, όμως τα υπόλοιπα έργα δεν μπορούν να υλοποιηθούν μέχρι την φάση υλοποίησης του έργου (λεπτομερής σχεδιασμός).

Ειδικότερα, οι αγωγοί δρομολογούνται έτσι ώστε να συνδέεται το σημείο έναρξης με τα ενδιάμεσα σημεία παροχής και, έπειτα, με τα υποψήφια σημεία πέρατος. Η τελική επιλεγείσα διαδρομή θα πρέπει να είναι (wiki.iploca.com, 2015):

- ασφαλής
- περιβαλλοντολογικά αποδεκτή
- οικονομική
- πρακτική και υλοποιήσιμη

Ειδικότερα, όσο αφορά την διαδικασία, δεν μπορεί να εφαρμοστεί εξ ολοκλήρου η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις αγωγών. Αυτές οι περιπτώσεις επηρεάζονται από διαφορετικούς παράγοντες όπως το μεταφερόμενο προϊόν, το μήκος του αγωγού, το υλικό του αγωγού, τη τοποθεσία, τις χρήσεις γης, το έδαφος, το ιδιοκτησιακό καθεστώς γης, τις υποδομές, τους αρχαιολογικούς χώρους και το περιβάλλον. Οι προαναφερθέντες παράγοντες αποτελούν βασικοί για τον τελικό ορισμό και την

έγκριση της προς χάραξη διαδρομής είτε στην φάση σχεδιασμού είτε στην φάση υλοποίησης.

4.1.3 Χάραξη διαδρομής : Η βάση για την μηχανική του αγωγού

Η διαδρομή του αγωγού αποτελεί ένα ζωτικό κομμάτι των απαιτούμενων πληροφοριών από τις οποίες εξαρτάται η μηχανική του αγωγού. Βάσει αυτών καθορίζεται, σε βάθος χρόνου, το μέγεθος του αγωγού, το έδαφος, η γεωμορφολογία αλλά και οι απαιτήσεις της τεχνικής ανάλυσης. Η μηχανική εκτίμηση, η οποία βασίζεται σε προσυμφωνημένα κριτήρια επιλογής, αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι στην εκτέλεση ενός γραμμικού σχεδίου. Για να μπορέσει να επιτευχθεί η καλύτερη κατασκευαστική αλυσίδα και η βελτιστοποίηση των συνιστωσών της (συγκεκριμένα των φάσεων της), θα πρέπει να μελετηθούν με την δοθείσα σειρά (wiki.iploca.com, 2015) :

- ορισμός εύρους διαδρομής (corridor)
- δημιουργία διαδρομής (route)
- ευθυγράμμιση (alignment)
- επιλογή κατασκευαστικής αλυσίδας (construction line selection)

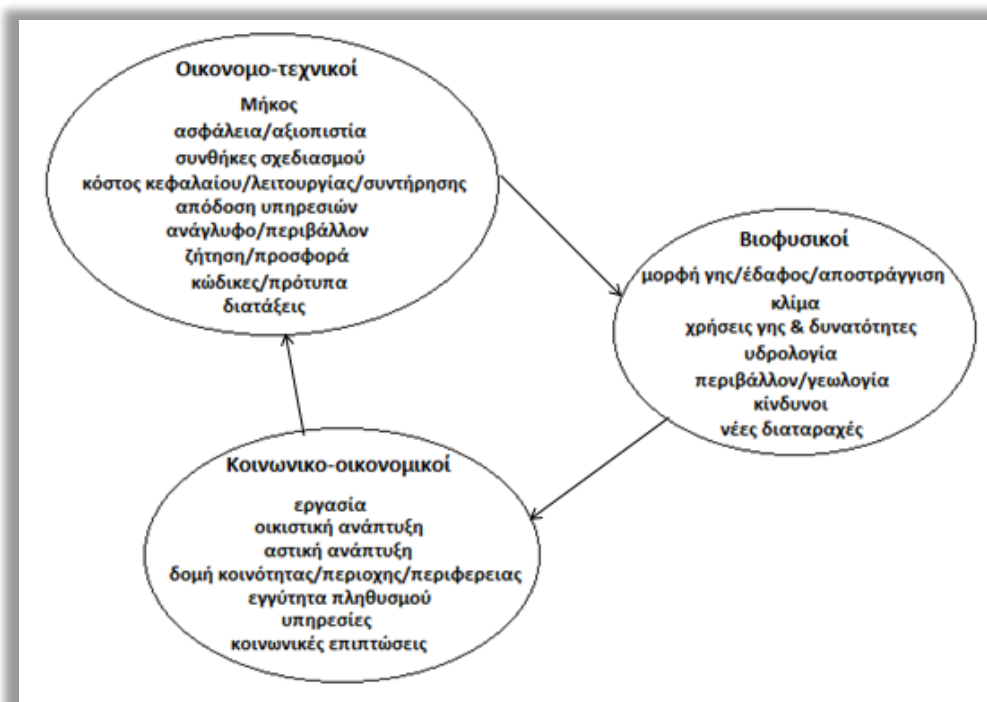
4.1.4 Πρωτογενείς παράγοντες επιλογής

Πριν την μετάβαση στον λεπτομερή ορισμό της διαδρομής του αγωγού, καθορίζεται μία ζώνη αναζήτησης, μεγάλου πλάτους, μεταξύ των ορισθέντων σημείων έναρξης και λήξης, η οποία ονομάζεται «διάδρομος» του αγωγού (corridor). Μετά τον ορισμό του εύρους του «διαδρόμου» του αγωγού, η ορισθείσα περιοχή αρχίζει να «φιλτράρεται» δίνοντας βαρύνουσα σημασία στους προβλεπόμενους γεωκινδύνους, στη δημόσια ασφάλεια, στην ακεραιότητα του αγωγού, στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στις συνέπειες διαφυγής του προϊόντος βάσει κοινωνικοοικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντολογικών κριτηρίων, στην κατασκευασσιμότητα και την πρόσβαση, στο καθεστώς ιδιοκτησίας γης και στο τελικό προβλεπόμενο κόστος.

Οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να διέπουν την επιλογή των διαδρομών του αγωγού και να θεωρούνται ισάξια σημαντικοί, είναι η ασφάλεια, το περιβάλλον και η οικονομικο-τεχνική βιωσιμότητα. Η συντομότερη διαδρομή μπορεί να μην είναι η πιο κατάλληλη, αφού πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φυσικά εμπόδια, οι περιβαλλοντολογικοί περιορισμοί και οι τοποθεσίες σημείων παροχής και παράδοσης του μεταφερόμενου προϊόντος. Ενδέχεται τα ενδιάμεσα σημεία παροχής να υπαγορεύσουν την κύρια δρομολόγηση του αγωγού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ανάγκη δευτερευόντων γραμμών αγωγών. Κρίνεται, ωστόσο, σημαντικό να επισημανθεί ότι οι περιορισμοί που δημιουργούνται στα πλαίσια της δρομολόγησης του αγωγού μπορούν να βρουν λύση εντός ενός εύρους τεχνικών παρεμβάσεων, αλλά η κάθε μία εκ αυτών παρουσιάζει ένα σχετικό κόστος.

Την διαδικασία επιλογής της διαδρομής βάσει των βασικών αρχών και κριτηρίων προς ανάλυση, συμπληρώνει η διαδικασία αξιολόγησης της επιλογής. Η διαδικασία αξιολόγησης της επιλογής, η οποία διεκπεραιώνεται κατά την τρίτη φάση του έργου,

όπως αυτή περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 4.2.3 , αποτελεί μία σειρά ενεργειών με σκοπό τον καθορισμό της φύσης και της συμπεριφοράς των παραγόντων που επηρεάζουν, αλλά και επηρεάζονται από την δρομολόγηση του αγωγού. Στο σύνολο της, η διαδικασία δρομολόγησης αναφέρεται στις αλληλεπιδράσεις της μηχανικής με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς και κοινωνικο-οικονομικές και πολιτικές επιρροές (Εικόνα 4-1). Επιπρόσθετα, η διαδικασία ασχολείται εκτενώς με τον χαρακτηρισμό των εδαφικών συνθηκών και των γεωκινδύνων που επηρεάζουν την διαδικασία επιλογής διαδρομής και της μετέπειτα κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας του αγωγού σε εννιά διαφορετικά είδη εδαφών (Rizkalla, 2008).



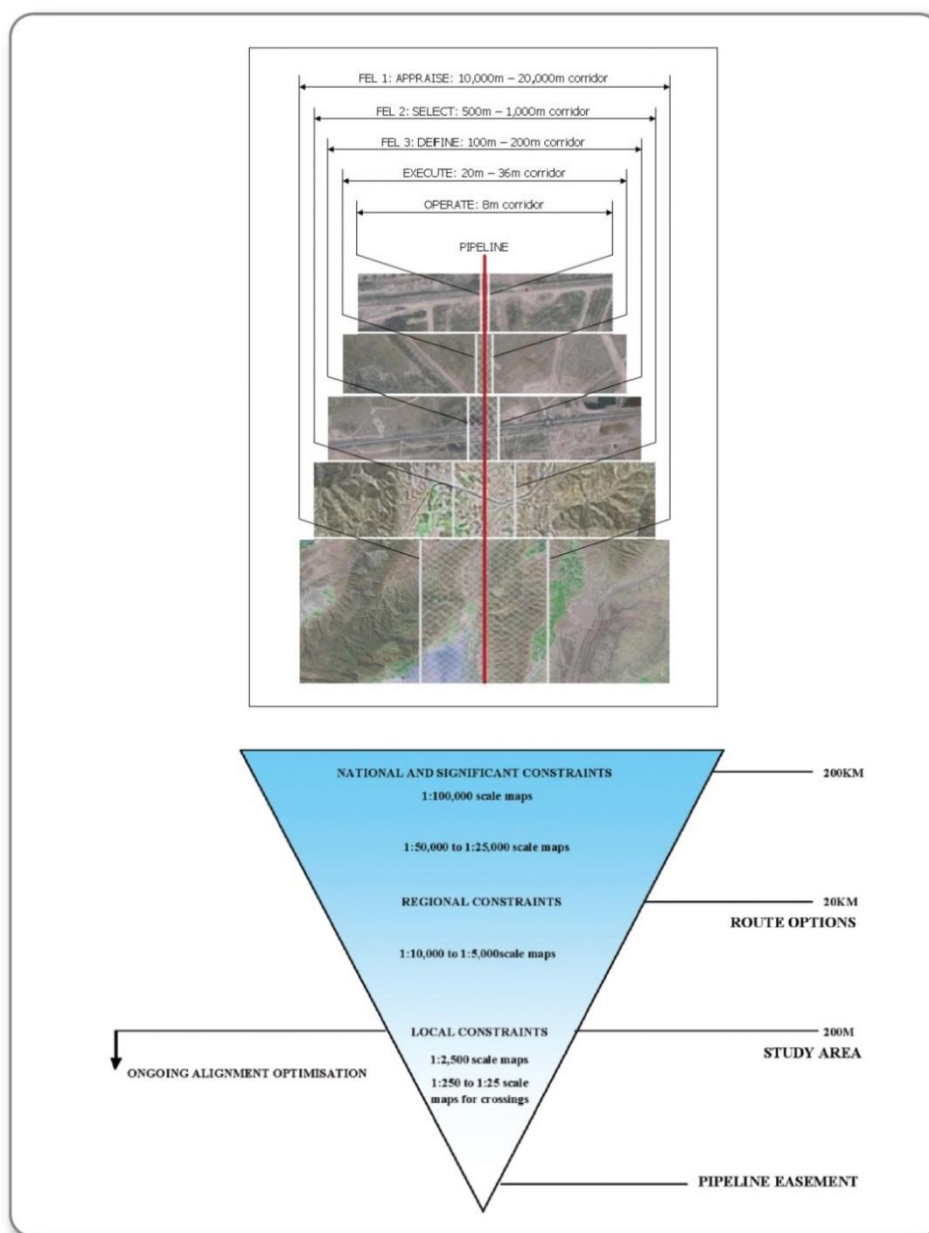
Εικόνα 4-1: Οικονομικοί, μηχανικοί, βιοφυσικοί και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες επιρροής της επιλογής και αξιολόγησης της διαδρομής του αγωγού (Πηγή : Rizkalla, 2008)

4.1.5 Επιλογή διαδρόμου στα βασικά στάδια του έργου

Η δρομολόγηση μίας γραμμής αγωγού μεγάλου μήκους αποτελεί μία επαναληπτική διαδικασία. Ξεκινά με τον ορισμό ενός «διαδρόμου ενδιαφέροντος» μεγάλου πλάτους (corridor of interest), το οποίο ελαττώνεται σταδιακά, μέχρι να αποκτηθεί μία πιο στενή αλλά και καθορισμένη διαδρομή. Το πλάτος ελαττώνεται σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού του έργου, αφού αποκτούνται και επεξεργάζονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την περιοχή μελέτης, μέχρι να αποκτηθούν τα νομικά δικαιώματα της διέλευσης του αγωγού από ένα σύνολο ιδιοκτητών περιοχών και να ορισθεί η τελική του διαδρομή ROW (Right Of Way).

Το αρχικό πλάτος ενός αριθμού εναλλακτικών «διαδρόμων» του αγωγού μπορεί να ανέλθει και στα είκοσι χιλιόμετρα (Εικόνα 4-2). Τυπικά, τα στάδια του ορισμού και της ευθυγράμμισης της διαδρομής μπορούν να περιγραφούν όπως στον παρακάτω Πίνακα 4.1. Κάθε έργο ακολουθεί την δική του διαδικασία για τον ορισμό και

ελάττωση του εύρους του «διαδρόμου» του αγωγού, βασιζόμενο στο μέγεθος και την τοποθεσία του έργου. Οι «διάδρομοι» επισημαίνεται ότι θα ήταν καλό να επιλέγονται έτσι ώστε να αποφεύγουν τους κύριους περιορισμούς. Έπειτα, μπορούν να συγκεκριμενοποιηθούν μέσω της, προαναφερθείσας, επαναληπτικής διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένης της διαβούλευσης με τους ενδιαφερόμενους φορείς και γαιοκτήμονες και την αναθεώρηση των κριτηρίων ΕΙΑ (Environmental Impact Assessment), για την αποφυγή πρόσθετων κωλυμάτων. Ο απώτερος στόχος είναι η επίτευξη μίας, οικονομικά και περιβαλλοντικά, εφικτής διαδρομής για κατασκευή.



Εικόνα 4-2: Ελαττώνοντας το πλάτος του "διαδρόμου" του αγωγού κατά τα στάδια του έργου (Πηγή : www.wiki.iploca.com, 2015)

Πίνακας 4.1 : Ελαττώνοντας το πλάτος του "διαδρόμου" του αγωγού κατά τα στάδια του έργου : Βασικές περιγραφές (Πηγή : www.wiki.iploca.com, 2015)

ΣΤΑΔΙΟ	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ			ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΟΥ (ΕΚΤΕΛΕΣΗ)	ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ)
	FEL 1 ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ (ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ)	FEL 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (ΕΠΙΛΟΓΗ)	FEL 3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΟΥ (ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ)		
Ακρίβεια εκτίμησης κόστους	Τάξη μεγέθους	+/-30%	+/-15%	+/-5%	Ολοκλήρωση
Διαδικασία	Αξιολόγηση	Βιωσιμότητα	Επιλογή/Καθορισμός	Εγκρίσεις/Εκτέλεση /Κατασκευή	Λειτουργία
Δραστηριότητα	Εξερεύνηση εναλλακτικών επιλογών «διαδρόμων» στο γραφείο	Επιλογή «διαδρόμου» και αναγνώριση εναλλακτικής διαδρομής, επιλογές ευθυγράμμισης	Επιλογή διαδρομής, εξέταση και διαβούλευση, διαπραγματεύσεις	Λεπτομερής ευθυγράμμιση, αδειοδότηση της τελικής διαδρομής και κατασκευαστικής γραμμής, τέλος διαπραγματεύσεων και απόκτηση γης	Συντήρηση
Πλάτος «διαδρόμου»	10km-20km πλάτους «διάδρομος ενδιαφέροντος»	500m-1km πλάτους «διάδρομος» προτιμώμενης διαδρομής (χάρτες μικρής κλίμακας).	100m-200m πλάτους καθορισμένος «διάδρομος» (πιο λεπτομερείς χάρτες)	20m-36m πλάτος «διάδρομος» κατασκευής	8m πλάτους 'μόνιμος διάδρομος' για συνεχόμενη εποπτεία και απαιτούμενη συντήρηση
Εικόνες	Χάρτες 1:25000 ή 1:50000 κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με την πολυπλοκότητα του εδάφους.	Χάρτες 1:10000 ή 1:25000 κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αεροφωτογραφίες 250mm ή καλύτερες, σε υπέρθεση με συντεταγμένες σε κλίμακα 1:10000 μπορούν να παραχθούν και να χρησιμοποιηθούν.	Χάρτες κλίμακας 1:2500 μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Χαρτιά ευθυγράμμισης μπορούν να προετοιμαστούν από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:2500. Διασταυρώσεις ειδικού ενδιαφέροντος πρέπει να διευκρινιστούν: τυπική κλίμακα μεταξύ 1:250 και 1:25 αναφορικά με την πολυπλοκότητα.	Σχέδια για συμφωνίες με τους γαιοκτήμονες πρέπει να βασίζονται σε χάρτες κλίμακας 1:2500 ή μεγαλύτερης.	Ακριβή σχέδια κατασκευής (στην ίδια κλίμακα από τα προερχόμενα σχέδια) πρέπει να δίνονται σε όλους τους εμπλεκόμενους κατά την ολοκλήρωση του έργου. Αυτά τα σχέδια πρέπει να περιέχουν όλες τις λεπτομέρειες.
Παραγόμενο αποτέλεσμα	Προκαταρκτικά σχέδια διαδρομής. Χάρτες κλίμακας 1:100000.	Δρομολόγηση χρησιμοποιώντας χάρτες της διαδρομής κλίμακας 1:50000. Σχέδια αναγνώρισης του πεδίου.	Λεπτομερής δρομολόγηση με χάρτες κλίμακας από 1:5000 ως 1:10000. Απόκτηση γης και απαραίτητα σχέδια. Τελικά σχέδια αποτύπωσης της περιοχής. Χαρτιά ευθυγράμμισης. Σχέδια διασταυρώσεων.	Τελικά σχέδια ευθυγράμμισης. Σχέδια για γαιοκτήμονες και έγκριση/άδεια/αποδοχή. Αγορά γης. Λεπτομερή σχέδια διασταυρώσεων.	Σχέδια κατασκευής.

4.2 Δραστηριότητες χάραξης διαδρομής εντός των φάσεων υλοποίησης του έργου

4.2.1 Φάση πρώτη : Εναλλακτικές επιλογές «διαδρόμων» [FEL 1, Appraise]

Η φάση αυτή περιλαμβάνει τις αρχικές μελέτες γραφείου για την αναγνώριση εναλλακτικών επιλογών, λαμβάνοντας υπόψη ήδη γνωστές περιβαλλοντολογικές και πολιτιστικές ευαισθησίες. Επιπρόσθετα, συλλέγονται και αναπτύσσονται οι βασικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης από γεωλογικούς και τοπογραφικούς χάρτες, αεροφωτογραφίες και δορυφορικές φωτογραφίες αλλά και από απαραίτητα δημόσια έγγραφα όπως χωροταξικά σχέδια. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για να αναγνωριστούν οι εναλλακτικές επιλογές «διαδρόμων» και οι βασικοί τους περιορισμοί, όσοι είναι ορατοί και αναγνωρίσιμοι από τα διαθέσιμα δεδομένα, αλλά και βασικά στοιχεία της μηχανικής του αγωγού, όπως το μήκος και το προφίλ του, για χρήση τους στην κοστολόγηση και στον προγραμματισμό των εργασιών.

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

Στην δεύτερη φάση, επιλέγεται ένας «διάδρομος» εκ των εναλλακτικών, μετά από την διενέργεια μελέτης για βασικά ζητήματα (key issues study), με στόχο την, όσο το δυνατόν βέλτιστη, διασφάλιση ότι η επιλογή είναι κατάλληλη και δεν είναι πιθανό να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα σε μεταγενέστερο στάδιο. Η μελέτη γραφείου και η εικονική αξιολόγηση, κάνοντας χρήση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών στο πλαίσιο του δημόσιου τομέα, θα πρέπει να προηγηθεί της υιοθέτησης μίας προσωρινής διαδρομής εντός του επιλεχθέντος «διαδρόμου». Πληροφορίες που αφορούν τα γεωλογικά, αρχαιολογικά και περιβαλλοντολογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής πρέπει να συλλεχθούν, σε πρώτη φάση, από δημοσιευμένες πηγές, έτσι ώστε να καθοριστεί η διαδρομή πριν από τις συζητήσεις με τους αρμόδιους φορείς.

Τα γεωγραφικά όρια εντός των οποίων πρόκειται να πραγματοποιηθεί η επιλογή της διαδρομής του αγωγού θα πρέπει να καθοριστούν με την αναγνώριση του εναρκτήριου και των ενδιάμεσων σημείων, τα οποία θα λειτουργήσουν ως σταθερά σημεία. Τα σημεία αυτά θα πρέπει να επισημαίνονται ορθά στα, υπό κατάλληλη κλίμακα, σχέδια της περιοχής. Η διαδρομή ενδιαφέροντος, έπειτα, πρέπει να εξερευνηθεί από κοντά κατά την διαδρομή που ορίζουν τα προαναφερθέντα σταθερά σημεία, έτσι ώστε να αποτυπωθούν και να αξιολογηθούν τα βασικά θέματα και περιορισμοί που ενδέχεται να επηρεάσουν την αρχική χάραξη της διαδρομής. Το πλάτος του «διαδρόμου» θα εξαρτηθεί από το φυσικό ανάγλυφο της περιοχής που εξερευνήθηκε, τις παροντικές και μελλοντικές ροές πληθυσμού και την αναμενόμενη πολυπλοκότητα, όπως αυτή διαμορφώνεται από τις περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές και κατασκευαστικές συνιστώσες της. Επιπρόσθετα, όπου αυτό κριθεί εφικτό, ο «διάδρομος» του αγωγού πρέπει να επιλεγθεί ώστε να αποφεύγει τις αστικές περιοχές, το κύριο οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, τις θαλάσσιες διαβάσεις και τις περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.

Οι υπάρχοντες και προς σχεδίαση περιορισμοί εντός της περιοχής ενδιαφέροντος πρέπει να αναγνωρίζονται, με στόχο να συνδράμουν και να διευκολύνουν την ρύθμιση της επιλεχθείσας διαδρομής. Οι αναγνωρισθέντες, αυτοί, περιορισμοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την πολυπλοκότητα της γεωμορφολογίας και των συλλεχθεισών πληροφοριών. Τα βασικά εμπόδια και περιορισμοί πρέπει να αποφεύγονται όσο το δυνατόν γίνεται. Έπειτα, μία προτιμώμενη διαδρομή θα πρέπει να επιλεγεί βάσει τεχνικών, περιβαλλοντικών και συσχετιζόμενων με την ασφάλεια παραγόντων οι οποίοι ενδέχεται να αποτελέσουν σημαντικοί κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και της λειτουργίας του συστήματος αγωγών. Η επιλογή της διαδρομής προτείνεται να ακολουθήσει μία μελέτη σύγκρισης. Με στόχους την βέλτιστη καταγραφή, διατήρηση και επεξεργασία του μεγάλου όγκου δεδομένων που απαιτούνται για την περάτωση της προαναφερθείσας διαδικασίας πρέπει να δημιουργηθεί ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών GIS (Geographical Information System), σε αυτήν τη φάση του έργου, καθώς η καθυστέρηση μιας τέτοιου είδους απόφασης μπορεί να οδηγήσει σε ανάγκη για αναπλήρωση του χαμένου χρόνου και δεδομένων σε επόμενη φάση υλοποίησης.

4.2.3 Φάση τρίτη : Διερεύνηση διαδρομής και διαβούλευση [FEL 3, Define, Consulting]

Η τρίτη φάση υλοποίησης του σχεδιασμού του έργου περιλαμβάνει την συλλογή λεπτομερέστερων πληροφοριών, για την επισήμανση και την χαρτογράφηση των περιορισμών εντός του «διαδρόμου ενδιαφέροντος», με απώτερο σκοπό την επιλογή της τελικής προτιμώμενης διαδρομής που θα ακολουθήσει ο αγωγός. Αυτό επιτρέπει το έργο να μεταβεί στο επόμενο στάδιο των διαπραγματεύσεων. Πλέον, όλοι οι περιορισμοί και τα προβλήματα σχεδιασμού που μπορεί να επηρεάσουν τον αγωγό πρέπει να αντιμετωπίζονται και να καταγράφονται. Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας, πρέπει να καταρτιστεί ένα σχέδιο διαχείρισης της κυκλοφορίας του μεταφερόμενου προϊόντος. Επίσης, απαραίτητες καθίστανται οι κριτικές της προτιμώμενης επιλεχθείσας οδού κατά την διέλευση από το πεδίο, οι οποίες πρέπει να βασίζονται, αρχικά, στην συνταχθείσα μελέτη γραφείου.

Στη συνέχεια, στα πλαίσια της αξιολόγησης των εναλλακτικών διαδρομών του αγωγού, προτείνεται να εφαρμοστεί μία ποσοτική εκτίμηση QRA (Quantitative Risk Assessment), η οποία διευκολύνει την σύγκριση των εναλλακτικών, βάσει της πιθανότητας εμφάνισης επικίνδυνων συμβάντων και των αντίστοιχων συνεπειών τους κατά μήκος της κάθε διαδρομής. Απαιτείται η διενέργεια μιας εμπεριστατωμένης εξέτασης της διαδρομής και του περιβάλλοντος στο οποίο πρόκειται ο αγωγός να κατασκευαστεί. Ειδικότερα, πρέπει να πραγματοποιηθούν, μετά από την απόκτηση αδειών από τους ιδιοκτήτες, τοπογραφικές, γεωτεχνικές και εδαφολογικές επιτόπιες έρευνες οι οποίες θα εκτελούνται από ομάδες αποτελούμενες από μηχανολόγους, τοπογράφους και γεωτεχνικούς μηχανικούς, αρχαιολόγους, περιβαλλοντολόγους και ανθρωπολόγους. Τα αποκτηθέντα δεδομένα τροφοδοτούν και τον σχεδιασμό και την κατασκευή της γραμμής του αγωγού. Σε αυτό το στάδιο συμπεριλαμβάνονται οι επισκοπήσεις των απαραίτητων εγκαταστάσεων (υπέργειων και υπόγειων) για την

μεταγενέστερη κατασκευαστική φάση όπως η οδική υποδομή πρόσβασης και οι εγκαταστάσεις διαμονής και κατασκευαστικής προετοιμασίας.

Όσον αφορά τις απαραίτητες επαφές και διαβουλεύσεις, καθίσταται αναγκαία η συνεχής και αμφίδρομη επικοινωνία με τις αρμόδιες αρχές και ενδιαφερόμενους τρίτους φορείς, έτσι ώστε να λαμβάνονται λεπτομέρειες για κάθε γνωστή ή προβλεπόμενη ανάπτυξη ή καταπάτηση κατά το μήκος της διαδρομής, για τοποθεσίες υπόγειων εμποδίων, αγωγών, υπηρεσιών και δομών αλλά και για άλλα σχετικά δεδομένα. Οι διαβουλεύσεις πρέπει να λάβουν μέρος όσο το δυνατόν νωρίτερα κατά τη διάρκεια της οριστικοποίησης της διαδρομής με τις σχεδιαστικές και κανονιστικές αρχές (συμπεριλαμβανομένων των τοπικών αρχών σχεδιασμού και τις υπηρεσίες ασφαλείας της κυβέρνησης) και με οποιεσδήποτε άλλες κατάλληλες οργανώσεις και πρόσωπα όπως οι γαιοκτήμονες. Συνοδευόμενοι από τους σχετικούς ιδιοκτήτες, γαιοκτήμονες και εκπροσώπους των αρμόδιων φορέων, η προτεινόμενη διαδρομή πρέπει να εξεταστεί διεξοδικότερα, επισημαίνοντας τις περιοχές που ήταν δύσκολο να προσδιοριστούν από τους χάρτες και λόγω δημόσιων δικαιωμάτων διέλευσης κατά την μελέτη γραφείου. Σημαντικές αποτελούν και οι διαπραγματεύσεις για την χρήση των οδών πρόσβασης, για σκοπούς κατασκευής ή συντήρησης.

Οι γεωλογικές και περιβαλλοντικές έρευνες πρέπει να εκτελούνται έτσι ώστε να καλύπτουν επαρκές πλάτος και βάθος γύρω από την προσωρινή διαδρομή και να έχουν, παράλληλα, επαρκή ακρίβεια για να εντοπίσουν όλα τα χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να επηρεάσουν δυσμενώς την εγκατάσταση και την λειτουργία του αγωγού. Αυτό συνεπάγεται περαιτέρω λεπτομερή διαβούλευση με τα θιγόμενα τρίτα πρόσωπα. Άλλη μία πτυχή προς διερεύνηση αποτελεί η δραστηριότητα από τρίτους κατά μήκος του αγωγού και το καθεστώς ασφαλείας. Τα ενδιαφερόμενα μέρη και η άδεια των τοπικών αρμοδίων και της εθνικής κυβέρνησης θα πρέπει να αποφασίζονται και να λαμβάνονται σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις.

Ένα πλήρες σύνολο δεδομένων που σχετίζεται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του αγωγού συντίθεται από την συγκέντρωση αρχείων, χαρτών και αποτελεσμάτων φυσικών επιτόπιων ερευνών και αποτυπώσεων. Η επιλεγθείσα διαδρομή θα έπρεπε να καταγράφεται σε ευθυγραμμισμένα φύλλα χάρτου με κατάλληλη κλίμακα. Οι συντεταγμένες όλων των σημαντικών σημείων, όπως τα σταθερά σημεία -στόχοι, σημεία διασταυρώσεων και σημεία έναρξης και τέλους κάμψης του αγωγού θα πρέπει να υπολογίζονται και να αναγράφονται στα φύλλα χάρτου. Επιπρόσθετα, οι ισοϋψείς καμπύλες πρέπει να καταγράφονται σε επαρκή χωρικά διαστήματα (κατάλληλη ισοδιάσταση), καθώς και χρονικά, για σκοπούς σχεδιασμού, ιδίως όσο αφορούν την εγκατάσταση και την φάση λειτουργίας. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ανάγκη για ένα κάθετο προφίλ της διαδρομής.

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

Στην τελική φάση καθορίζεται η βέλτιστη διαδρομή και τα συστατικά της. Η έγκριση του τοπικού σχεδιαστικού φορέα και οι συμφωνίες μεταξύ ιδιοκτήτη και ενοικιαστή της γης βαίνουν στο στάδιο ολοκλήρωσης τους. Η διαδρομή του αγωγού θα πρέπει να αναγνωρίζεται στο πεδίο μέσω ενός συστήματος εντοπισμού όπως η επισήμανση σημείων κατά μήκος της διαδρομής. Οι θέσεις τοποθέτησης των βαλβίδων του αγωγού, οι διαβάσεις των ποταμών και οι τοποθεσίες πιθανής εκδήλωσης γεωκινδύνων πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά και να ετοιμαστούν σε επίπεδο κατασκευής. Η φυσική κατασκευή και η λειτουργία του αγωγού είναι πλέον έτοιμη να αρχίσει, βάσει των κριτηρίων σχεδιασμού.

4.3 Βασικές αρχές δρομολόγησης του αγωγού και οι παράγοντες επιρροής

Οι βασικές αρχές οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή διαδρομής είναι οι εξής :

- Ασφάλεια του κοινού και του προσωπικού του έργου. Η διαδρομή πρέπει να παρέχει ένα ασφαλές και σίγουρο περιβάλλον για τον αγωγό κατά την κατασκευή και λειτουργία του και, ιδανικά, οφείλει να κατευθύνεται μακριά από κατοικημένες περιοχές.
- Οικονομικές. Η διαδρομή θα πρέπει να ανταποκρίνεται στους οικονομικούς στόχους του έργου, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια και το περιβάλλον και ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις στις τοπικές κοινότητες πλησίον του αγωγού, στα πλαίσια όπου αυτό καθίσταται εφικτό.
- Οι παράγοντες που σχετίζονται με την ιδιοκτησία της γης, όπως, παραδείγματος χάριν, ένας αριθμός γαιοκτημόνων αναμένουν συναινέσεις σε ελαφρύνσεις κόστους.
- Πλάτος τελικού «διαδρόμου».
- Συνθήκες λειτουργίας του αγωγού π.χ. επιτήρηση για ενδεχόμενο διαρροής υγρών υψηλής πίεσης.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η διαδρομή θα πρέπει να έχει τις ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον και να καταλαμβάνει το ελάχιστο δυνατό εμβαδό γης.
- Επιφανειακές και υπόγειες εδαφικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των γεωτεχνικών, υδρογραφικών και μετεωρολογικών συνθηκών. Αυτές περιλαμβάνουν την σταθερότητα του εδάφους , μαζί με τις πλησιέστερες χρήσεις γης που μπορεί να προκαλέσουν αστάθειες στην περιοχή ενδιαφέροντος (υποχώρηση εδάφους λόγω ορυχείων, εκσκαφή γης κ.λπ.).
- Περιοχές πολιτιστικής κληρονομιάς.
- Σχέδια υπάρχουσας και μελλοντικής χρήσης γης. Αυτό μπορεί να καθοριστεί μέσω αναζήτησης σε δημόσια έγγραφα και διαβούλευσης με χωροταξικές υπηρεσίες έτσι ώστε να αναγνωριστούν :

- Δραστηριότητες τρίτων προσώπων
- Γεωργική πρακτική
- Υπάρχουσες υποδομές και υπηρεσίες
- Μελλοντικές αναπτύξεις
- Υπάρχουσες και προσχεδιασμένες υποδομές μεταφορών και υπόγειες ή υπέργειες υπηρεσίες κοινής ωφελείας.
- Ασφάλεια. Η δρομολόγηση πρέπει να γίνεται με βάση την ελαχιστοποίηση των ανησυχιών ανασφάλειας, ιδίως λόγω της ανομίας, της δολιοφθοράς και της καταπάτησης κατά τη διάρκεια της κατασκευής και λειτουργίας του.
- Ακολούθηση υπαρχουσών γραμμικών διαταραχών όπου αυτό καθίσταται δυνατό. Ενδείκνυται η χρήση υφιστάμενων γραμμικών δρομολογήσεων (π.χ. δρόμοι, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας), έτσι ώστε να αποφευχθούν ή να ελαττωθούν οι επιπτώσεις σε ευαίσθητες περιοχές, παρόλο που η χρήση κατειλημμένων διαδρομών από άλλα έργα υποδομής μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια και το δυναμικό διάβρωσης της κατασκευής (π.χ. από ηλεκτρικές παρεμβολές).

4.4 Δημόσια ασφάλεια, περιεχόμενο αγωγού, συνθήκες λειτουργίας και κατηγορία θέσης

Οι βασικές συνθήκες λειτουργίας του αγωγού που μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή διαδρομής είναι :

- το μεταφερόμενο ρευστό προϊόν
- ο επιχειρησιακός φάκελος λειτουργίας
- η τοποθεσία
- το υλικό του αγωγού και η διατομή του

Διάφοροι κώδικες κατηγοριοποιούν το μεταφερόμενο ρευστό ως προς τον δυνητικό του κίνδυνο και τα πιο εύφλεκτα και τοξικά ρευστά θα πρέπει, όπου αυτό είναι εφικτό, να αποφεύγουν κατοικημένες ή αυξημένης ανθρώπινης δραστηριότητας περιοχές. Επίσης, θα πρέπει να δοθεί βάρος στην επιλογή διαδρομής που θα ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εξωτερικών ζημιών σε αυτές τις περιοχές. Επιπρόσθετα, η διαδρομή του αγωγού θα πρέπει να έχει κατάλληλη απόσταση από κτίρια, σύμφωνα με τις αντίστοιχες χρησιμοποιούμενες διατάξεις. Οι χρησιμοποιούμενοι κώδικες εφαρμόζουν ένα σύστημα ταξινόμησης περιοχών ή τοποθεσιών που βασίζεται στη πυκνότητα πληθυσμού ή στον αριθμό των κτιρίων. Οι παράγοντες σχεδιασμού καθορίζονται, μεταγενέστερα, από τα επίπεδα ταξινόμησης.

Το υλικό του αγωγού, η διάμετρος και το περιεχόμενο του επηρεάζουν την πιθανότητα της αστοχίας και της σχετικές με αυτήν συνέπειες :

- ρηγμάτωση αγωγού
- μέγιστος ρυθμός απελευθέρωσης του περιεχομένου προϊόντος
- αλλαγή της κατάστασης του υγρού υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες

- ο συνολικός όγκος προϊόντος που μπορεί να διαφύγει υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης

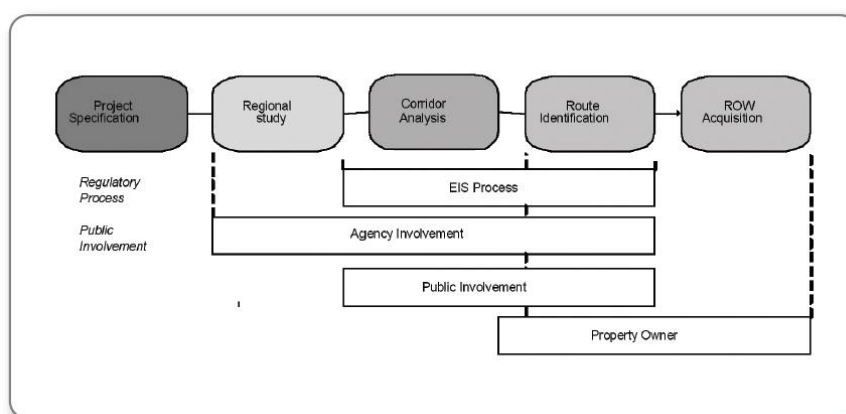
Η επακόλουθη επίπτωση των παραπάνω θα πρέπει να εξεταστεί κατά την διαδικασία της δρομολόγησης, μέσω της εφαρμογής αξιολόγησης QRA ή οποιωνδήποτε άλλων διαδικασιών εκτίμησης ρίσκου.

4.5 Υπέργειες εγκαταστάσεις αγωγών AGIs

Παρόμοια με την διαδρομή του αγωγού, οι τοποθεσίες των υπέργειων εγκαταστάσεων AGIs (Above Ground Installations) στην γραμμή του αγωγού πρέπει να επιλεγθούν με φροντίδα και προσοχή. Η επιλογή αυτών των τοποθεσιών προϋποθέτει την εξέταση και εξισορρόπηση μίας σειράς παραγόντων συμπεριλαμβανομένων των υδραυλικών σωληνώσεων, των ρίσκων ασφάλειας και περιβάλλοντος, των επιτόπιων συνθηκών, της προσβασιμότητας των τοποθεσιών, των υπαρχουσών ενεργειακών υποδομών και της εγγύτητας σε κατοικημένες περιοχές.

4.6 Περιβαλλοντικά και κανονιστικά στάδια

Η διαδρομή του αγωγού καθώς και οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, να αιτιολογηθούν και να εγκριθούν από τις ρυθμιστικές αρχές, το ευρύ κοινό και τους ιδιοκτήτες γης, στα πλαίσια ενός συμμετοχικού σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, η διαβούλευση αποτελεί βασικό μέρος της δρομολόγησης.



Εικόνα 4-3: Βασικά περιβαλλοντικά και κανονιστικά βήματα κατά την διαδικασία της δρομολόγησης (Πηγή : www.wiki.iploca.com, 2015)

Αναλυτικές εκτιμήσεις θα πρέπει να αναληφθούν για να διαπιστωθεί ο αντίκτυπος του αγωγού σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Κατά την επιλογή της διαδρομής και των τοποθεσιών των ενδιάμεσων σημείων, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τον εντοπισμό και την ελαχιστοποίηση των πιθανών επιπτώσεων στα παρακάτω :

- περιοχές Ramsar (υγράτοποι διεθνούς σημασίας, όπως ορίζεται από την διεθνή σύμβαση Ramsar)
- τοποθεσίες ιδιαίτερου επιστημονικού ενδιαφέροντος SSSIs (Sites of Special Scientific Interest)

- εθνικά και υπαίθρια πάρκα
- φυσικά αποθεματικά και φυσικοί πόροι
- χλωρίδα και πανίδα
- δάση υπό διαταγές διατήρησης
- χώροι πολιτιστικής κληρονομιάς και ακτές
- ειδικές ζώνες διατήρησης
- ζώνες ειδικής προστασίας
- περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους AONBs (Areas of Outstanding Natural Beauty)
- αρχαία μνημεία και αρχαιολογικοί χώροι
- ορυκτοί πόροι
- περιοχές προστασίας των υπόγειων υδάτων
- ενδογενείς τοποθεσίες πληθυσμού

Επιπρόσθετα, θα πρέπει να επιτευχθούν τα ακόλουθα, όσο καθίσταται εφικτό :

- Οι τοποθεσίες των απαραίτητων υπέργειων εγκαταστάσεων AGIs (βανοστάσια, σταθμοί μέτρησης, σταθμοί εσωτερικού καθαρισμού των τοιχωμάτων scraper trap stations) θα πρέπει να έχουν χωροθετηθεί έτσι ώστε να μην αποτελούν γενεσιουργές εστίες θορύβου για τον τοπικό πληθυσμό, ιδιαίτερα κατά τις παρεμβάσεις ανακούφισης, την λειτουργία των βαλβίδων και των ανατινάξεων.
- Η αποφυγή της μόλυνσης υπόγειων υδάτων και υδατορευμάτων.
- Η ελαχιστοποίηση του όγκου κυκλοφορίας.
- Η ελαχιστοποίηση των δένδρων που θα πρέπει να αφαιρεθούν.

Ιδανικά, θα έπρεπε να εφαρμοστεί μελέτη ηχοπροστασίας της περιοχής γύρω από την κατασκευή του αγωγού και των μόνιμων εγκαταστάσεων του για την αποφυγή παραπόνων σχετικά με τον παραγόμενο θόρυβο, πριν την τελική υλοποίηση της διαδρομής. Ανάλογα με τα αποτελέσματα της μελέτης, μπορεί να αλλάξει η μέθοδος της δρομολόγησης ή/και της κατασκευής για να ελαχιστοποιηθούν οι ενοχλήσεις. Επιπρόσθετα, οι υπεύθυνοι του έργου θα έπρεπε να έρθουν, στο ίδιο χρονικό σημείο και πρώιμο στάδιο, σε επαφή με τις αρμόδιες τοπικές αρχές σχεδιασμού για τον καθορισμό των απαιτήσεων και του βαθμού κάλυψης μίας, προς διενέργεια, Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Μ.Π.Ε., που αποτελεί απαραίτητη για τον αγωγό και τις περιφερειακές του κατασκευές. Τέλος, εάν απαιτείται, η Μ.Π.Ε. θα πρέπει να καλύπτει το αποτέλεσμα της κατασκευής του αγωγού για τα τοπικά αξιοθέατα και να προβεί σε αναγνώριση μελλοντικών εξελίξεων.

Συνήθως, μετά την διενέργεια της Μ.Π.Ε., οι κανονιστικές διατάξεις ενδέχεται να υπαγορεύουν την προετοιμασία και μίας Δήλωσης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Δ.Π.Ε.). Οι Δ.Π.Ε. συνήθως καλύπτουν τα παρακάτω :

- χλωρίδα
- ειδικά προστατευόμενη και προς εξαφάνιση πανίδα
- επιφανειακά και υπόγεια ύδατα
- διάβρωση εδάφους και γεωλογικής σύνθεσης
- αποκατάσταση της περιοχής, όπου επιβάλλεται
- θέματα ρύπανσης προκαλούμενα από την διαδικασία της κατασκευής
- απειλές και κινδύνους
- πολιτιστική κληρονομιά
- αρχαιολογία
- χερσαία και θαλάσσια οικολογία
- οπτική - αισθητική επίδραση στο τοπίο
- χρήσεις γης και γεωργία
- υδρολογία και υδρογεωλογία
- κυκλοφορία και πρόσβαση στις τοποθεσίες του έργου
- θορύβους και δονήσεις
- ποιότητα αέρα
- σταθερότητα και μόλυνση του τοπίου
- φωτισμό
- τουρισμό και αναψυχή
- κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες
- ασφάλεια

Τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων Δ.Π.Ε. πρέπει, έπειτα, να χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο επιλογής της τελικής διαδρομής του αγωγού, βάσει των κριτηρίων που έχουν αναλυθεί στο Υποκεφάλαιο 4.3.

4.7 Εδαφικές, υπόγειες, γεωτεχνικές και υδρογραφικές συνθήκες

Η γεωγραφία του διασχιζόμενου εδάφους μπορεί, γενικά, να διαιρεθεί σε επιφανειακή τοπογραφία και υπόγεια γεωλογία. Τόσο φυσικά όσο και ανθρωπογενή γεωγραφικά χαρακτηριστικά πρέπει να θεωρηθούν εντός των δύο αυτών κατηγοριών. Τα κύρια γεωγραφικά χαρακτηριστικά που είναι πιθανόν να εντοπιστούν και πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν τα στοιχεία του Πίνακα 4.2 .

Πίνακας 4.2 : Βασικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά που είναι πιθανόν να εντοπιστούν στη περιοχή μελέτης (Πηγή : www.wiki.iploca.com, 2015)

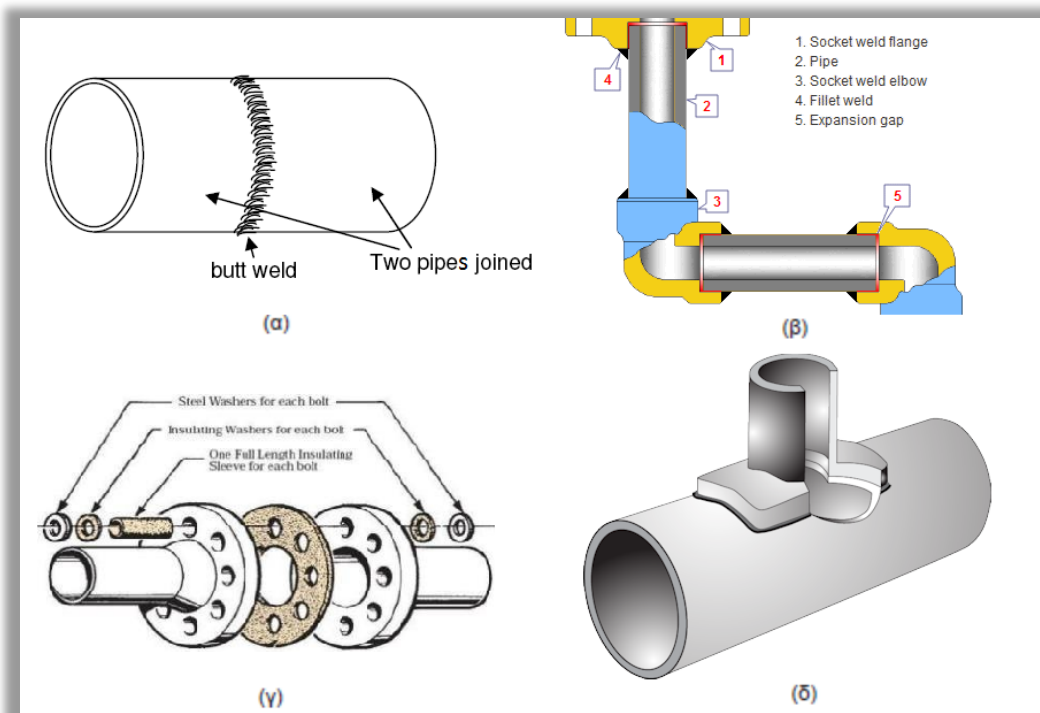
Επιφανειακά	Υπόγεια
Καλλιέργειες, κτηνοτροφία, εκτάσεις δασών	Σεισμική ζώνη
Φυσικό κάλλος, αρχαιολογία, ποτάμια, βουνά	Γεωλογικά στοιχεία
Δασοκομία, Υδρολογικές λεκάνες απορροής	Πλήρωση γης και χώροι διάθεσης αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που έχουν μολυνθεί από νόσους, ραδιενέργεια ή χημικά
Πληθυσμός, τηλεπικοινωνίες και υπηρεσίες	Παλιές, παροντικές ή μελλοντικές εκσκαφές ορυκτών, συμπεριλαμβανομένων των αχαρτογράφητων έργων, αγωγών και υπεδάφιων υπηρεσιών κοινής ωφελείας
Ισοϋνείς καμπύλες, είδος βράχου και εδάφους, νερό, διάβρωση εδάφους	Περιοχές γεωλογικής αστάθειας, συμπεριλαμβανομένων ρηγμάτων, πιθανών αστοχιών και σεισμογενών περιοχών
Καθορισμένες περιοχές, προστατευόμενοι οικότοποι, χλωρίδα και πανίδα	Υφιστάμενες και δυνητικές περιοχές ολισθήσεων γης, καθιζήσεις και διαφορική καθίζηση
	Τούνελ και υπόγειες σήραγγες
	Εδαφική υδρολογία, συμπεριλαμβανομένων των πλημμυρών

Ανεπιθύμητες γεωτεχνικές, υδρογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες θα πρέπει να εντοπίζονται και να αντιμετωπίζονται ορίζοντας αντίστοιχα μέτρα άμβλυνσης. Επίσης, πρέπει να ζητείται η γνώμη των αρχών, γεωλογικών ινστιτούτων και εμπειρογνομόνων εξόρυξης σε γενικές γεωλογικές συνθήκες, περιοχές ολίσθησης, σήραγγες και άλλες πιθανές δυσμενείς εδαφικές συνθήκες. Όταν υπάρχει η πιθανότητα μία εκ αυτών των συνθηκών να εκδηλωθεί κατά τη διάρκεια ζωής ενός αγωγού, πρέπει, απαραίτητα, να ενσωματωθούν διαδικασίες επίβλεψης (monitoring) και συντήρησης. Η επίβλεψη μπορεί να περιλαμβάνει μετρήσεις τοπικών μετακινήσεων του εδάφους, διακυμάνσεις στα επίπεδα του υπεδάφιου νερού και ενδεικτικές αλλαγές στις πιέσεις εσωτερικά του αγωγού. Κάθε, όμως, είδος εδάφους όπως μία έρημος, ένα λοφώδες, δασικό ή αρκτικό έδαφος έχει τις δικές του απαιτήσεις δρομολόγησης και επίβλεψης, λόγω διαφορετικών περιορισμών και πιθανών κινδύνων.

4.8 Θεμελιώδη στοιχεία των αγωγών

Οι γραμμές αγωγών διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα με το προϊόν που μεταφέρουν : αέριο, υγρά καύσιμα, πόσιμο νερό, λύματα κ.α. Επίσης, διαφοροποιούνται λόγω του υλικού κατασκευής τους : ατσάλι, χυτοσίδηρο, τσιμέντο κ.λπ.. Επιπρόσθετα, μπορούν να διαφοροποιηθούν και ως προς τα φυσικά τους χαρακτηριστικά : διάμετρο, πάχος τοιχωμάτων, βάθος τοποθέτησης στο έδαφος κ.α. Ωστόσο, σε επίπεδο σεισμικής συμπεριφοράς και σχεδιασμού, η πιο σημαντική διαφορά αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται. Αν η αξονική και η περιστροφική δυσκαμψία του κόμβου σύνδεσης – άρθρωσης (pipeline joint) είναι συγκρίσιμη με εκείνη τμήματος του αγωγού μακριά από τον κόμβο, η γραμμή του αγωγού θεωρείται συνεχής. Ατσαλένιοι

αγωγοί με συνδέσμους τύπου αυλακώδους περιφερειακής συγκόλλησης (butt-welded girth joints), ολισθαίνοντος τύπου συμπληρωματικής αυχενικής συγκόλλησης (fillet-welded slip joints – WSJ pipelines) και βιδωμένων φλαντζών (<http://www.mie.uth.gr>, 2010 και www.wermac.org, 2015), και HDPE (High Density Poly-Ethylene – υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο) αγωγοί με συγχωνευμένες αρθρώσεις αποτελούν παραδείγματα συνεχούς αγωγού (Εικόνα 4-4).

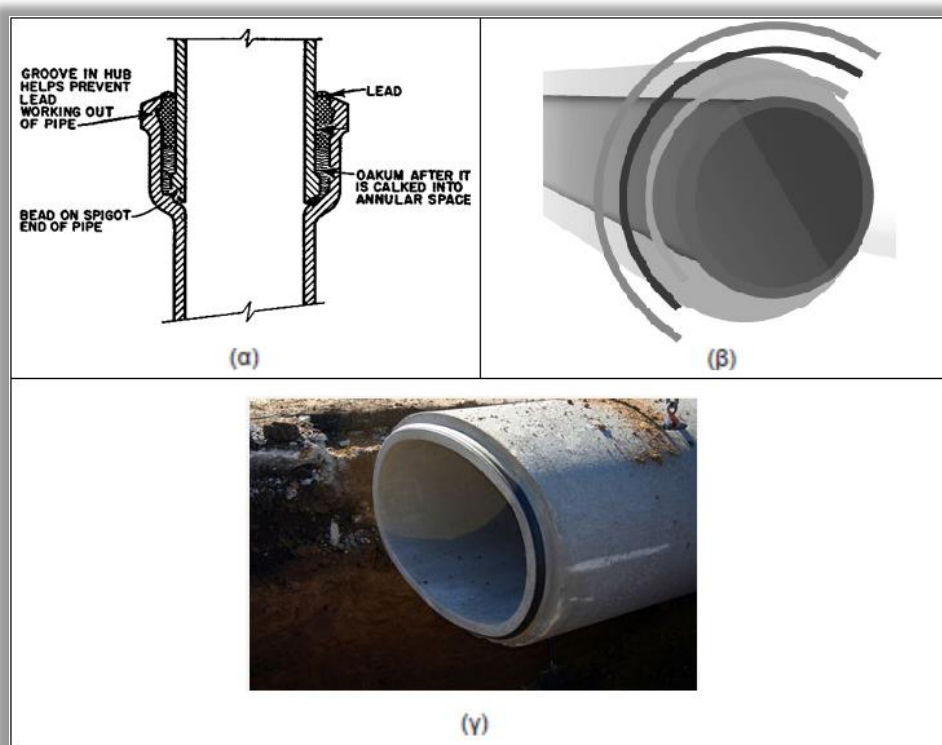


Εικόνα 4-4: Σχηματικές αναπαραστάσεις των αρθρώσεων συνεχών αγωγών : (α) Αυλακώδους περιφερειακής συγκόλλησης; (β) αυχενικής συγκόλλησης (γ) βιδωμένης φλάντζας (δ) πλευρικά συγχωνευμένη άρθρωση. (Πηγή: www.wermac.org, 2015)

Παρόλο που υπάρχουν σημαντικές διαφορές αντοχής μεταξύ των παραπάνω ειδών αρθρώσεων, γενικά όλα αποδίδουν καλύτερα από μία τμηματική γραμμή αγωγού (segmented pipeline) όταν εκτεθούν σε σεισμικές συνθήκες. Ειδικότερα, δεν είναι απίθανο για τις συνεχείς γραμμές να υποστούν ζημιές από το φαινόμενο των μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων (PGD : Permanent Ground Deformation), ωστόσο σπάνια θα πληγούν από την διάδοση των σεισμικών κυμάτων (seismic wave propagation).

Όσο αφορά τις τμηματικές γραμμές αγωγών, η δυσκαμψία των αρθρώσεων των αγωγών είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη τμήματος του αγωγού μακριά από άρθρωση. Οι χυτοσίδηροι αγωγοί με αρθρώσεις σφραγισμένες με μόλυβδο (lead-caulked joints) (www.nuclead.com/leadcaulkapps.html, 2015), οι εύπλαστοι σιδερένιοι αγωγοί με αρθρώσεις με πιεστικά περιβλήματα καουτσούκ (push-on rubber gasketed joints), τσιμεντένιος κυλινδρικός αγωγός με αρθρώσεις ίδιου περιβλήματος καουτσούκ που έχει καλυφθεί εξωτερικά με τσιμεντοκονίαμα (rubber gasketed joints with exterior of cement grout) αποτελούν μερικά παραδείγματα τμηματικών γραμμών αγωγών (Εικόνα 4-5). Λόγω της σχετικά μικρής τους

δυσκαμψίας υποκύπτουν σε αξονική ένταση και ενδέχεται να αποκολληθούν από τις αρθρώσεις πριν συμβεί αστοχία του υλικού σε τμήμα αγωγού μεταξύ των αρθρώσεων. Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, η σεισμική απόδοση αυτού του είδους αγωγών δεν είναι το ίδιο καλή με αυτή των συνεχών γραμμών. Ειδικότερα, υποκύπτουν εξίσου στις παραμένουσες εδαφικές παραμορφώσεις και την φόρτιση λόγω διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (Ο' Rourke & Liu, 2012).



Εικόνα 4-5: Σχηματικές αναπαραστάσεις και φωτογραφία των διατομών στο σημείο τοποθέτησης των αρθρώσεων τμηματικών γραμμών αγωγών. (α) άρθρωση σφραγισμένη με μόλυβδο; (β) άρθρωση με πιεστικά περιβλήματα από καουτσούκ; (γ) άρθρωση με περιβλήματα καουτσούκ, τα οποία έχουν καλυφθεί από τσιμεντοκονίαμα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

4.9 Χάραξη διαδρομής αγωγού : Ένα περίπλοκο και πολύπλοκο πρόβλημα προς επίλυση

Συνοψίζοντας, μετά την θεώρηση του προβλήματος της δρομολόγησης ενός αγωγού και την ανάλυση των παραγόντων επιρροής του κατανοήθηκε, ως έναν ικανοποιητικό βαθμό, η πολύπλοκη και περίπλοκη φύση του. Η πλήρης ικανοποίηση όλων των απαιτούμενων κριτηρίων, όπως αυτά τίθενται για την κοινωνία, το περιβάλλον και την άρτια τεχνική υλοποίηση του έργου (Πίνακας 4.3) αποτελεί αδύνατη. Η κάθε ομάδα μηχανικών, ωστόσο, πρωταρχικά πρέπει να στοχεύει στον καθορισμό των κριτηρίων σχεδιασμού της και να τους αποδίδει τα αντίστοιχα βάρη, έτσι ώστε να συγκεκριμενοποιήσει και απλοποιήσει το πρόβλημα μέχρι την επίτευξη μιας κοινά αποδεκτής λύσης.

Πίνακας 4.3 : Βασικά κριτήρια επιλογής και αξιολόγησης διαδρομής σε ταξινόμηση βάσει του χαρακτήρα των στόχων τους

Κοινωνικά Κριτήρια	Περιβαλλοντικά Κριτήρια	Τεχνικά κριτήρια/Προδιαγραφές του έργου
Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στους ανθρώπους	Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην πανίδα, χλωρίδα και στο περιβάλλον τους	Ελαχιστοποίηση μήκους αγωγού. Μικρότερες διαδρομές μπορεί να προσφέρουν οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και λογιστικά προνόμια.
Ελαχιστοποίηση της κοινωνικής ενόχλησης και των αντικρουόμενων χρήσεων γης	Αποφυγή επιπτώσεων σε αρχαιολογική/πολιτιστική κληρονομιά	Ελαχιστοποίηση των κύριων εδαφικών περιορισμών
Ελαχιστοποίηση επιδράσεων σε άλλες κατασκευές πλησίον του αγωγού	Ελαχιστοποίηση των αισθητικών επιπτώσεων	Ελαχιστοποίηση κόστους και δυσκολίας – η διαδρομή πρέπει να περιλαμβάνει όλους τους κατασκευαστικούς παράγοντες και τις επιπτώσεις
Ελαχιστοποίηση της εγγύτητας σε δημόσια κέντρα	Αποφυγή προστατευόμενων περιοχών	Ελαχιστοποίηση του αριθμού περιοχών όπου η κατασκευή καθίσταται δύσκολη – απότομες πλαγιές, ασταθή εδαφικά υλικά, υψηλός υδροφόρος ορίζοντας
Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων στον σχεδιασμό και χρήσεων γης	Ελαχιστοποίηση ενοχλήσεων ευαίσθητων και ασταθών τύπων γης	Ελαχιστοποίηση περιοχών πιθανών γεωκινδύνων
Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων σε εξορύξεις και αγροτικές, αστικές και βιομηχανικές περιοχές	Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων σε διασταυρώσεις ποταμών	Αποφυγή βραχώδους και ασταθούς εδάφους, συνεπώς ελαχιστοποιώντας το ρίσκο της υποχώρησης εδάφους και έκθεσης του αγωγού
Συνυπολογισμός δημόσιας γνώμης και ασφάλειας	Περιοχές με υψηλής σημασίας διατήρηση	Αποφυγή φυσικών περιορισμών
Αποφυγή κατοικιών και άλλων ευαίσθητων χρήσεων γης και διατήρηση ασφαλούς απόστασης	Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	Αποφυγή επίγειων ναρκών
Αποφυγή πιθανούς διαμάχης για κυριότητα επί της γης	Ελαχιστοποίηση της αφαίρεσης φυτών	Ελαχιστοποίηση απότομων τοπογραφικών αλλαγών
Αποφυγή διασταυρούμενων ιδιοκτησιών	Ελαχιστοποίηση του καλυπτόμενου εμβαδού γης από το υλοποιηθέν έργο	Αποφυγή τοποθεσιών εξορύξης άνθρακα, υπόγειων κατασκευών και σπηλιών, περιοχών καθίζησης
Αποφυγή αγροτικής γης	Ελαχιστοποίηση αριθμού επιπτώσεων στο τοπίο	Ελαχιστοποίηση εξορύξεων
Αποφυγή δασικών εκτάσεων	Αποφυγή πάρκων, φυσικών καταφυγίων και άλλων περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών	Ελαχιστοποίηση διασταυρώσεων με γραμμικές κατασκευές και οντότητες (δρόμοι, ηλεκτρικά καλώδια, ράγες, ποτάμια κ.λπ.). Εξέταση υπέργειων επιλύσεων.
	Ελαχιστοποίηση επιπτώσεων στη τοπική βλάστηση	Ελαχιστοποίηση περιοχών ευαίσθητων σε ρευστοποίηση εδάφους
	Αποφυγή περιοχών Ramsar και άλλων παγκοσμίων καταφυγίων	Ελαχιστοποίηση αριθμού περιοχών σε κατολισθήσεις
	Αποφυγή προστατευόμενων περιοχών	Ελαχιστοποίηση συναντήσεων με σημεία πλημμυρών
	Αποφυγή μολυσμένης γης	Αποφυγή παράλληλης διέλευσης με ηλεκτρικές γραμμές, λόγω πιθανής διάβρωσης
	Ακολούθηση γραμμικών στοιχείων, όσο είναι εφικτό, όπως όρια ιδιοκτησιών	

4.10 Χάραξη υπεράκτιου αγωγού

4.10.1 Παράγοντες επιρροής της επιλογής διαδρομής

Τα προαναφερθέντα αφορούν, κυρίως, την διαδικασία επιλογής και κατασκευής αγωγών σε χερσαίο έδαφος, επίγεια και υπόγεια. Όσον αφορά την υπεράκτια τοποθέτηση αγωγού (υποθαλάσσια), τα σημεία έναρξης και λήξης του ποντισμένου καλωδίου της γραμμής του συνήθως καθορίζονται από τις ενδιάμεσες τοποθεσίες παραγωγής και παράδοσης, ενώ η διαδρομή μεταξύ των προαναφερθέντων σημείων έχει δευτερεύων χαρακτήρα και επιλέγεται με σκοπό την εξυπηρέτηση των σημείων αυτών. «Η διαφορά μεταξύ μίας ορθά επιλεχθείσας και μίας ελλιπώς επιλεχθείσας διαδρομής μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια σημαντικής ποσότητας ζών και δολαρίων» (Dean, 2009).

Ο στόχος της διαδικασίας επιλογής είναι να βρεθεί μία διαδρομή που παρέχει την ασφάλεια, το προνόμιο της πρακτικής και οικονομικά βιώσιμης εγκατάστασης και επιτρέπει την λειτουργία, εποπτεία, συντήρηση και επιδιόρθωση όποτε καθίσταται απαραίτητο. Οι Palmer and King (2006) ορίζουν τους κύριους παράγοντες ως εξής :

- γεωπολιτική και κανονιστικές διατάξεις
- αντίκτυπο στο περιβάλλον
- φυσικοί παράγοντες
- αλληλεπίδραση με άλλες χρήσεις του θαλάσσιου πυθμένα

Η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου, των φυσικών παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων με άλλες χρήσεις του θαλάσσιου πυθμένα, συνήθως, περιλαμβάνει:

- μία αξιολόγηση των γεωλογικών δεδομένων
- μία ωκεανογραφική αποτύπωση
- μία βαθυμετρική και γεωφυσική αποτύπωση, η οποία περιλαμβάνει και τρισδιάστατη αναπαράσταση του πυθμένα
- μία αξιολόγηση των γεωκινδύνων, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης του σεισμικού ρίσκου σε σεισμογενείς περιοχές
- μία γεωτεχνική μελέτη
- αναζήτηση δανειστών προς εκπόνηση

4.10.2 Απαραίτητες μελέτες για χάραξη

Στα πλαίσια της διαδικασίας επιλογής της διαδρομής που θα ακολουθεί ο υπεράκτιος αγωγός, πρέπει να εκπονηθούν μελέτες για ενδεδειγμένη αξιολόγηση των γεωκινδύνων και λοιπών φυσικών παραγόντων που θα καθορίσουν την μετέπειτα κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση του. Ειδικότερα (Dean, 2009):

- Οι βαθυμετρικές μελέτες αποτελούν καθοριστικό παράγοντα του σχεδιασμού του αγωγού και της επιλογής των κατάλληλων τεχνολογιών εγκατάστασης. Ο Mullee (1995) περιγράφει μία προκαταρκτική μελέτη με εφαρμογή προσεγγιστικής βαθυμετρίας σε μία ζώνη πλάτους 8-10 χιλιομέτρων, την οποία ακολουθεί μία πιο ακριβής βαθυμετρία σε μία ζώνη πλάτους ενός χιλιομέτρου. Το OSIF (Offshore Soil Investigation Forum, 1999) συνιστά να διεξαχθεί μία βυθομετρική και γεωφυσική έρευνα σε ένα «διάδρομο» πλάτους από 500 έως 1000 μέτρα, ο οποίος περικλείει στο εσωτερικό του την προγραμματισμένη διαδρομή του αγωγού ή του καλωδίου.
- Όσον αφορά τις προσεγγίσεις ακτών, το OSIF (1999) προτείνει τρεις γεωτεχνικές γεωτρήσεις ή/και ελέγχους in-situ σε τοποθεσίες ανά ένα χιλιόμετρο. Ένα τυπικό υπεράκτιο πρόγραμμα, ιδανικά, θα περιλάμβανε και περαιτέρω δειγματοληψία και in-situ δοκιμές στις χιλιομετρικές θέσεις κατά μήκος όλης της διαδρομής του αγωγού, με επιπρόσθετες έρευνες όπου παρουσιάζονται γεωκίνδυνοι ή απαιτούνται κατασκευές ειδικού τύπου όπως τα στηρίγματα ανοιγμάτων και οι διασταυρώσεις αγωγών. Το βάθος των

γεωτρήσεων, συνήθως, θα εξαρτηθεί από το μέγεθος του καλωδίου ή του αγωγού, τα φυσικά χαρακτηριστικά του βυθού και τους ενδεχόμενους γεωκινδύνους, καθώς και την απόφαση τοποθέτησης του επί της επιφανείας του πυθμένα ή μίας ανοιχτής τάφρου ή θαψίματος αυτού. Τα προτεινόμενα ελάχιστα βάθη των γεωτρήσεων αποκτούνται μέσα σε 1-2 λεπτά στις περιοχές όπου δεν υπάρχουν τάφροι, το βάθος της τάφρου συν ένα μέτρο στις περιοχές με τάφρους, έως πέντε μέτρα ή περισσότερο σε μεταβατικές ζώνες εδάφους ή σε σημεία διέλευσης του αγωγού και βαθύτερα αν απαιτούνται για την διερεύνηση των πιθανών κινδύνων του πυθμένα, όπως σημεία όπου στην επιφάνεια του πυθμένα παρατηρούνται ασυνέχειες από λάκκους εναπόθεσης (rock marks) και εξομαλυνθείσες περιοχές (scours).

- Εξειδικευμένοι γεωτεχνικοί έλεγχοι μπορούν να περαιωθούν με μία οικονομική επιβάρυνση. Το OSIF (1999) συνιστά να δοθεί βάρος στη δημιουργία «μοντέλων οργώματος» (ploughing models) και εκτέλεση δοκιμών υδροβολών -jetting tests- (Noad, 1993), στη δημιουργία μοντέλων μικρής κλίμακας για έλεγχο καθιζήσεων υπό του αγωγού, σε δοκιμές αντοχής των υλικών και σε ελέγχους της θερμικής αγωγιμότητας του θαλάσσιου πυθμένα. Επίσης, εργαστηριακές δοκιμές αναφορικά με την επίδραση του ρυθμού καταπόνησης στην αντοχή του εδάφους μπορούν να βοηθήσουν στο σχεδιασμό της εγκατάστασης του αγωγού. Τέλος, ο έλεγχος της ηλεκτρικής αντίστασης και οι γεωχημικές και βακτηριολογικές δοκιμές μπορούν να βοηθήσουν στην εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης του υλικού του αγωγού από τον αρμόδιο μηχανικό και, συνεπώς, την επιλογή κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΑΓΩΓΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του πέμπτου κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής αναλύονται, αρχικά, τα βασικά χαρακτηριστικά των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων με στόχο την εις βάθος κατανόηση τους και περιγράφεται συνοπτικά το λογισμικό ArcMap, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε κατά τις εφαρμογές του Κεφαλαίου 6.

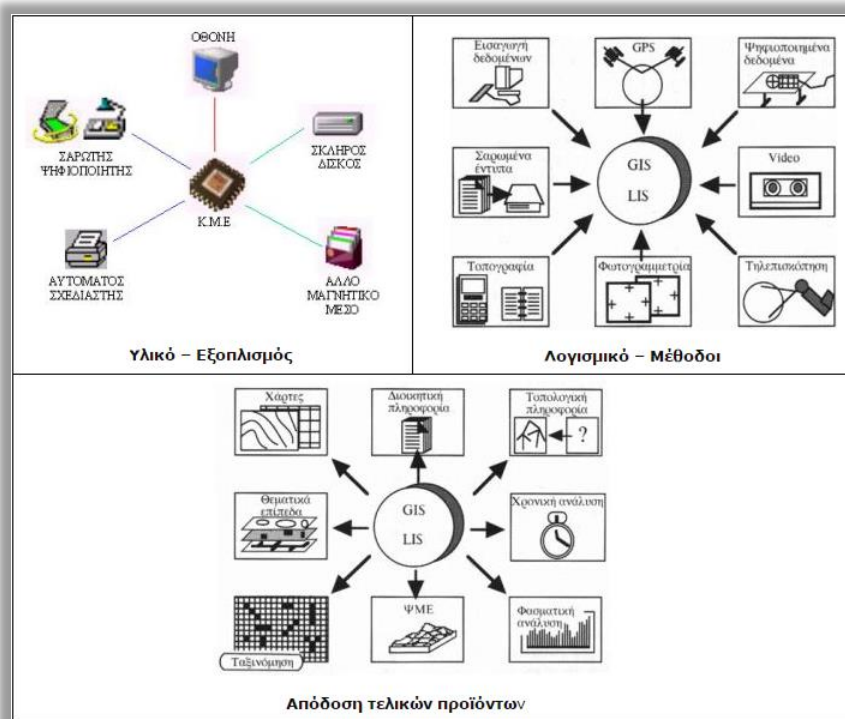
5.2 Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα

5.2.1 Γενικά

Τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (Γ.Π.Σ. ή G.I.S.) αποτελούν επιστημονικά και τεχνολογικά εργαλεία που επιτρέπουν την ενσωμάτωση δεδομένων από διαφορετικές πηγές σε μία κεντρική βάση δεδομένων (γεωβάση) από την οποία διαμορφώνονται και αναλύονται βάσει της χωρικής συνιστώσας τους. Κατά την γενική έννοια, ο όρος περιγράφει κάθε πληροφοριακό σύστημα που ενσωματώνει, αποθηκεύει, επεξεργάζεται, αναλύει, διαμοιράζει και απεικονίζει γεωγραφικές πληροφορίες (www.en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system, 2015). Κύριος στόχος τους είναι η κατανόηση σχέσεων μεταξύ, θεωρητικά ασύνδετων, δεδομένων καθώς και μοτίβων και τάσεων που παρουσιάζονται σε αυτά.

Ένα Γ.Π.Σ. μπορεί να συσχετίσει, όπως προαναφέρθηκε, ασύνδετες μεταξύ τους πληροφορίες χρησιμοποιώντας ως πρωτεύουσα μεταβλητή – κλειδί (key index variable) την τοποθεσία. Τοποθεσίες ή εκτάσεις στον γήινο χωροχρόνο μπορούν να καταγραφούν ως ημερομηνίες και ώρες εμφάνισης ή/και ως σύνολο τρισδιάστατων συντεταγμένων x , y και z , οι οποίες αντιπροσωπεύουν το γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και, συνήθως γεωμετρικό, ύψος αντίστοιχα. Όλες οι αναφορές της χωροχρονικής θέσης και έκτασης της γης θα έπρεπε, ιδανικά, να μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους και τελικώς με μία «πραγματική» φυσική τοποθεσία ή έκταση. Αυτό το βασικό χαρακτηριστικό των Γ.Π.Σ. έχει αρχίσει να ανοίγει νέους δρόμους σε πολλούς τομείς της επιστημονικής έρευνας και τα καθιστά απαραίτητα σε διαδικασίες όπου ο χωροχρόνος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί ότι τα Γ.Π.Σ., ως ολοκληρωμένη έννοια (integrated GIS concept), συμπεριλαμβάνουν τόσο τα δεδομένα (ο ουσιαστικός πυρήνας τους), το λογισμικό και τον μηχανικό εξοπλισμό, όσο και τις διαδικασίες και το ανθρώπινο δυναμικό, που αποτελούν αναπόσπαστα τμήματα ενός οργανισμού με πρωταρχική δραστηριότητα την διαχείριση της πληροφορίας. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στα δεδομένα και την επεξεργασία τους μέσω του υπάρχοντος λογισμικού (Εικόνα 5-1).



Εικόνα 5-1: Σχηματικές αναπαραστάσεις τριών βασικών τμημάτων ενός Γ.Π.Σ. : Του υλικού και του εξοπλισμού για συλλογή και προβολή της πληροφορίας, του λογισμικού και των μεθόδων για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων και της απόδοσης των τελικών προϊόντων. (Πηγή: <http://xsomaras.somweb.gr/>, 2013)

5.2.2 Ροή Εργασιών σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών

Ένα Γ.Π.Σ. , ως πληροφοριακό σύστημα, συντελείται από μία αλληλουχία διαδικασιών, κατά τις οποίες λαμβάνουν μέρος οι απαραίτητες εργασίες για την εξαγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος. Αναλυτικότερα, αυτές οι επιμέρους διαδικασίες, με την σειρά, είναι:

- **Εισαγωγή :** Αποτελεί την διαδικασία που είναι υπεύθυνη για την τροφοδότηση του συστήματος με δεδομένα. Αυτά, όπως και αναλύεται παρακάτω, έχουν συνήθως ψηφιακή δομή (Υποκεφάλαιο 5.2.4) και αποκτούν γεωγραφική και περιγραφική διάσταση.
- **Επεξεργασία :** Είναι το σύνολο των διαδικασιών που καθιστά τα δεδομένα κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση και χρήση. Αυτό, συνήθως, αφορά την ορθή απόδοση του συστήματος συντεταγμένων, την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των δεδομένων, την διόρθωση σφαλμάτων και την μετάβαση από ένα μοντέλο αναπαράστασης σε άλλο (Υποκεφάλαιο 5.2.4).
- **Ανάλυση :** Κατά την οποία ο χρήστης – αναλυτής θέτει ερωτήσεις (queries) χωρικού ή/και περιγραφικού τύπου προς απάντηση, σύμφωνα με την δυνατότητα που προσφέρεται από τα ίδια τα δεδομένα.
- **Απόδοση :** Κατά την οποία τα αποτελέσματα αποδίδονται με αναλογικά μέσα, μέσω της οργάνωσης της εκτύπωσης χαρτογραφικών προϊόντων ή της απόδοσης σε ψηφιακές πλατφόρμες είτε της χρήσης του Διαδικτύου, μέσω

διαδραστικών χαρτών (Web-based GIS), είτε μέσω εσωτερικών δικτύων οργανισμών και εφαρμογών που υποστηρίζουν πολλαπλούς χρήστες με διακριτούς ρόλους (π.χ. Enterprise GIS).

- *Έλεγχος* : Κάθε σύστημα οφείλει να έχει, τελικώς, μηχανισμούς ανάδρασης (feedback) ώστε να εξασφαλίζεται η ορθότητα και ακρίβεια των πληροφοριών. Αυτό μπορεί να γίνεται μέσω λογισμικού με διαδικασίες κανόνων επικύρωσης, με διαδικασίες ελέγχου ακρίβειας συντεταγμένων και, γενικότερα, με διαδικασίες ποιοτικών και ποσοτικών ελέγχων ανάλογα με τη φύση των δεδομένων.

5.2.3 Μοντέλο δεδομένων

Τα Γ.Π.Σ., όπως προαναφέρθηκε, αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα σε γεωγραφικό ή χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Βασικό τους χαρακτηριστικό, όμως, είναι ότι αυτά τα δεδομένα χωρικού τύπου συνδέονται με εκείνα περιγραφικού τύπου. Η χαρακτηριστική, αυτή, παρεχόμενη δυνατότητα σύνδεσης προσφέρει μία λεπτομερέστερη θεώρηση των χωρικών δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα προσφέρει και χωρική υπόσταση στα περιγραφικά δεδομένα. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για αυτή την λειτουργία βασίζεται:

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

Το αντικειμενοστραφές μοντέλο (το οποίο εφαρμόζεται) τείνει να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε σύγχρονες εφαρμογές Γ.Π.Σ. λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων του, σε σχέση με το σχεσιακό μοντέλο, που παρέχει για την εύκολη και απλοποιημένη μοντελοποίηση σύνθετων φαινομένων και αντικειμένων με χωρική διάσταση (www.el.wikipedia.org/wiki/Σύστημα_Γεωγραφικών_Πληροφοριών).

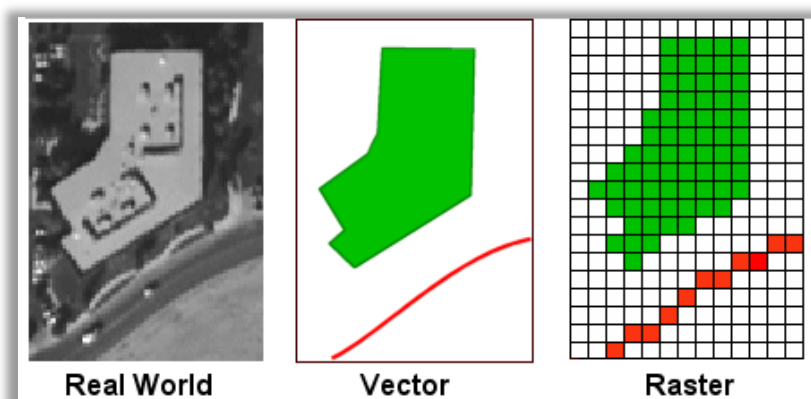
5.2.4 Αναπαράσταση των δεδομένων

Κατά την συντριπτική πλειοψηφία, τα πρωτογενή δεδομένα ενός σημερινού Γ.Π.Σ. αναπαριστούνται ψηφιακά, μέσω της συλλογής τους με την χρήση ψηφιακών μεθόδων αποτύπωσης χώρου (Συστήματα Εντοπισμού Παγκόσμιας Θέσης / G.P.S., Τηλεπισκόπηση / Remote Sensing) ή της ψηφιοποίησης αναλογικών δεδομένων (τυπωμένοι χάρτες κ.λπ.). Οι υπολογιστές αναπαριστούν τα δεδομένα με τη μορφή των δυαδικών ψηφίων 0 και 1, οπότε και κάθε δοθέν στοιχείο που αφορά την επιφάνεια της Γης ανάγεται τελικά από το σύστημα του Γ.Π.Σ. σε κάποιο συνδυασμό των 0 και 1. Συνεπώς, αν και η χρήση της λέξης «ψηφιακά» θεωρείται εσφαλμένη από πλευράς ονομασίας (ο όρος «ψηφιακός» προέρχεται από την λατινική λέξη «digitus» που σημαίνει δάκτυλο χεριού, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα μέτρησης

που χρησιμοποιείται έχει εύρος από το 0 έως το 9) ακολουθείται η σύμβαση χρήσης της για δυαδικές αναπαραστάσεις της ηλεκτρονικής τεχνολογίας.

Ειδικότερα, τα δεδομένα αναπαριστούν πραγματικές οντότητες (π.χ. δρόμοι, χρήσεις γης, τοπογραφικό ανάγλυφο, δέντρα, ποτάμια κ.λπ.), με τα ψηφιακά δεδομένα να προσδιορίζουν το τελικό μείγμα. Τα πραγματικά αντικείμενα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, οι οποίες αποτελούν τους δύο θεμελιώδεις τρόπους γεωγραφικής αναπαράστασης : τα διακριτά αντικείμενα (discrete objects) και τα συνεχή πεδία (continuous fields). Η θεώρηση των διακριτών αντικειμένων (π.χ. ενός κτηρίου) αναπαριστά το γεωγραφικό κόσμο με τη μορφή αντικειμένων με καθορισμένα όρια μέσα σε έναν κατά τα άλλα κενό χώρο. Αντίθετα, η θεώρηση του συνεχούς πεδίου (π.χ. ύψους βροχόπτωσης, τοπογραφικού ανάγλυφου κ.λπ.) αναπαριστά τον πραγματικό κόσμο με έναν πεπερασμένο αριθμό μεταβλητών, για κάθε μία από τις οποίες προσδιορίζεται η τιμή της σε κάθε πιθανή θέση (P. Longley et al. , 2010).

Τα συνεχή πεδία και τα διακριτά αντικείμενα, ωστόσο, αποτελούν δύο εννοιολογικές θεωρήσεις γεωγραφικών φαινομένων που δεν λύνουν το ζήτημα της προαναφερθείσας ψηφιακής αναπαράστασης. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι και στις δύο θεωρήσεις εμπεριέχεται άπειρη ποσότητα πληροφοριών στην περίπτωση του ορισμού μεταβλητών ανά κάθε σημείο, η οποία δεν μπορεί να αναπαρασταθεί λόγω τεχνικών περιορισμών των υπολογιστών. Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των γεωγραφικών φαινομένων σε μορφές που μπορούν να κωδικοποιηθούν στις βάσεις δεδομένων των υπολογιστών είναι η ψηφιδωτή (raster) και η διανυσματική (vector) αναπαράσταση (Εικόνα 5-2). Θεωρητικά, και οι δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κωδικοποίηση τόσο των συνεχών όσο και των διακριτών οντοτήτων, πρακτικά, ωστόσο, η ψηφιδωτή αναπαράσταση συσχετίζεται με τα συνεχή πεδία και η διανυσματική με τα διακριτά αντικείμενα.



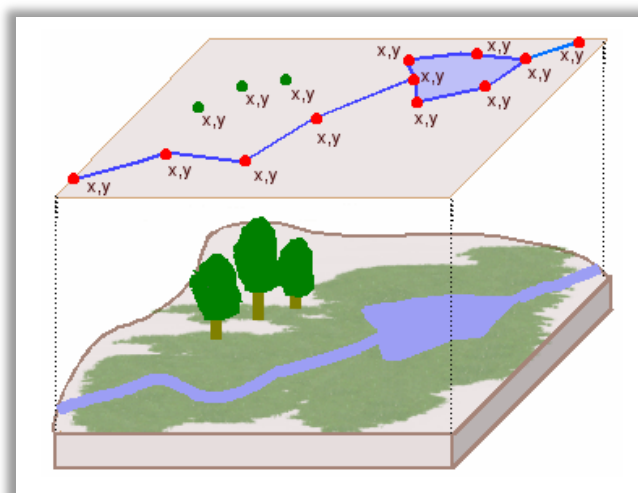
Εικόνα 5-2: Εμφανής η διαφορά της αναπαράστασης των πραγματικών αντικειμένων κατά την διανυσματική (vector) και ψηφιδωτή (raster) αναπαράσταση αντίστοιχα. (Πηγή: www.geography.hunter.cuny.edu, 2015)

Μοντέλο Διανυσματικών Δεδομένων

Το μοντέλο διανυσματικής αναπαράστασης δεδομένων (vector data model), όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται στην υπόθεση ότι η επιφάνεια της γης αποτελείται από διακριτά αντικείμενα όπως δέντρα, ποτάμια, λίμνες κ.λπ. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να αντιπροσωπευτούν ως σημειακές, γραμμικές και πολυγωνικές οντότητες με καλά καθορισμένα όρια. Τα όρια αυτών των οντοτήτων καθορίζονται από ζεύγη συντεταγμένων (x,y) , τα οποία και τα αναφέρουν σε μία θέση στον πραγματικό κόσμο (Εικόνα 5-3). Ειδικότερα:

- Οι σημειακές οντότητες ορίζονται από ένα ζεύγος συντεταγμένων (x,y) .
- Οι γραμμικές οντότητες ορίζονται ως δύο ή περισσότερα ζεύγη συντεταγμένων (x,y) .
- Οι πολυγωνικές οντότητες ορίζονται από τις γραμμές που κλείνουν έτσι ώστε να σχηματίσουν το πολύγωνο.

Σε κάθε μοντέλο διανυσματικών αναπαραστάσεων, αντιστοιχείται στην κάθε οντότητα μία μοναδική αριθμητική αναγνωριστική τιμή, η οποία αποθηκεύεται ως εγγραφή σε έναν πίνακα γνωρισμάτων (attribute table).

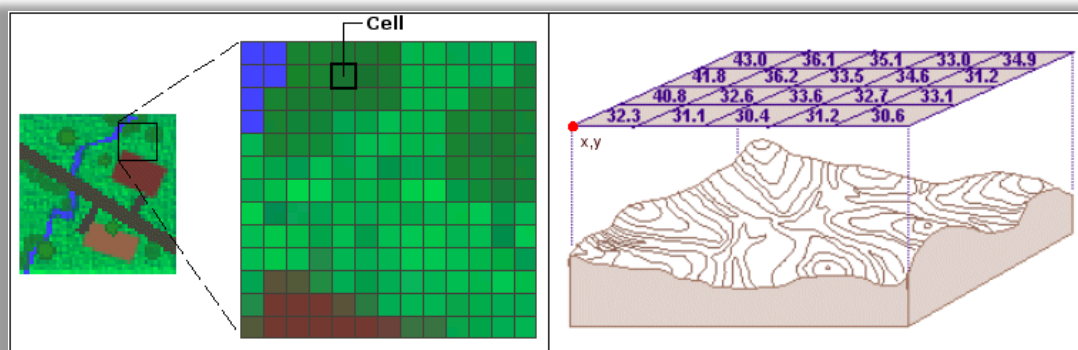


Εικόνα 5-3: Το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων αναπαριστά οντότητες του πραγματικού κόσμου ως σημεία, γραμμές και πολύγωνα, τα όρια των οποίων καθορίζονται από ζεύγη συντεταγμένων (x,y) . (Πηγή: www.geography.hunter.cuny.edu, 2015)

Μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων

Στο μοντέλο ψηφιδωτής αναπαράστασης δεδομένων η γη αναπαρίσταται ως ένα πλέγμα κελιών ίσου μεγέθους, στα οποία και ανατίθενται χαρακτηριστικά ή ιδιότητες. Ένα μεμονωμένο κελί αντιπροσωπεύει ένα τμήμα γης συγκεκριμένων διαστάσεων και αποτελεί την βασική μονάδα ανάλυσης του μοντέλου (Εικόνα 5-4). Σε αντίθεση με το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων, όπου ζεύγη συντεταγμένων (x,y) χρησιμοποιούνται για τον ορισμό του σχήματος και της τοποθεσίας των οντοτήτων, στο μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων μόνο ένα ζεύγος (x,y) είναι ουσιαστικά παρόν, το οποίο ονομάζεται ζεύγος προέλευσης και ορίζει τη θέση του κάθε κυττάρου. Το ζεύγος αυτό μπορεί να αναφέρεται στο κέντρο του κελιού ή σε κάποια από τις άκρες

του. Επίσης, σε κάθε κελί εκχωρείται μία αριθμητική τιμή, η οποία ενδέχεται να αντιπροσωπεύει κάθε είδους πληροφορία σχετικά με την συγκεκριμένη γεωγραφική θέση όπως μέτρηση υψομέτρου (Εικόνα 5-4) ή και έναν κωδικό αριθμό προσδιορισμού του είδους βλάστησης.



Εικόνα 5-4: Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται η διάταξη κελιών των ψηφιδωτών δεδομένων, ενώ δεξιά η ανάθεση υψομετρικών τιμών σε κάθε κελί. (Πηγή: www.webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2, 2008)

Μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων και μοντέλο διανυσματικών δεδομένων : Χρησιμότητα και ακρίβεια αναπαράστασης

Και τα δύο είδη μοντέλων καθίστανται πολύ χρήσιμα στην αναπαράσταση γεωγραφικών πληροφοριών, ωστόσο, ενδέχεται το ένα να είναι καταλληλότερο του άλλου όταν πρόκειται για συγκεκριμένο είδος γεωγραφικών πληροφοριών ή διαφορετικών ειδών ερωτήσεων. Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο διανυσματικών δεδομένων προτιμάται για αντικείμενα που έχουν διακριτά όρια, αλλά και το μοντέλο ψηφιδωτών δεδομένων παρέχει την δυνατότητα αναπαράστασης διακριτών χαρακτηριστικών υπό την μορφή συνδεδεμένων κελιών με την ίδια χαρακτηριστική τιμή (κτήριο της Εικόνας 5-4). Επιπρόσθετα, η αναπαράσταση διακριτών αντικειμένων με το πρώτο μοντέλο καταλαμβάνει λιγότερο χώρο, αλλά είναι λιγότερο ακριβής.

Σε αντίθεση με τα διακριτά, τα συνεχή γεωγραφικά δεδομένα προτείνεται να αναπαριστώνται με το μοντέλο των ψηφιδωτών δεδομένων, γιατί δεν έχουν σαφώς καθορισμένα όρια και αλλάζουν συνεχώς εντός μίας δεδομένης περιοχής. Από την άλλη πλευρά, βέβαια, η αποτύπωση ενός επιφανειακού ή συνεχούς αντικειμένου σε διανυσματική μορφή μπορεί να θεωρηθεί αποδοτικότερη, διότι σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται να καθοριστούν μόνο οι θέσεις των κορυφών του πολυγώνου και όχι όλες οι τιμές των ενδιάμεσων κελιών που το συνθέτουν. Αυτές οι ιδέες περιλαμβάνονται περιεκτικά στο σχόλιο των P. Longley et al. (2010) “Raster is vaster but vector is correcter”, που μεταφράζεται ελεύθερα στο «Το ψηφιδωτό είναι ογκωδέστερο αλλά το διάνυσμα είναι ορθότερο», επισημαίνοντας την δυσκολία επιλογής μεταξύ των δύο διαφορετικών αυτών μοντέλων.

Όσον αφορά την ακρίβεια των αναπαραστάσεων, που αποτελεί ένα από τα βασικότερα κριτήρια επιλογής ενός εκ των δύο, η θεώρηση μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύπλοκη. Για την δημιουργία μίας ακριβούς προσέγγισης μίας επιφανείας σε ψηφιδωτή μορφή, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πολλά κελιά μικρών διαστάσεων, οπότε ο αριθμός των κελιών αυξάνεται αναλογικά της ακριβείας (στην πραγματικότητα, κάθε διχοτόμηση του πλάτους και του ύψους κάθε κελιού προκαλεί τον τετραπλασιασμό του αριθμού των κελιών), ταυτόχρονα με το μέγεθος των εξαγόμενων αρχείων. Από την άλλη πλευρά, η φαινομενική ακρίβεια της διανυσματικής αναπαράστασης αμφισβητείται, αφού πολλά γεωγραφικά φαινόμενα δεν μπορούν να εντοπιστούν με υψηλή ακρίβεια. Έτσι, παρόλο που τα δεδομένα ψηφιδωτού τύπου φαντάζουν λιγότερο ελκυστικά, ίσως είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτικά της εγγενούς ποιότητας των δοθέντων δεδομένων.

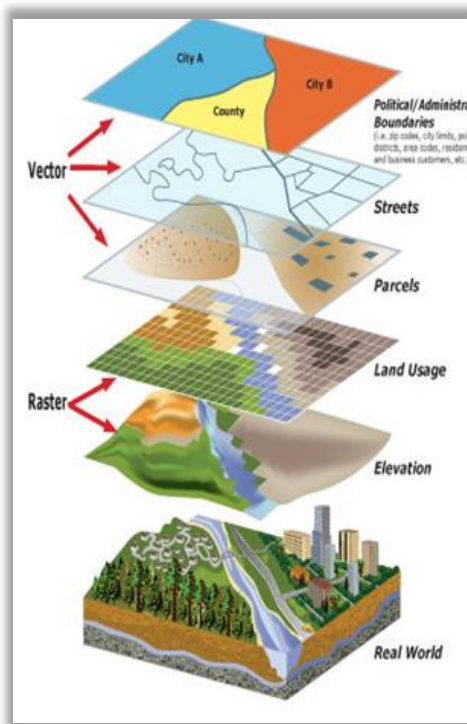
5.2.5 Θεμελιώδεις έννοιες των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών

Μετά την περιγραφή των μοντέλων δεδομένων καθώς και τον τρόπο αναπαράστασης τους, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν μερικές βασικές έννοιες των Γ.Π.Σ., οι οποίες αποτελούν βασικούς μηχανισμούς και βαρύνουσας σημασίας ορολογίες που συνδράμουν στην συνολική θεώρηση και την καλύτερη κατανόηση των μετέπειτα μελετών περίπτωσης. Ειδικότερα, ως βασικές έννοιες θεωρούνται οι εξής:

- Γεωγραφική θέση ή τοποθεσία (location) : Εννοείται μία ορισμένη θέση στην επιφάνεια της γης, καθορισμένη βάσει του χρησιμοποιούμενου γεωγραφικού συστήματος αναφοράς (Κουτσόπουλος, 2009).
- Γεωγραφικό σύστημα αναφοράς (geographical coordinate system) : Αποτελεί το σύστημα γεωγραφικών συντεταγμένων (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος) στο οποίο ανάγονται τα συλλεχθέντα δεδομένα.
- Χωρική κατανομή (spatial distribution) : Η διάταξη με την οποία τα αντικείμενα, φαινόμενα κ.λπ. που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης κατανέμονται στο χώρο.
- Χωρικές γεωγραφικές οντότητες (spatial geographic features) : Είναι τα γεωμετρικά καθορισμένα σχήματα που έχουν συγκεκριμένη τοποθεσία στην πραγματικότητα και απεικονίζονται στους χάρτες σύμφωνα με αυτή (<http://xsomaras.somweb.gr/>, 2013), καθώς και απαρτίζουν τον γεωγραφικό χώρο. Χωρίζονται σε σημειακές, γραμμικές και πολυγωνικές, οι οποίες παρουσιάζονται στο Υποκεφάλαιο 5.2.4.
- Τοπολογία (topology) : Στον τομέα της γεωπληροφορικής (στον οποίο συγκαταλέγονται τα Γ.Π.Σ.) εννοείται το σύνολο των γεωμετρικών κανόνων που πρέπει να ακολουθεί η γεωγραφική πληροφορία, ανάλογα με την φύση της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένα οικοδομικό πολύγωνο που αναπαριστάται ως πολύγωνο, του οποίου τα όρια δεν πρέπει να ταυτίζονται με αυτά των γειτονικών πολυγώνων, δηλαδή αποφεύγεται η αλληλοεπικάλυψη τους .
- Μεταδεδομένα (metadata) : Είναι δεδομένα που περιγράφουν άλλα δεδομένα. Το πρόθεμα -μετα- στην τεχνολογία των πληροφοριών σημαίνει μία

επιπρόσθετη διευκρίνιση ή περιγραφή. Ουσιαστικά, τα μεταδεδομένα συνοψίζουν τις βασικές πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την αναζήτηση και την εργασία με συγκεκριμένες περιπτώσεις δεδομένων.

- Γεωβάση (geodatabase) ή γεωγραφική βάση δεδομένων : Αποτελεί βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύεται ένα σύνολο γεωγραφικών και περιγραφικών δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας και ενημέρωσης του.
- Πίνακας χαρακτηριστικών ή ιδιοτήτων (attribute table) : Αρχείο της γεωβάσης το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών, τα οποία είναι συνήθως τοποθετημένα σε μορφή πίνακα (table). Κάθε σειρά (row) αντιπροσωπεύει μία οντότητα και ονομάζεται εγγραφή (record), ενώ κάθε στήλη αντιπροσωπεύει ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της οντότητας και ονομάζεται πεδίο (field). Στα σύνολα ψηφιδωτών δεδομένων, κάθε γραμμή του πίνακα ιδιοτήτων αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη περιοχή κελιών που έχουν την ίδια αξία. Επισημαίνεται ότι τα πεδία μοναδικού αναγνωριστικού αριθμού (ObjectID), εμβαδού (Shape_Area) και επίπεδου μήκους (Shape_Length) δημιουργούνται και συμπληρώνονται αυτόματα από το λογισμικό του Γ.Π.Σ. για διανυσματικά δεδομένα, ενώ για ψηφιδωτά δεδομένα τα πεδία μοναδικού αναγνωριστικού αριθμού (ObjectID), χαρακτηριστικής τιμής (Value) και αριθμού καταχωρήσεων (Count).
- Κατηγορία ή κλάση χαρακτηριστικών (feature class) : Ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών υπό τον ίδιο γεωμετρικό τύπο (σημείο, γραμμή ή πολύγωνο), τα ίδια χαρακτηριστικά και γεωαναφερμένα στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.
- Θεματικά επίπεδα (layers) : Η οπτική αναπαράσταση ενός γεωγραφικού συνόλου δεδομένων σε οποιοδήποτε περιβάλλον ψηφιακού χάρτη. Εννοιολογικά, αποτελεί μία φέτα (slice) ή ένα στρώμα (stratum) της γεωγραφικής πραγματικότητας σε μία συγκεκριμένη περιοχή και θεωρείται περίπου ισοδύναμη με έναν χάρτινο χάρτη (Εικόνα 5-5). Σε έναν οδικό χάρτη, για παράδειγμα, οι δρόμοι, τα εθνικά πάρκα, τα πολιτικά σύνορα, τα ποτάμια κ.α. μπορούν να θεωρηθούν ως διαφορετικά θεματικά επίπεδα.
- Ερώτημα (query) : Αποτελεί ένα αίτημα του χρήστη του λογισμικού του Γ.Π.Σ. που εξετάζει τον πίνακα χαρακτηριστικών με βάση τα καθορισθέντα κριτήρια και προβάλλει εκείνα τα χαρακτηριστικά ή τις εγγραφές που πληρούν τα κριτήρια.
- Γλώσσα Δομημένων Ερωτημάτων (Structured Query Language) : Αναφερόμενη και ως γλώσσα προγραμματισμού ειδικού σκοπού SQL, έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται τα δεδομένα ενός συστήματος βάσεων δεδομένων (Forouzan και Mosharraf, 2010). Βασίζεται στην τυπική άλγεβρα και την πλειάδα σχεσιακού λογισμού (tuple relational calculus), η οποία εκφράζει τις σχέσεις μεταξύ των δεδομένων μίας βάσης δεδομένων (<https://en.wikipedia.org/wiki/SQL>, 2015).



Εικόνα 5-5: Παράδειγμα υπέρθεσης θεματικών επιπέδων, με στόχο μία ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού κόσμου. (Πηγή: <http://gis.sbcounty.gov>, 2012)

5.3. Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2 και της εφαρμογής ArcMap

Το ArcMap v.10.2.2 (έκδοση 10.2.2) αποτελεί μία εκ των ολοκληρωμένων εφαρμογών που παρέχονται από το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών ArcGIS v.10.2.2 της εταιρείας Environmental Systems Research Institute (ESRI). Το ArcGIS αποτελεί μια ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού Γ.Π.Σ. και παρέχει μια πλατφόρμα για διαδικασίες χωρικής ανάλυσης, διαχείρισης δεδομένων και απεικόνισης. Είναι ένα πληροφοριακό σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για :

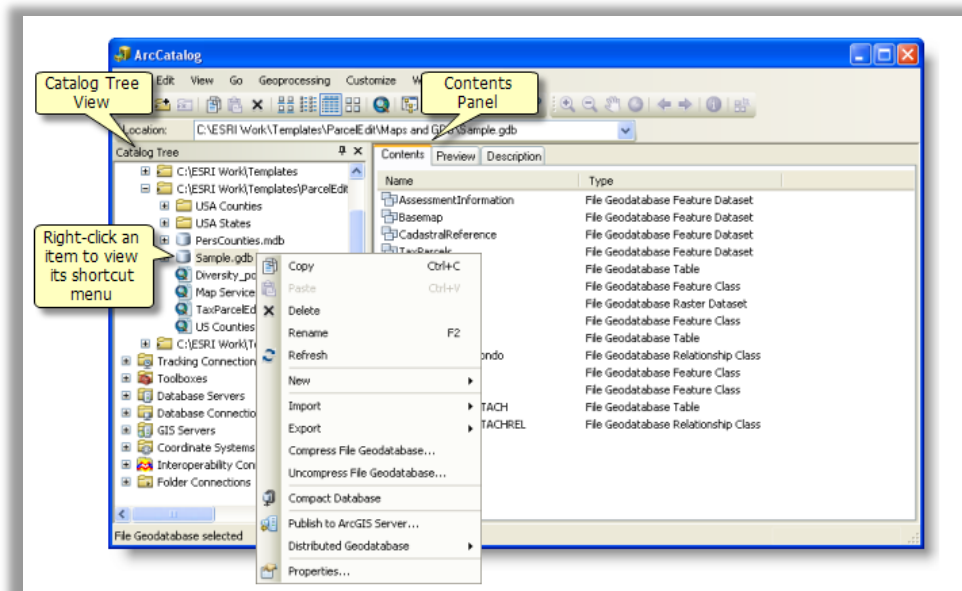
- *Διαχείριση δεδομένων/πόρων* : ενσωμάτωση συστημάτων, διαχείριση υποθέσεων/αξιώσεων, διαχείριση περιοχών εξυπηρέτησης/ ευθύνης και διαχείριση πελατών
- *Ανάλυση και σχεδιασμό* : προβλέψεις και ανάλυση κινδύνου
- *Επιχειρησιακές διαδικασίες* : τηλεφωνικό κέντρο/αποστολές, παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων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

Αν και το ArcGIS κυκλοφορεί σε διαφορετικές εκδόσεις ανάλογα με το επίπεδο των κατεχόμενων αδειών (licenses) αυτή την στιγμή, λόγω της χρησιμοποίησης του στην παρούσα εργασία, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί και περιγραφεί η έκδοση

μειωμένης λειτουργικότητας ArcGIS for Desktop, σε περιβάλλον Microsoft Windows.

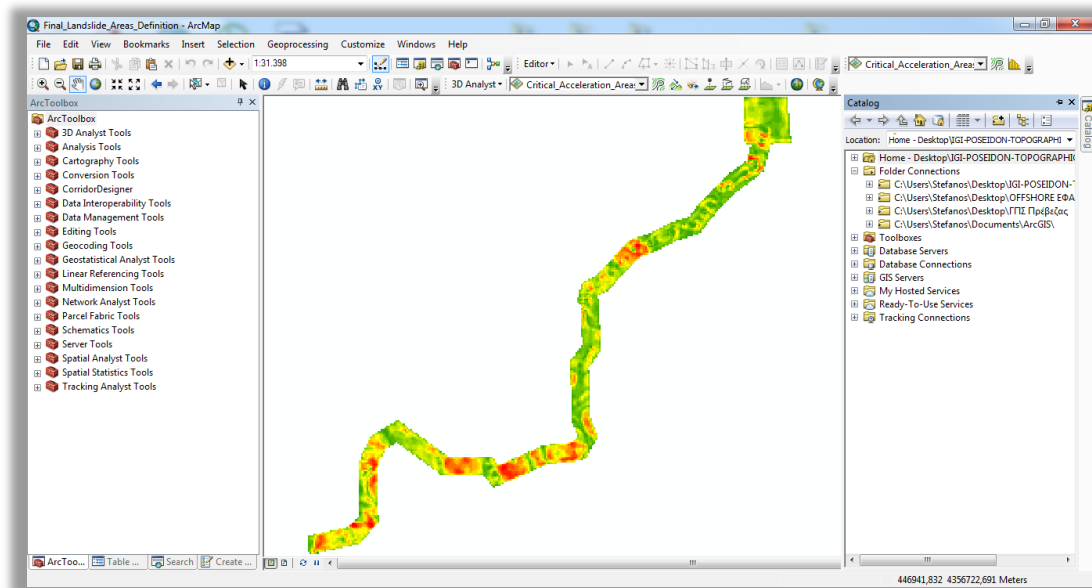
Η έκδοση αυτή, λοιπόν, του ArcGIS, έχει δημιουργηθεί με την γλώσσα προγραμματισμού C++ (<https://www.e-education.psu.edu>, 2014) και περιέχει μία ομάδα από ενοποιημένες εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται οι ArcCatalog, ArcMap, ArcGlobe, ArcToolbox και Model Builder (www.marathondata.gr, 2008). Ειδικότερα για κάθε εφαρμογή (<http://help.arcgis.com/EN/arcgisdesktop/10.0>, 2010):

- **ArcCatalog:** Παρέχει ένα παράθυρο σε μορφή καταλόγου που χρησιμοποιείται για την οργάνωση και τη διαχείριση των διαφόρων τύπων των γεωγραφικών πληροφοριών του ArcGIS. Τα είδη των πληροφοριών που μπορούν να εισαχθούν, οργανωθούν και διαχειριστούν από το ArcCatalog περιλαμβάνουν : γεωβάσεις, δεδομένα ψηφιδωτού τύπου, χαρτογραφικά έγγραφα, τρισδιάστατες αναπαραστάσεις, αρχεία θεματικών επιπέδων (layer), εργαλειοθήκες γεωεπεξεργασίας (geoprocessing toolboxes), μοντέλα, κείμενα κώδικα της γλώσσας προγραμματισμού Python (Python scripts), δημοσιευμένες υπηρεσίες χρησιμοποιώντας τον διακομιστή του ArcGIS (ArcGIS Server), μεταδεδομένα για αυτά τα αντικείμενα κ.α. Το περιεχόμενο όλων αυτών οργανώνεται σε μία «προβολή δέντρου» (tree view), πάνω στην οποία μπορεί ο χρήστης να εργαστεί, να οργανώσει, να αναζητήσει και να διαχειριστεί τα συλλεχθέντα σύνολα δεδομένων (Εικόνα 5-6).



Εικόνα 5-6: Το παράθυρο διαλόγου του εργαλείου ArcCatalog, από το οποίο μπορεί ο χρήστης να οργανώσει και να διαχειριστεί τον όγκο πληροφορίας, με εμφανή την «δενδρική προβολή» στα αριστερά και τον πίνακα περιεχομένων της κάθε επεξεργαζόμενης οντότητας στα δεξιά. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- **ArcToolbox:** Είναι το ολοκληρωμένο εργαλείο που παρέχει αναφορά στις εργαλειοθήκες για διευκόλυνση της πρόσβασης σε και οργάνωσης μίας συλλογής εργαλείων γεωεπεξεργασίας, μοντέλων και κείμενων κώδικα από την επιφάνεια χρήσης του προγράμματος. Η εργαλειοθήκη περιλαμβάνει, ουσιαστικά, όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την εκτέλεση μίας προηγμένης εργασίας σε έναν συγκεκριμένο τομέα. Ομοίως, το ArcToolbox περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία τα οποία απαιτούνται για τις σύνθετες εργασίες γεωεπεξεργασίας, έτσι ώστε να διευκολύνει την πρόσβαση σε αυτά και την οργάνωση τους κατά έναν λογικό τρόπο (<http://wiki.gis.com>, 2011).
- **ModelBuilder :** Αποτελεί την εφαρμογή με την οποία κατασκευάζονται, επεξεργάζονται και διαχειρίζονται μοντέλα. Τα μοντέλα είναι ροές εργασίας (work flows) οι οποίες συνθέτουν αλληλουχίες εργαλείων γεωεπεξεργασίας, τροφοδοτώντας το αποτέλεσμα ενός εργαλείου σε αμέσως επόμενο εργαλείο, ως δεδομένο εισόδου. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί και ως μία «οπτική» γλώσσα προγραμματισμού (visual programming language), αφού προσφέρεται η δυνατότητα μετατροπής της ροής εργασίας σε κείμενο κώδικα σε γλώσσα Python, δίνοντας την ευκαιρία σε άλλα άτομα να χρησιμοποιήσουν και να τροποποιήσουν το παραγόμενο μοντέλο. Επισημαίνεται ότι χρησιμοποιείται εκτενέστερα στις μετέπειτα μελέτες περίπτωσης.
- **ArcMap :** Αποτελεί την σημαντικότερη εφαρμογή της πλατφόρμας λογισμικού του ArcGIS και χρησιμοποιείται κυρίως για την προβολή, επεξεργασία, δημιουργία και ανάλυση γεω-χωρικών δεδομένων. Συνδέεται άμεσα με όλες τις προαναφερθείσες εφαρμογές, με ουσιαστικότερες συνδέσεις εκ αυτών με την ArcCatalog, με στόχο την σύνδεση των δημιουργούντων γεωβάσεων και φάκελου προέλευσης των δεδομένων, με την ArcToolbox, με στόχο την πρόσβαση στις γνωστές εργαλειοθήκες και την δημιουργία, οργάνωση και διαχείριση εργαλείων και με την Model Builder, με στόχο την δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση μοντέλων ροών εργασίας (Εικόνα 5-7). Βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του αποτελούν τα θεματικά επίπεδα πληροφοριών (layers), μέσω των οποίων προβάλλεται, επεξεργάζεται, διαμορφώνεται, αναλύεται και προκύπτει η χωρική πληροφορία. Όντας ενοποιημένο με τις προαναφερθείσες εφαρμογές, προσφέρει την δυνατότητα μελέτης και διευθέτησης πολυσύνθετων χωρικών προβλημάτων για τα οποία μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση μοντέλων ή/και η συγγραφή προγραμματιστικού κώδικα (σε γλώσσα Python ή Visual Basic – VB).



Εικόνα 5-7: Παράθυρο διαλόγου ArcMap v.10.2.2 όπου καθίσταται εμφανής η σύνδεση της εφαρμογής με τις προαναφερθείσες εφαρμογές ArcCatalog (δεξιά) και ArcToolbox (αριστερά). Επισημαίνεται ότι η εφαρμογή ModelBuilder περιέχεται στην ArcToolbox. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

5.4 Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα και διαδρομές αγωγών : Εφαρμογές

Όπως ήδη έχει προαναφερθεί και αναλυθεί, τα Γ.Π.Σ. προσφέρουν πολλές δυνατότητες για την διεκπεραίωση ζητημάτων που παρουσιάζουν χωροχρονικό χαρακτήρα, χωρίς, ωστόσο, να παραμελείται η περιγραφική τους πληροφορία. Ειδικότερα, η μοντελοποίηση πραγματικών καταστάσεων χρησιμοποιώντας τα Γ.Π.Σ. με σκοπό να προκύψουν συμπεράσματα για τον ίδιο τον πραγματικό κόσμο (GIS – Enabled Modelling), αποτελεί έναν νέο και καινοτόμο ρεύμα που έχει αρχίσει να διερευνάται και εφαρμόζεται σε πολλά έργα σύνθετης φυσιογνωμίας. Έχοντας ήδη τονίσει την σημασία των γεωκινδύνων στο Κεφάλαιο 3 και παρουσιάσει το περίπλοκο και πολύπλοκο του προβλήματος της επιλογής και χάραξης μίας διαδρομής ενός αγωγού στο Κεφάλαιο 4, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας διερευνάται η χρησιμότητα των Γ.Π.Σ. στον ορισμό των περιοχών πιθανής εμφάνισης γεωκινδύνων και στην μοντελοποίηση του προβλήματος επιλογής της διαδρομής ενός αγωγού, συμπεριλαμβάνοντας ως κριτήριο τις προαναφερθείσες επικίνδυνες περιοχές.

Οι εφαρμογές του Κεφαλαίου 6 επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αναδειχθούν διαφορετικές πτυχές του προβλήματος και αναφέρονται με τη σειρά στον προσδιορισμό του γεωκινδύνου της στατικής και σεισμικής (ή δυναμικής) ευστάθειας των πρανών, στον ορισμό πιθανών διαδρομών μίας γραμμής αγωγού σε χερσαίο έδαφος και τον ορισμό πιθανών διαδρομών μίας υπεράκτιας γραμμής αγωγού, βάσει πολυκριτηριακής ανάλυσης.

5.4.1 Μοντελοποίηση των προβλημάτων και χρησιμοποιούμενα εργαλεία

Η πολυκριτηριακή ανάλυση εκτελέστηκε μέσω της δημιουργίας και εφαρμογής μοντέλων από τα συλλεχθέντα δεδομένα. Τα μοντέλα αποτελούν προσομοιώσεις του πραγματικού κόσμου, οι οποίες λειτουργούν με μία αφαιρετική λογική. Στην αφαίρεση, από το διαθέσιμο πληροφοριακό υλικό εξαιρούνται στοιχεία που είτε δεν θεωρούνται σημαντικά από τον ερευνητή για να αποκαλύψουν την πραγματικότητα είτε απλοποιούν το πλαίσιο εντός του οποίου λαμβάνουν μέρος οι επιλεχθείσες διαδικασίες. Την αφαίρεση ακολουθεί ο μετασχηματισμός του μοντέλου, κατά τον οποίο, ουσιαστικά, αποφασίζεται ο τύπος του ανάλογα με το είδος του προβλήματος και η εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με τον πραγματικό κόσμο (Κουτσόπουλος, 2009). Στις παρούσες μελέτες, ο τύπος μοντέλου που επιλέχθηκε προσομοιάζει αυτόν του αναλογικού. Αυτό το είδος αναφέρεται στον μετασχηματισμό ιδιοτήτων του πραγματικού κόσμου, όπως η κλίμακα μεγέθους, με στόχο μία περιορισμένα αφηρημένη θεώρηση του.

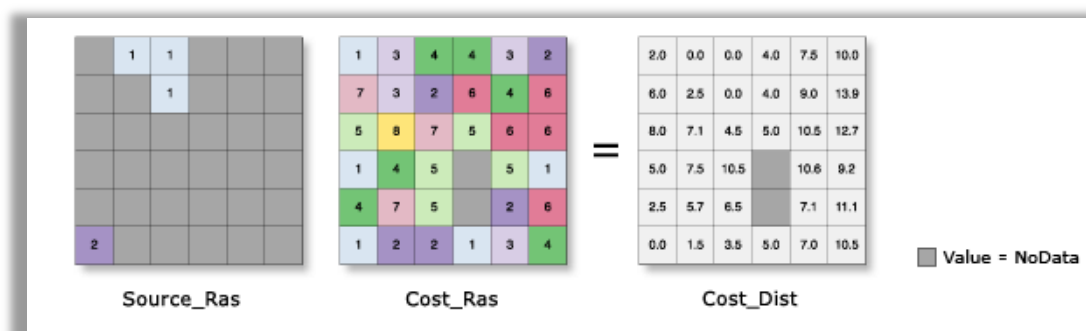
Τα μοντέλα δημιουργήθηκαν μέσω του εργαλείου Model Builder της εφαρμογής ArcMap, τμήματα του ArcGIS που αναλύθηκαν προηγουμένως. Η δόμηση τους έγινε σταδιακά, εισάγοντας εργαλεία της πρότυπης εργαλειοθήκης του ArcToolbox και προμηθεύοντας τα με δεδομένα της αντίστοιχης γεωβάσης ως παραμετρικές τιμές για την εκτέλεση τους. Η εισαγωγή των δεδομένων σε ένα εργαλείο (input) και η εξαγωγή αποτελεσμάτων (output) από αυτό αποτελεί την βασική διαδικασία της εκπόνησης του μοντέλου, αφού η τελική του μορφή προκύπτει ως μία λογική αλληλουχία τέτοιων διαδικασιών; “A model is built by connecting processes” (www.help.arcgis.com, 2011).

5.4.2 Βασικά χρησιμοποιούμενα εργαλεία

Μέσω του Model Builder εκτελέστηκε ένας σημαντικός αριθμός εργαλείων από την εργαλειοθήκη της εφαρμογής ArcToolbox, τα οποία αναφέρονται αναλυτικά σε αυτό το υποκεφάλαιο με στόχους την πληρέστερη πληροφόρηση και την αποφυγή μετέπειτα επαναλήψεων, σύμφωνα με τις επίσημες οδηγίες της κατασκευάστριας εταιρίας ESRI (<http://help.arcgis.com>, 2012) για την πλατφόρμα εφαρμογών του ArcGIS (σε αλφαβητική σειρά, ως προς την αγγλική τους ονομασία):

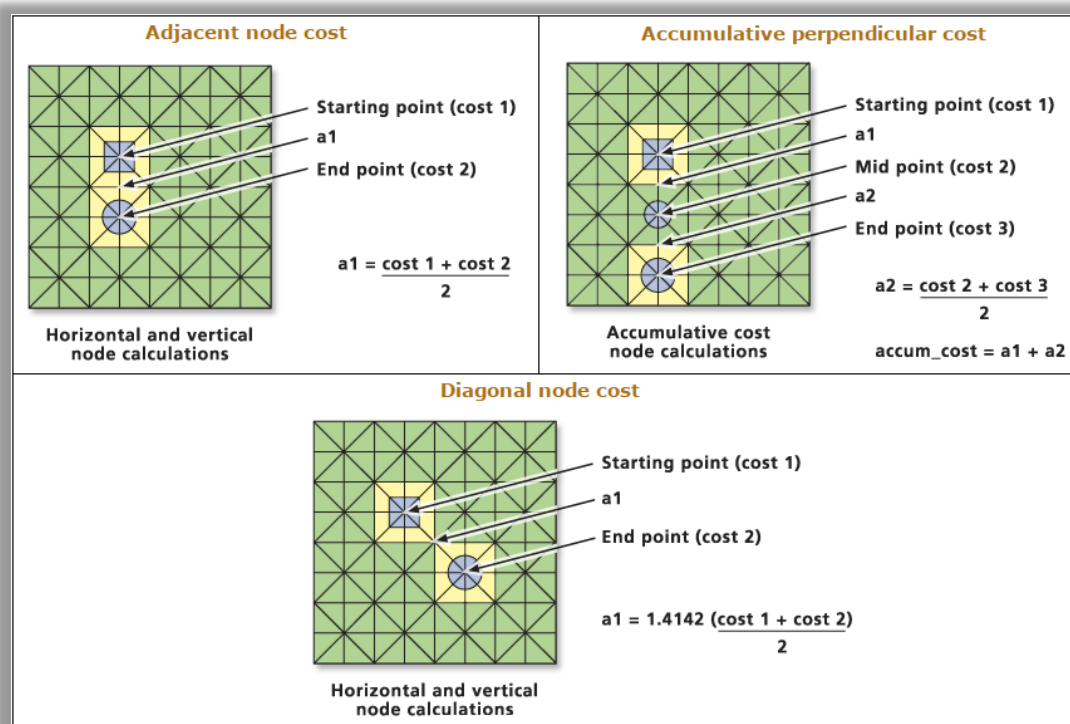
- Προσθήκη Πεδίου (Add Field) : Προσθέτει ένα νέο πεδίο, δηλαδή μία νέα στήλη, στον πίνακα χαρακτηριστικών της επιλεχθείσας κλάσης χαρακτηριστικών (feature class) ή του επιλεχθέντος θεματικού επιπέδου (layer).
- Υπολογισμός Πεδίου (Calculate Field) : Υπολογίζει τις τιμές του επιλεχθέντος πεδίου μίας κλάσης χαρακτηριστικών ή ενός θεματικού επιπέδου. Ο υπολογισμός γίνεται βάσει της προγραμματιστικής γλώσσας SQL, αν και η εφαρμογή ενός σύνθετου υπολογισμού απαιτεί την εφαρμογή και μίας εκ των δύο προγραμματιστικών γλωσσών Visual Basic (VB) ή Python.
- Κόστος απόστασης (Cost Distance) : Δημιουργεί ένα ψηφιδωτό του οποίου κάθε κελί λαμβάνει μία τιμή συσσωρευτικού κόστους για το πλησιέστερο κελί – πηγή (source cell). Ο αλγόριθμος του εργαλείου χρησιμοποιεί την

αναπαράσταση κελιών ως κόμβων σύνδεσης, όπως ορίζεται από την θεωρία γράφων (https://el.wikipedia.org/wiki/Θεωρία_γράφων, 2015). Σε αυτή την αναπαράσταση, το κέντρο κάθε κελιού θεωρείται κόμβος και ενώνεται με τους γειτονικούς κόμβους με πολλαπλές συνδέσεις. Τα εισαγόμενα δεδομένα αποτελούν τα σημεία προέλευσης (origin points) και το ψηφιδωτό απεικόνισης του σταθμισμένου κόστους, όπως προκύπτει από το εργαλείο Weighted Overlay. Το κόστος που αποδίδεται σε κάθε κελί, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικόνας 5-8, αντιπροσωπεύει το κόστος ανά μονάδα απόστασης για την μετακίνηση μέσω του συγκεκριμένου κελιού. Η τελική τιμή ανά κελί προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του μεγέθους του με την τιμή του κόστους. Επιπρόσθετα, το κόστος μετακίνησης από τον κόμβο ενός κελιού σε έναν αμέσως επόμενο εξαρτάται από την σχετική χωρική τους κατεύθυνση και τον τρόπο σύνδεσης τους. Ειδικότερα, το κόστος υπολογίζεται για τις διαφορετικές περιπτώσεις όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 5-9, όπου $cost_n$ το κόστος του κελιού n .



Εικόνα 5-8: Στάδια από αριστερά προς τα δεξιά: (1) Ανάθεση τιμών στο ψηφιδωτό της επιφάνειας προέλευσης, η οποία συμβολίζεται με την τιμή 1, και του σημείου προορισμού, που συμβολίζεται με την τιμή 2. (2) Υπέρθυση αυτού του ψηφιδωτού με το ψηφιδωτό κόστους που έχει προκύψει από άλλο εργαλείο του προγράμματος (3) Τελικό ψηφιδωτό, το οποίο περιέχει τιμές συσσωρευτικού κόστους ανά κελί, όπου υπάρχει πληροφορία. (Πηγή: www.webhelp.esri.com, 2011)

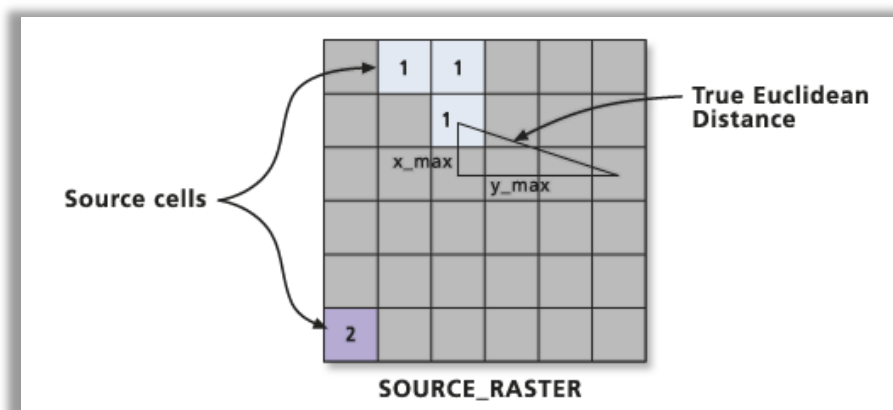
Επισημαίνεται το ότι η δημιουργία του ψηφιδωτού που περιέχει τις τελικές τιμές του συσσωρευτικού κόστους απόστασης προκύπτει από μία επαναληπτική διαδικασία, χρησιμοποιώντας την θεωρία γράφων και ξεκινώντας από τα κελιά προέλευσης. Ουσιαστικά, στην πρώτη επανάληψη αναγνωρίζονται τα κελιά προέλευσης στα οποία ανατίθεται η μηδενική τιμή (αφού δεν παρουσιάζεται κόστος για να επιστρέψουν στον εαυτό τους) και ενεργοποιούνται όλα τα γειτονικά τους κελιά, στα οποία αντιστοιχείται μία τιμή κόστους σύμφωνα με την μεθοδολογία της Εικόνας 5-9. Έπειτα, δημιουργείται μία λίστα με τις τιμές των κοστών από την οποία επιλέγεται η μικρότερη τιμή και εγγράφεται αμέσως στο τελικό ψηφιδωτό, εκκινώντας την δεύτερη επανάληψη. Η διαδικασία τελειώνει όταν έχουν ανατεθεί τιμές σε όλα τα κελιά.



Εικόνα 5-9: Οι διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμού του συσσωρευτικού κόστους και οι αντίστοιχες εξισώσεις υπολογισμού. (Πηγή: www.help.arcgis.com, 2011)

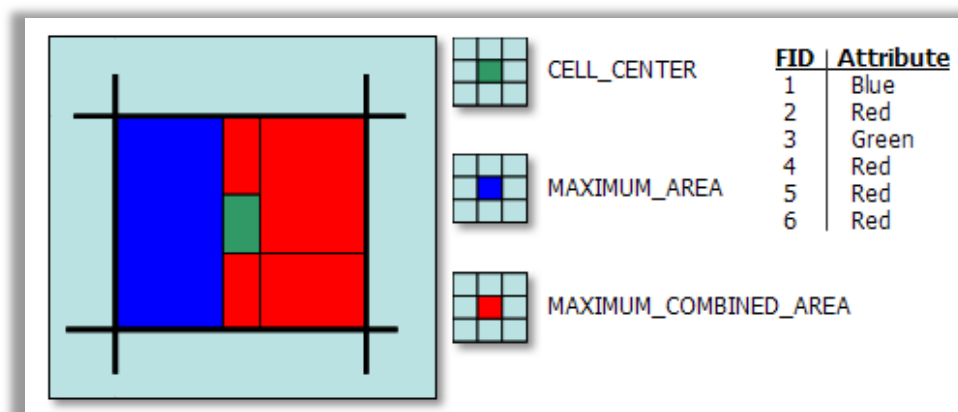
- Διαδρομή ελάχιστου κόστους (Cost Path) : Καθορίζει το μονοπάτι ελάχιστου κόστους από ένα σημείο προορισμού (destination point) έως το σημείο προέλευσης (source or origin point). Εκτός από την απαίτηση να οριστεί ο προορισμός, το εργαλείο απαιτεί ως εισαγόμενα δεδομένα (input) δύο ψηφιδωτά σελτ δεδομένων, ως έχουν προκύψει από το εργαλείο “Cost Distance”: του κόστους απόστασης (least Cost-Distance raster) και της γειτνίασης των κελιών με την ελάχιστη τιμή κόστους (Back Link raster). Το δεύτερο εκ αυτών, χρησιμοποιείται για να ανιχνευθεί η λιγότερο δαπανηρή πορεία από τον προορισμό προς το σημείο προέλευσης πάνω στην επιφάνεια του κόστους απόστασης (cost distance raster). Η τελική διαδρομή προκύπτει ενώνοντας τα κέντρα των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους μεταξύ των σημείων προέλευσης και προορισμού, σύμφωνα με την προεπιλεγμένη λειτουργία του προγράμματος ArcMap.
- Υπολογισμός Ευκλείδειας απόστασης (Euclidean Distance) : Περιγράφει την σχέση κάθε κελιού με ένα ή πολλά σημεία προορισμού, βάσει της τυπικής ευθείας απόστασης (www.resources.arcgis.com, 2014). Δέχεται ως εισαγόμενα δεδομένα τα σημεία προέλευσης και υπολογίζει την απόσταση αυτών από κάθε γειτονικό κελί. Ως διαδικασία, ο Ευκλείδειος αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: για κάθε κελί, η απόσταση από κάθε σημείο προέλευσης – πηγή καθορίζεται υπολογίζοντας την υποτείνουσα με τις πρότυπες μέγιστες τιμές συντεταγμένων (x,y) του ArcMap ως τα άλλα δύο σκέλη του τριγώνου (Εικόνα 5-10). Η μικρότερη απόσταση προς μια πηγή προσδιορίζεται, και εάν

είναι μικρότερη από την καθορισμένη μέγιστη απόσταση, η τιμή έχει εκχωρηθεί στη θέση των κελιών στο ψηφιδωτό εξόδου (output raster).



Εικόνα 5-10: Ο καθορισμός της μέγιστης ή "πραγματικής" ευκλείδειας απόστασης. (Πηγή: www.resources.arcgis.com, 2014)

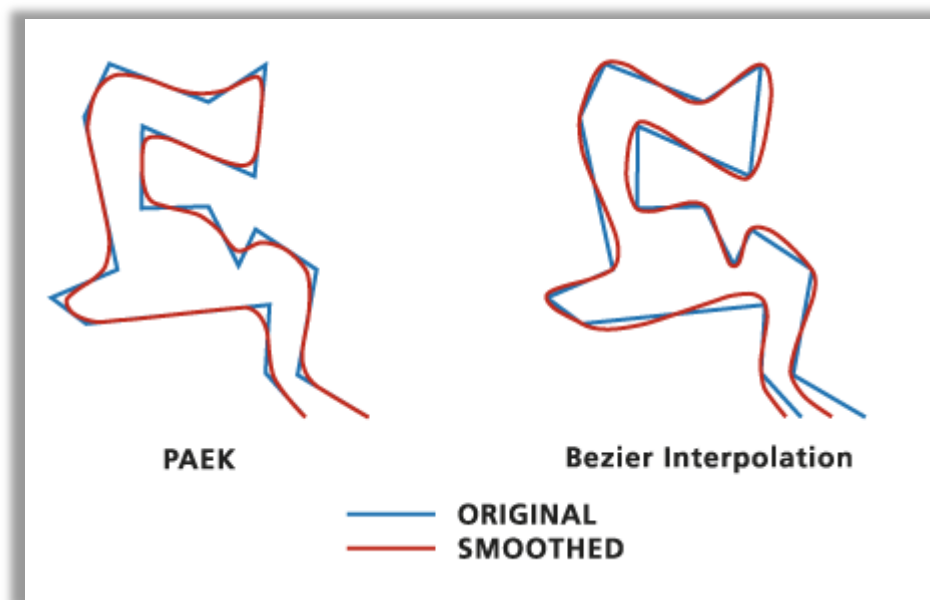
- Τομή θεματικών επιπέδων (Intersect) : Υπολογίζει την γεωμετρική τομή των εισαγόμενων χαρακτηριστικών. Ουσιαστικά, τα χαρακτηριστικά που επικαλύπτονται μεταξύ τους σε όλα τα εισαγόμενα θεματικά επίπεδα καταγράφονται στο τελικό αποτέλεσμα.
- Μετατροπή πολυγωνικών οντοτήτων σε δεδομένα τύπου raster (Polygon to Raster) : Μετατρέπει πολυγωνικές οντότητες σε σει ψηφιδωτών (raster) δεδομένων. Το ψηφιδωτό δημιουργείται ανά κελί, αφού σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχίζεται μία τιμή ανάλογα με το χαρακτηριστικό του πίνακα ιδιοτήτων που έχει οριστεί ως πρωτεύων. Η ανάθεση της τιμής γίνεται με μία εκ των επόμενων τριών μεθόδων: κεντρικής ανάθεσης (CELL_CENTER), μέγιστης επιφάνειας (MAXIMUM_AREA) ή μέγιστης συνδυαζόμενης επιφάνειας (MAXIMUM_COMBINED_AREA). Στην κεντρική ανάθεση τιμής, το κελί λαμβάνει την τιμή από το πολύγωνο που καλύπτει το κέντρο του (ανεξάρτητα των τιμών των άλλων πολυγώνων), στην ανάθεση μέγιστης επιφάνειας λαμβάνει την τιμή του πολυγώνου που καταλαμβάνει την μέγιστη επιφάνεια εντός του κελιού και κατά την ανάθεση μέγιστης συνδυαζόμενης επιφάνειας του εκχωρείται η τιμή του πολυγώνου που έχει την μέγιστη επιφάνεια, αφού έχει πρώτα ενωθεί με πολύγωνα του ίδιου κελιού που παρουσιάζουν την ίδια χαρακτηριστική τιμή (Εικόνα 5-11). Στην παρούσα εργασία, επισημαίνεται, ότι χρησιμοποιήθηκε η προτεινόμενη από το πρόγραμμα κεντρική ανάθεση τιμών.



Εικόνα 5-11: Σχηματική απεικόνιση συνύπαρξης 6 πολυγώνων εντός ενός κελιού, με πρωτεύων πεδίο τον αύξοντα αριθμό τους. Δίπλα από το κελί απεικονίζεται το αποτέλεσμα της μετατροπής σε ψηφιδωτή μορφή με τις τρεις μεθόδους ανάθεσης τιμών. (Πηγή: www.help.arcgis.com, 2011)

- Αναγωγή σε προβολικό σύστημα (Project) : Προβάλλει χωρικά δεδομένα από ένα σύστημα συντεταγμένων σε ένα άλλο. Επισημαίνεται ότι η προβολές που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν απαιτήσαν κάποιο γεωγραφικό μετασχηματισμό, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος.
- Μετατροπή raster δεδομένων σε πολυγωνικές οντότητες (Raster to Polygon) : Μετατρέπει τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής σε πολυγωνικές οντότητες.
- Μετατροπή raster δεδομένων σε πολυγωνικές γραμμές (Raster to Polyline) : Μετατρέπει τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής σε πολυγωνικές γραμμές.
- Επαναταξινόμηση δεδομένων (Reclassify) : Επαναταξινομεί ή αλλάζει τις τιμές ενός συνόλου ψηφιδωτών δεδομένων. Η ταξινόμηση δεδομένων μίας πολυφασματικής εικόνας αποτελεί αντικείμενο της Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης (Digital Remote Sensing) και αποτελεί μία βασική μέθοδο για την ποσοτική ανάλυση φαινομένων (Δ. Αργιαλάς, 1998). Βασιζόμενο στο ιστόγραμμα της εισαγόμενης εικόνας, το εργαλείο ταξινομεί ή επαναταξινομεί σε κλάσεις την πληροφορία που περιέχεται σε αυτήν και την εκχωρεί έπειτα σε κάθε κελί, ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο ταξινόμησης. Οι διαθέσιμες μέθοδοι ταξινόμησης στο πρόγραμμα ArcMap είναι πολλές και εναπόκειται στην κρίση του μηχανικού η επιλογή μίας ορθότερης, με στόχο την καλύτερη απεικόνιση της πληροφορίας. Επισημαίνεται, σε αυτό το σημείο, ότι η μέθοδος που εφαρμόστηκε στις επόμενες μελέτες περίπτωσης είναι η μέθοδος βελτιστοποίησης του Jenks (μέθοδος φυσικών παύσεων – natural breaks), η οποία αποτελεί μέθοδο ομαδοποίησης δεδομένων για τον καθορισμό της καλύτερης ρύθμισης των τιμών σε διαφορετικές μεταξύ τους κλάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης της μέσης απόκλισης κάθε κλάσης από τη μέση τιμή της, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται η μέγιστη απόκλιση από τις μέσες τιμές των υπόλοιπων κλάσεων (www.en.wikipedia.org/wiki/Jenks_natural_breaks_optimization, 2015).

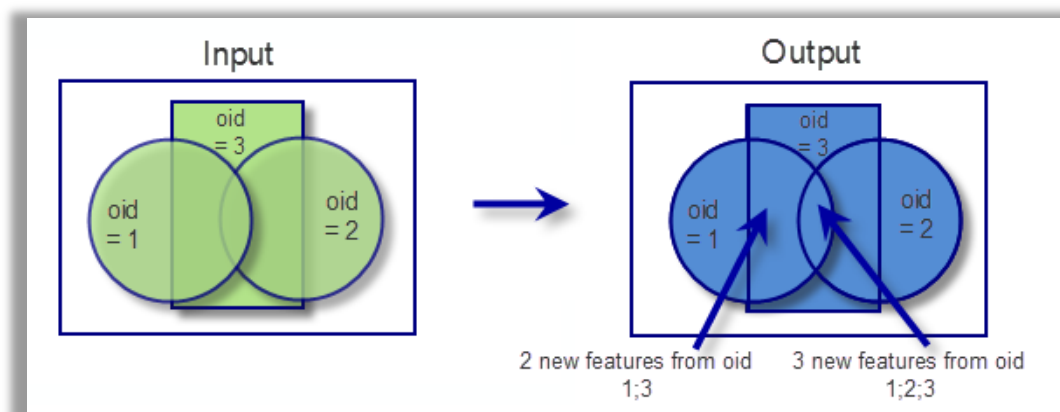
- Επιλογή χωρικών οντοτήτων (Select) : Εξάγει, αποθηκεύει και απεικονίζει, σε νέο θεματικό επίπεδο, χωρικές οντότητες από μία κλάση οντοτήτων ή θεματικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας γλώσσα SQL για την διατύπωση των ερωτημάτων (queries).
- Υπολογισμός κλίσης (Slope) : Υπολογίζει τον ρυθμό της μέγιστης μεταβολής στην κατακόρυφη διεύθυνση από κάθε κελί προς τα οχτώ γειτονικά του, ενός συνόλου ψηφιδωτών δεδομένων. Η διαδικασία που ακολουθεί το εργαλείο, ουσιαστικά, είναι η προσαρμογή ενός επιπέδου στις τιμές του κατακόρυφου άξονα z για ένα 3x3 σύστημα κελιών γύρω από το κεντρικό κελί ή κελί επεξεργασίας (center of processing cell). Η τιμή κλίσης αυτού του επιπέδου υπολογίζεται με την τεχνική μέσου μεγίστου του Burrough (1986), της οποίας η ανάλυση ξεπερνά τα όρια της παρούσας διπλωματικής. Η κατεύθυνση του επιπέδου ορίζει την διεύθυνση για το κεντρικό κελί. Όπου δεν υπάρχει τιμή z σε κάποιο κελί, τότε του εκχωρείται η τιμή z του κεντρικού κελιού. Η κλίση μπορεί να υπολογιστεί σε μοίρες (οι οποίες και επιλέχθηκαν στις μελέτες ως πιο εύληπτη μορφή μεταβλητής) και σε ποσοστό ανύψωσης (percent rise).
- Εξομάλυνση γραμμικού στοιχείου (Smooth Line) : Εξομαλύνει μία γραμμή για να βελτιώσει την αισθητική και την ποιότητα ενός χάρτη. Η εξομάλυνση αποτελεί ένα τύπο διαδικασίας της γενίκευσης χαρτών, με δύο αλγόριθμους να απασχολούν τις γραμμικές οντότητες : ο PAEK (Polynomial Approximation with Exponential Kernel – Πολυωνυμική Προσέγγιση με Εκθετική συνάρτηση Kernel) και ο αλγόριθμος παρεμβολής Bezier (Bezier Interpolation) (Robinson et al., 2002).



Εικόνα 5-12: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων εξομάλυνσης, στην ίδια πολυγωνική γραμμή. Παρατηρώντας το τελικό αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος PAEK, παρόλο που μετακινεί τις κορυφές της πολυγωνικής γραμμής, προσεγγίζει καλύτερα το αρχικό σχήμα. (Πηγή: www.webhelp.esri.com, 2012)

Κατά τον αλγόριθμο PAEK δημιουργούνται εξομαλυμένες γραμμές μία παραμετρική τεχνική συνεχούς μέσου όρου. Οι συντεταγμένες των τρεχόντων σημείων υπολογίζονται από τον σταθμισμένο μέσο όρο των συντεταγμένων όλων των σημείων της γραμμής. Τα βάρη για το κάθε σημείο ελαττώνονται με την απόσταση κατά μήκος της γραμμής για το τρέχον σημείο. Εκτός από τον μέσο όρο, χρησιμοποιείται και προσέγγιση με πολώνυμα δευτέρου βαθμού. Η τελική γραμμή δεν περιέχει απαραίτητα όλες τις κορυφές της γραμμής πηγής (Εικόνα 5-12). Από την άλλη, η παρεμβολή Bezier προσαρμόζει καμπύλες Bezier (Bezier curves) σε κάθε γραμμικό τμήμα της εισαχθείσας, στο εργαλείο, πολυγωνικής γραμμής. Η εφαπτομένη Bessel (Bessel tangent) χρησιμοποιείται για να συνδέσει τις καμπύλες με ομαλό τρόπο στις κορυφές. Επισημαίνεται ότι η προκύπτουσα γραμμή διέρχεται από τις κορυφές της αρχικής πολυγωνικής γραμμής (Εικόνα 5-12). Τονίζεται ότι η μέθοδος εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η PAEK, διότι αποτελεί πιο σταθερή μέθοδο (μικρή αλλαγή στις παραμέτρους προκαλεί μικρή μεταβολή στο αποτέλεσμα) και παράγει, τις περισσότερες φορές, αποτέλεσμα που προσομοιάζει καλύτερα την εισαγόμενη γραμμή (Εικόνα 5-12).

- Μετατροπή τοπογραφικών δεδομένων σε σύνολο ψηφιδωτών δεδομένων (Topo to Raster) : Αποτελεί μία μέθοδο παρεμβολής επιφανείας που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την δημιουργία υδρολογικά ορθών ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων (Digital Elevation Model - DEM), η οποία βασίζεται στην έκδοση 4.6.3 του προγράμματος ANUDEM, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Hutchinson την περίοδο 1988-1989. Το εργαλείο, συγκεκριμένα, παρεμβάλλει μία επιφάνεια που περιέχει τις υψομετρικές τιμές μεταξύ δοσμένων σημείων και πολυγώνων, με στόχο την δημιουργία ενός DEM το οποίο έχει μία ρεαλιστική δομή αποστράγγισης και αποτελεί ορθή αναπαράσταση των κορυφογραμμών και των υπαρκτών ρεμάτων. Η τεχνική που ακολουθείται στην παρεμβολή είναι εκείνη της διακριτής λεπτής επίπεδης σφήνας (discretized thin plate spline technique), όπως ορίζεται από την Wahba (1990), η οποία έχει τροποποιηθεί για να επιτρέπει το DEM να ακολουθεί απότομες αλλαγές στο έδαφος, όπως μεταβάσεις από και προς κορυφογραμμές και ρέματα. Τα απαραίτητα στοιχεία για λειτουργία του προγράμματος είναι οι ισοϋψείς καμπύλες ως γραμμικές οντότητες, οι σημειακές οντότητες με υψομετρική πληροφορία και το πολύγωνο που καθορίζει τα όρια της περιοχής μελέτης.
- Ένωση θεματικών επιπέδων (Union) : Υπολογίζει την γεωμετρική ένωση οποιουδήποτε αριθμού κλάσεων οντοτήτων ή/και θεματικών επιπέδων, με την προϋπόθεση να είναι πολυγωνικής μορφής. Το αποτέλεσμα (output) του συγκεκριμένου εργαλείου αποτελείται από πολύγωνα που αντιπροσωπεύουν την γεωμετρική ένωση όλων των εισαχθέντων πολυγώνων (input), όπως επίσης και όλων των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τους (Εικόνα 5-13). Επιπρόσθετα, ορίζει και την χωρική αναφορά των εξαγόμενων οντοτήτων στην οποία και προβάλλονται.



Εικόνα 5-13: Αναπαράσταση της λογικής διαδικασίας που ακολουθεί το εργαλείο Union. Οι τρεις, αρχικά διαφορετικές, πολυγωνικές οντότητες ενώνονται μεταξύ τους, λαμβάνοντας και τις τιμές των αντίστοιχων συμμετεχόντων πολυγώνων. Για παράδειγμα, η τομή των δύο κύκλων στο output λαμβάνει τις τρεις τιμές : του παραλληλογράμμου και των δύο κύκλων. (Πηγή: www.resources.arcgis.com, 2013)

- Σταθμισμένη Υπέρθεση (Weighted Overlay) : Αφού εισαχθούν ως δεδομένα διαφορετικά θεματικά επίπεδα σε μορφή ψηφιδωτών (raster) εκτελεί μία σταθμισμένη πολυκριτηριακή ανάλυση, όπου κάθε θεματικό επίπεδο αποτελεί ένα κριτήριο. Για κάθε θεματικό επίπεδο επιλέγεται το χαρακτηριστικό πεδίο (από τον πίνακα ιδιοτήτων του), του οποίου οι τιμές αντιστοιχούνται με εκείνες μίας προσαρμόσιμης κλίμακας. Αυτή η κλίμακα αντιπροσωπεύει μία ποιοτική διαβάθμιση του κόστους από τιμή σε τιμή. Μετά την αντιστοίχιση των τιμών κάθε θεματικού επιπέδου με την κλίμακα, τοποθετούνται βάρη επιρροής (influence) σε κάθε θεματικό επίπεδο, ορίζοντας και το τελικό αποτέλεσμα.
- Σταθμισμένο άθροισμα (Weighted Sum) : Εκτελεί μία υπέρθεση θεματικών επιπέδων σε μορφή raster, πολλαπλασιάζοντας την τιμή του κάθε κελιού εκ αυτών με το επιλεγόμενο βάρος και αθροίζοντας τις τελικές τιμές. Ουσιαστικά, το εργαλείο εκτελείται ανά κελί, αφού ο υπολογισμός και η ανάθεση τιμής γίνεται σε κάθε ένα από αυτά.

Μετά από την ανάλυση των βασικών εννοιών των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και την παρουσίαση του λογισμικού ArcGIS v.10.2.2 και των εργαλείων του, ακολουθεί η παρουσίαση των εφαρμογών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ARCMAP

6.1 Εισαγωγή

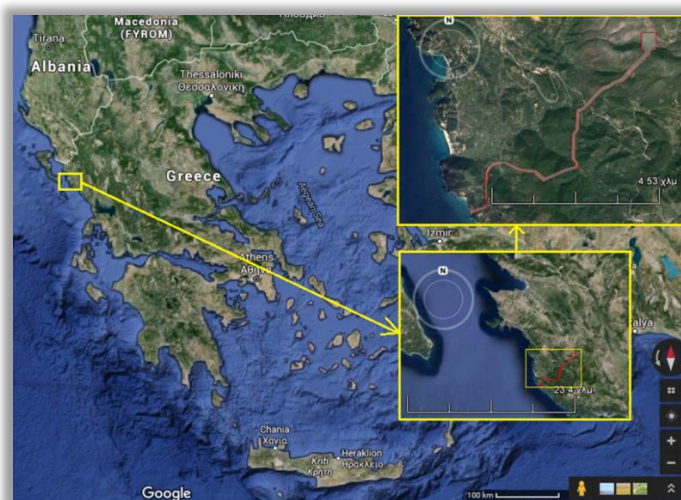
Στο έκτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τρεις εφαρμογές που εκπονήθηκαν, στα πλαίσια εξαγωγής απτών αποτελεσμάτων από το αναπτυχθέν εργαλείο. Το εργαλείο και οι δυνατότητες του προβάλλονται μέσα από την ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθοδολογίας επίλυσης του κάθε προβλήματος.

6.2. 1^η Εφαρμογή : Ορισμός περιοχών πιθανής αστοχίας πρανών στον νομό Θεσπρωτίας

6.2.1 Γενικό πλαίσιο και περιοχή μελέτης

Το πρόβλημα στο οποίο εστίασε η εφαρμογή είναι η ευστάθεια πρανών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες, σε χερσαίες εκτάσεις. Στόχος της μελέτης ήταν ο σαφής ορισμός περιοχών μειωμένης ευστάθειας, συνεπώς και πιθανής αστοχίας μέσω της ανάπτυξης μοντέλου εκτίμησης της επικινδυνότητας. Το μέσο που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι, όπως προαναφέρθηκε, η εφαρμογή ArcMap και τα περιφερειακά εργαλεία της.

Ως περιοχή μελέτης, ορίστηκε μία πολυγωνική περιοχή στο νοτιο – δυτικό τμήμα του νομού ή περιφερειακής ενότητας Θεσπρωτίας (κατά το Σχέδιο Καλλικράτης) για τους λόγους ότι ήταν διαθέσιμα τα απαραίτητα και, συνήθως δυσεύρετα, υψομετρικά δεδομένα και παρέχονταν η δυνατότητα μελέτης του φαινομένου σε ήπιες και απότομες κλίσεις εδάφους. Ο νομός Θεσπρωτίας βρίσκεται στο βορειο – δυτικό τμήμα της Ελλάδας και εντάσσεται στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Ηπείρου (Εικόνα 6-1) (www.el.wikipedia.org/wiki/Νομός_Θεσπρωτίας, 2015).



Εικόνα 6-1: Θέση του νομού Θεσπρωτίας στον Ελλαδικό χώρο και το πολύγωνο της περιοχής μελέτης, εντός των διοικητικών του ορίων. (Πηγή: Google Earth, 2015)

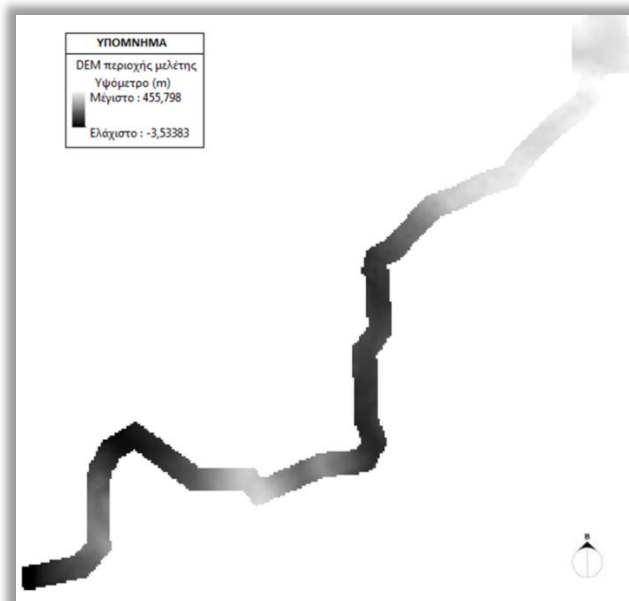
6.2.2 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων

Τον ορισμό της περιοχής μελέτης ακολούθησε ο καθορισμός των απαραίτητων δεδομένων για την εκπόνηση της διαδικασίας και η συλλογή τους. Τα απαιτούμενα δεδομένα καθορίστηκαν ως εξής :

- Τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, με στόχο την συλλογή της απαραίτητης υψομετρικής πληροφορίας
- Γεωλογικός Χάρτης, με στόχο τον ορισμό των γεωλογικών σχηματισμών
- Χαρακτηριστικά των εδαφικών κατηγοριών (c, γ, φ)
- Ζώνες σεισμικών επιφανειακών επιταχύνσεων
- Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα

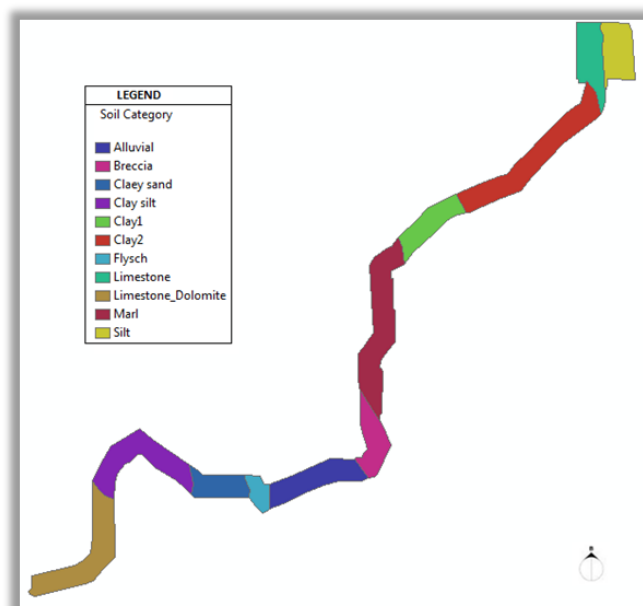
Σε μία ιδανική θεώρηση της διαδικασίας, θα ήταν απαραίτητα όλα τα παραπάνω δεδομένα για την θεώρηση του μοντέλου. Ωστόσο, λόγω απώλειας δεδομένων σχετικά με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα της συγκεκριμένης περιοχής, ακολούθησε μία αναγκαία απλοποίηση του πραγματικού κόσμου με την παραδοχή ότι η πίεση πόρων ύδατος r_u είναι μηδενική στα πλαίσια αυτής της μελέτης.

Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα τοπογραφικού αναγλύφου είχαν, αρχικά, την μορφή ισοϋψών καμπυλών, σημειακών οντοτήτων που περιείχαν υψομετρική πληροφορία και πολυγωνικών οντοτήτων που υποδείκνυαν τα όρια της πολυγωνικής περιοχής μελέτης της Εικόνας 6-1. Για να αποκτήσουν την απαραίτητη μορφή για την εισαγωγή στο μοντέλο της διαδικασίας (αυτή του ψηφιδωτού - raster συνόλου δεδομένων), χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Topo to Raster (Υποκεφάλαιο 5.4.1) από την εργαλειοθήκη του προγράμματος ArcMap και δημιουργήθηκε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους DEM (Εικόνα 6-2), με διαστάσεις κελιού 19,462 x 19,462 m, με χωρικό σύστημα αναφοράς το WGS '84 UTM της ζώνης 34N, ίδιο με εκείνο των εισαγόμενων δεδομένων. Επισημαίνεται ότι για την μετατροπή χρησιμοποιήθηκαν οι αρχικές τιμές ακρίβειας του προσδιορισμού όπως προτείνονται από το πρόγραμμα, για την αποφυγή αύξησης του μεγέθους του παραγόμενου αρχείου και αδυναμία ανάγνωσης του από το εργαλείο Model Builder. Επίσης, η μετατροπή αυτή δεν συμπεριλαμβάνεται στο διάγραμμα ροής του μοντέλου, γιατί θεωρήθηκε διαδικασία προεργασίας των υπάρχοντων δεδομένων.



Εικόνα 6-2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους, χωρίς κλίμακα, του πολυγώνου της περιοχής μελέτης, όπως δημιουργήθηκε με την εντολή `Topo to Raster`. Οι διαφορετικοί τόνοι της κλίμακας μαύρο – λευκό υποδηλώνουν τις διαφορετικές τιμές υψόμετρου, όπως φαίνεται στο υπόμνημα. Οι αρνητικές τιμές προκύπτουν ως σημεία είτε χαμηλότερου υψόμετρου από την στάθμη της θάλασσας είτε ως μικρές περιοχές έλλειψης πλήρους υψομετρικής πληροφορίας. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Οι γεωλογικές ή εδαφικές κατηγορίες προέκυψαν από ψηφιοποίηση του τμήματος της περιοχής μελέτης του εδαφολογικού χάρτη της Ελλάδας του Ινστιτούτου Εδαφολογίας – Λιπασματολογίας και Κλιματολογίας του έτους 1967, σε κλίμακα 1:1.000.000 (Εικόνα 6-3). Οι χαρακτηριστικές τιμές της κάθε εδαφικής κατηγορίας c (συνοχή), ϕ (γωνία εσωτερικής τριβής) και γ (ειδικό βάρος) εδόθησαν από τον κ. Ψαρρόπουλο για την συγκεκριμένη περιοχή.



Εικόνα 6-3: Εδαφικές κατηγορίες εντός της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Οι τιμές των σεισμικών επιταχύνσεων λήφθηκαν από τον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας του έτους 2003, όπως έχει εκδοθεί από την ελληνική κυβέρνηση και επιβάλλεται η εφαρμογή του από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ε.Α.Κ.). Η τιμή για την περιοχή μελέτης του νομού Θεσπρωτίας είναι 0,24g.

Μετά την συλλογή των προαναφερθέντων δεδομένων, χρησιμοποιώντας το εργαλείο ArcCatalog, συνδέθηκε το πρόγραμμα ArcMap με τον φάκελο προέλευσης των δεδομένων και δημιουργήθηκε εντός αυτού μία γεωβάση, για την αποθήκευση και βέλτιστη διαχείριση τους. Η γεωβάση αποτελεί θεμελιώδη έννοια οργάνωσης σε ένα σύστημα διαχείρισης πληροφοριών που παρουσιάζουν συσχετίσεις μεταξύ τους. Οι διαδικασίες που ακολούθησαν άντλησαν τα δεδομένα από το εσωτερικό της γεωβάσης.

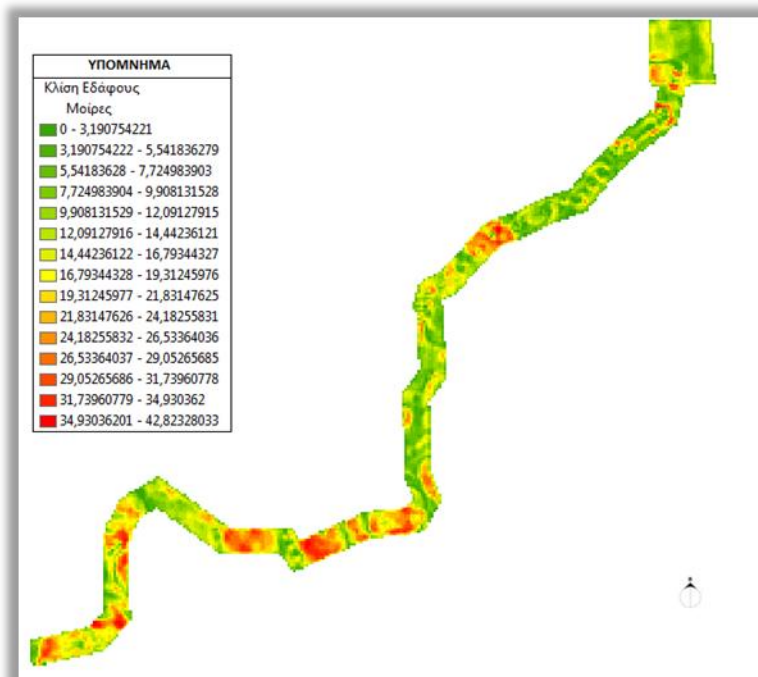
6.2.3 Διαμόρφωση κριτηρίων

Η διαμόρφωση κριτηρίων και η συλλογή δεδομένων εμφάνισαν μία αμφίδρομη σχέση, αφού, αρχικά, κατά τον σχεδιασμό της μεθοδολογίας δεν υπήρχε πλήρης εποπτεία των πηγών συλλογής δεδομένων. Συνεπώς, διαμορφώθηκε αρχικά ένας βασικός κορμός ο οποίος ακολουθήθηκε μέχρι τέλους, ωστόσο η διαδικασία στο σύνολο της τροποποιήθηκε βάσει των προβλημάτων που προέκυψαν στην απόκτηση των αρχικά απαιτούμενων δεδομένων (π.χ. πληροφορίες σχετικά με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα). Τα κριτήρια καθορισμού των επικίνδυνων περιοχών υπό στατικές συνθήκες ορίστηκε ως ο στατικός συντελεστής ασφαλείας (Static S.F. – Safety Factor) να είναι μικρότερος του 1,4, συνυπολογίζοντας εξωτερικούς παράγοντες όπως ο υδροφόρος ορίζοντας και μειώνοντας σημαντικά τον κίνδυνο απώλειας ζωών (Ortigao et al., 2004). Υπό δυναμικές – σεισμικές συνθήκες ορίστηκε ως η υπέρβαση της κρίσιμης επιτάχυνσης του κάθε πρανούς (k_{cr}) από την μέση σεισμική επιτάχυνση της περιοχής (0,24g).

6.2.4 Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία

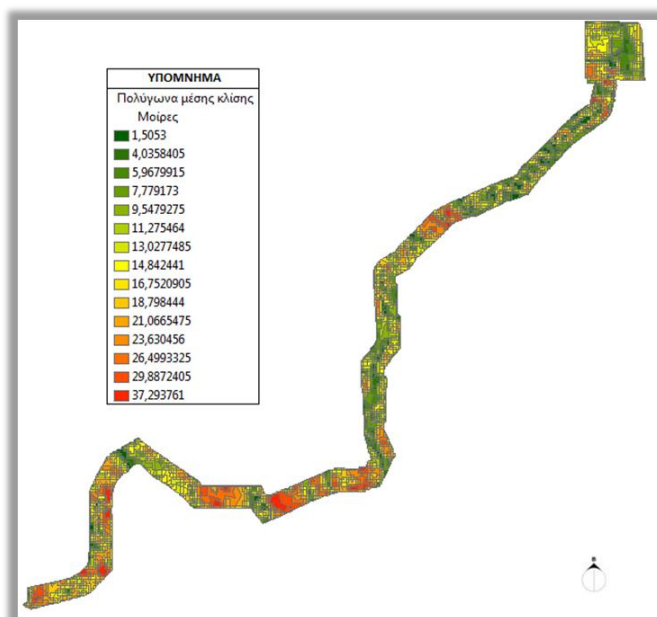
Βάσει των προηγούμενων κριτηρίων, δομήθηκε ένα μοντέλο μέσω του εργαλείου Model Builder, το οποίο και ακολουθήθηκε για την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Το μοντέλο αυτό, σε πρώτη φάση, διαμόρφωσε κατάλληλα τα θεματικά επίπεδα των κριτηρίων ορισμού των επικίνδυνων περιοχών από τα υπάρχοντα δεδομένα και έπειτα υπολόγισε τις τιμές του στατικού συντελεστή ασφαλείας (Static S.F. – Safety Factor) και της κρίσιμης επιτάχυνσης k_{cr} , με την εξής διαδικασία :

- Υπολογισμός της κλίσης του εδάφους από το εργαλείο Slope.
- Επαναταξινόμηση των ψηφιδωτών δεδομένων του νέου θεματικού επιπέδου που περιέχει τις κλίσεις εδάφους σε περισσότερες κλάσεις, συγκεκριμένα 15 (από τις 9 που αρχικά είχαν ταξινομηθεί οι κλίσεις εδάφους). Οι κλάσεις απέκτησαν διαφορετικά και μικρότερα εύρη τιμών, δίνοντας μία λεπτομερέστερη απεικόνιση των κλίσεων των πρανών (Εικόνα 6-4).



Εικόνα 6-4 : Χάρτης απεικόνισης μέσω κλίσεων εδάφους της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Ακολούθησε η μετατροπή του επαναταξινομημένου raster των κλίσεων σε πολυγωνικές οντότητες (Εικόνα 6-5) με το εργαλείο Raster to Polygon, έτσι ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί ο πίνακας ιδιοτήτων του (attribute table). Τονίζεται ότι μετά την μετατροπή, το κάθε πολύγωνο με τα όρια του αντιπροσωπεύει ένα πρανές με τα όρια του, το οποίο παίρνει την τιμή του αύξοντα αριθμού μίας εκ των προαναφερθεισών 15 κλάσεων, ανάλογα με την θέση του στον χάρτη .



Εικόνα 6-5 : Πολύγωνα που περιέχουν την πληροφορία μέσης κλίσης εδάφους. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Προστέθηκε το πεδίο «Μέση κλίση πρανών» στον πίνακα των ιδιοτήτων του προηγούμενου αποτελέσματος με το εργαλείο Add Field.
- Συμπληρώθηκε το πεδίο «Μέση κλίση πρανών» με το εργαλείο Calculate Field, όπου το κάθε πολύγωνο αντιστοιχίστηκε με μία μέση κλίση εδάφους (ψ), ανάλογα με τον αύξοντα αριθμό της κλάσης με την οποία πρωτύτερα αντιστοιχήθηκε. Ειδικότερα, η μέση κλίση εδάφους ψ για κάθε κλάση υπολογίστηκε ως το ημίθροισμα των ακραίων τιμών του εύρους της. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία, γράφηκαν λίγες γραμμές προγραμματιστικού κώδικα Visual Basic (VB), οι οποίες παρατίθενται στην Εικόνα 6-6 και συμπληρώνονται με την έκφραση SQL “ ψ ”, που χρησιμοποιήθηκε για την μετέπειτα πλήρωση του πεδίου με τις τιμές της μεταβλητής της μέσης κλίσης.

```
Dim ψ
If [gridcode] = 1 Then
ψ = 1.5053000
elseif [gridcode] = 2 Then
ψ = 4.0358405
elseif [gridcode] = 3 Then
ψ = 5.9679915
elseif [gridcode] = 4 Then
ψ = 7.7791730
elseif [gridcode] = 5 Then
ψ = 9.5479275
elseif [gridcode] = 6 Then
ψ = 11.2754640
elseif [gridcode] = 7 Then
ψ = 13.0277485
elseif [gridcode] = 8 Then
ψ = 14.8424410
elseif [gridcode] = 9 Then
ψ = 16.7520905
elseif [gridcode] = 10 Then
ψ = 18.798444
elseif [gridcode] = 11 Then
ψ = 21.0665475
elseif [gridcode] = 12 Then
ψ = 23.630456
elseif [gridcode] = 13 Then
ψ = 26.4993325
elseif [gridcode] = 14 Then
ψ = 29.8872405
elseif [gridcode] = 15 Then
ψ = 37.2937610
end if
```

Εικόνα 6-6 : Γραμμές κώδικα Visual Basic για την πλήρωση του πεδίου "Μέση κλίση εδάφους". Αρχικά δηλώνεται η μεταβλητή ψ με την έκφραση dim και έπειτα εφαρμόζεται μία συνάρτηση if για την πλήρωση του πεδίου ανάλογα με τον αύξοντα αριθμό της κλάσης gridcode. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Έπειτα, προστίθεται άλλο ένα πεδίο στον πίνακα χαρακτηριστικών του θεματικού επίπεδου των πολυγώνων με το όνομα «Μέσο ύψος πρανών» με το εργαλείο Add Field.
- Το πεδίο «Μέσο ύψος πρανών» συμπληρώνεται με το εργαλείο Calculate Field. Ουσιαστικά, για κάθε πολύγωνο – πρανές από τα προηγούμενα, υπολογίζεται το μέσο ύψος H βάσει της απλής τριγωνομετρικής εξίσωσης 6.1, όπου M το μήκος πρανούς δίνεται από το επίπεδο μήκος του αντίστοιχου πολυγώνου - πρανούς, προεπιλεγμένα από το πρόγραμμα ArcMap σε κάθε πίνακα χαρακτηριστικών πολυγωνικών οντοτήτων.

$$H = \tan(\psi) M \quad (6.1)$$

- Εφαρμόζεται τομή μεταξύ των θεματικών επιπέδων των εδαφικών κατηγοριών και των, ενημερωμένων με τα νέα πεδία, πολυγώνων με το εργαλείο Intersect. Το αποτέλεσμα αυτής της τομής είναι ένα σύνολο πολυγωνικών οντοτήτων, που περιέχουν τα στοιχεία για την εδαφική κατηγορία και τα χαρακτηριστικά της, καθώς και την μέση κλίση πρανούς και το μέσο ύψος τους.
- Στο αποτέλεσμα της τομής, προστίθεται νέο πεδίο με το όνομα «Στατικός συντελεστής ασφαλείας» με το εργαλείο Add Field.
- Το νέο πεδίο «Στατικός συντελεστής ασφαλείας» συμπληρώνεται με το εργαλείο Calculate Field. Ειδικότερα, υπολογίζεται ο στατικός συντελεστής ασφαλείας (F.S) σύμφωνα με την εξίσωση (6.2), όπως προτείνεται από τους Χαραλάμπους και Σακελλαρίου (2005), με έκφραση SQL. Η πίεση πόρων ύδατος r_u θεωρείται μηδενική.

$$F.S. = 2,369 \left(\frac{c \cos(e c \psi)}{\gamma H} \right) + 1,499 (1 - r_u) \cot \psi \tan \varphi \quad (6.2)$$

όπου: c = συνοχή του εδάφους

ψ = μέση κλίση πρανούς

γ = ειδικό βάρος εδαφικού υλικού

H = μέσο ύψος πρανούς

φ = γωνία τριβής της εδαφικής κατηγορίας

- Προσθήκη πεδίου «Κρίσιμη επιτάχυνση» στο ενημερωμένο με τον στατικό συντελεστή ασφαλείας αποτέλεσμα της τομής, με το εργαλείο Add Field.
- Πλήρωση του πεδίου «Κρίσιμη επιτάχυνση» με το εργαλείο Calculate Field. Ο υπολογισμός της κρίσιμης επιτάχυνσης (k_c) έγινε όπως υποδεικνύουν οι Σ. Χαραλάμπους και Σακελλαρίου (2005), για ήπιες και απότομες κλίσεις, με την εξίσωση (6.3), όπου F.S. ο στατικός συντελεστής ασφαλείας που υπολογίστηκε πριν και ψ η μέση κλίση των πρανών, με διατύπωση SQL μεταξύ των πεδίων ενδιαφέροντος.

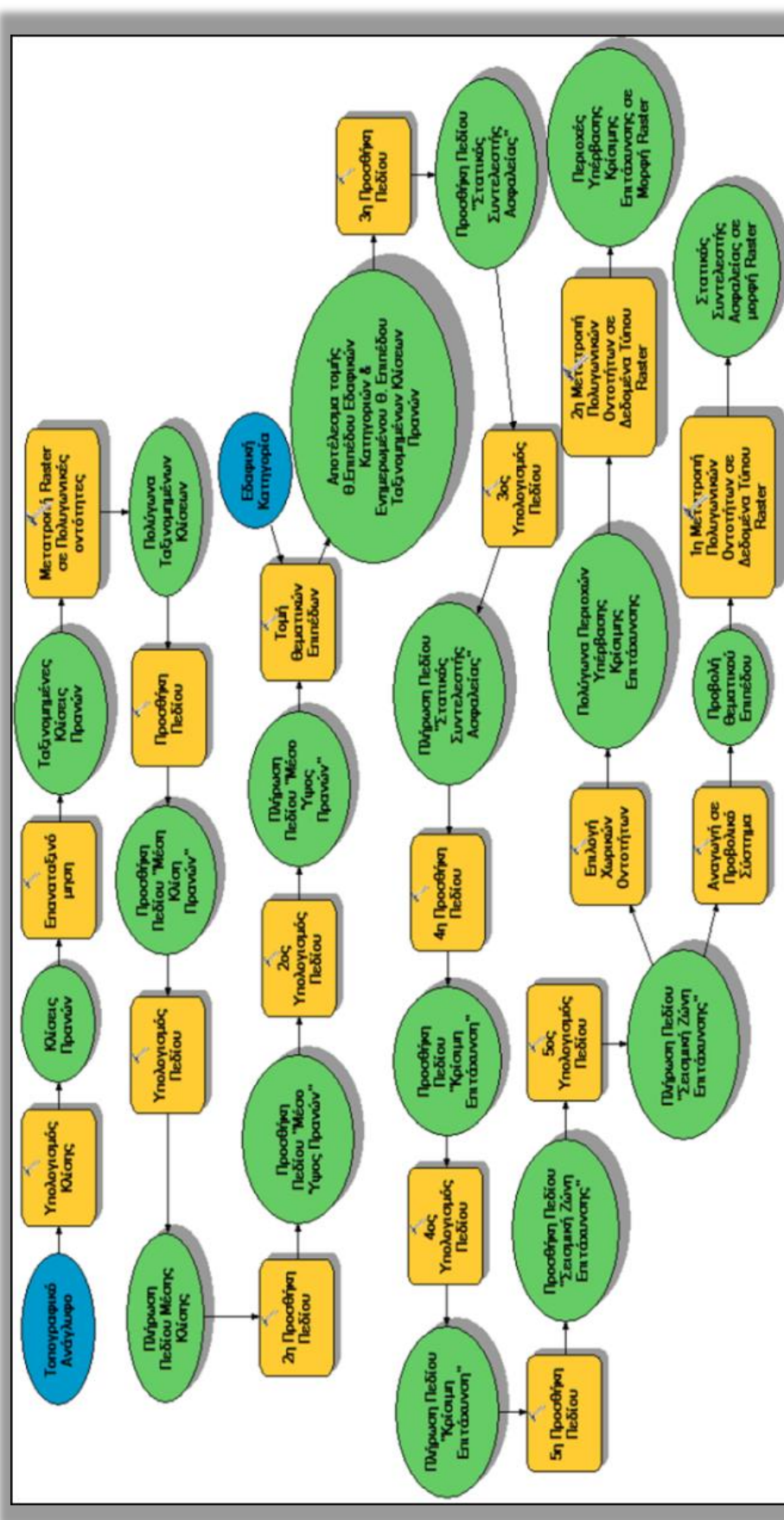
$$k_c = \frac{(F.S. - 1)}{0,94 + \frac{0,84}{\tan \psi}} \quad (6.3)$$

- Έπειτα, προστέθηκε το πεδίο «Σεισμική Ζώνη Επιτάχυνσης» με το εργαλείο Add Field και συμπληρώθηκε με την τιμή 0,24g, μέσω του εργαλείου Calculate Field.
- Για την εξαγωγή των περιοχών όπου παρατηρείται υπέρβαση της υπολογισθείσας κρίσιμης επιτάχυνσης από την μέση σεισμική επιτάχυνση, εφαρμόστηκε το εργαλείο Select, στο οποίο προστέθηκε η SQL έκφραση : «Κρίσιμη επιτάχυνση <= Σεισμική Ζώνη Επιτάχυνσης». Έπειτα, μετατράπηκε

το προηγούμενο αποτέλεσμα από πολυγωνική σε ψηφιδωτή μορφή με το εργαλείο Polygon to Raster, με στόχο την καλύτερη απεικόνιση των επικινδύνων, υπό δυναμικές συνθήκες, περιοχών (Εικόνα 6-9).

- Για την εξαγωγή του ψηφιδωτού των τιμών του στατικού συντελεστή ασφαλείας, αρχικά οι πολυγωνικές οντότητες προβλήθηκαν στο σύστημα αναφοράς του αρχικού DEM με το εργαλείο Project και έπειτα έγινε η μετατροπή τους σε ψηφιδωτό σύνολο δεδομένων με το εργαλείο Polygon to Raster (Εικόνα 6-8).

Το μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή αυτής της αλληλουχίας εργαλείων, απεικονίζεται ως διάγραμμα ροής στην παρακάτω Εικόνα 6-7. Ως μπλε ελλείψεις συμβολίζονται τα εισαγόμενα δεδομένα (input), ως πράσινες ελλείψεις τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output) και ως κίτρινα ορθογώνια τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία.

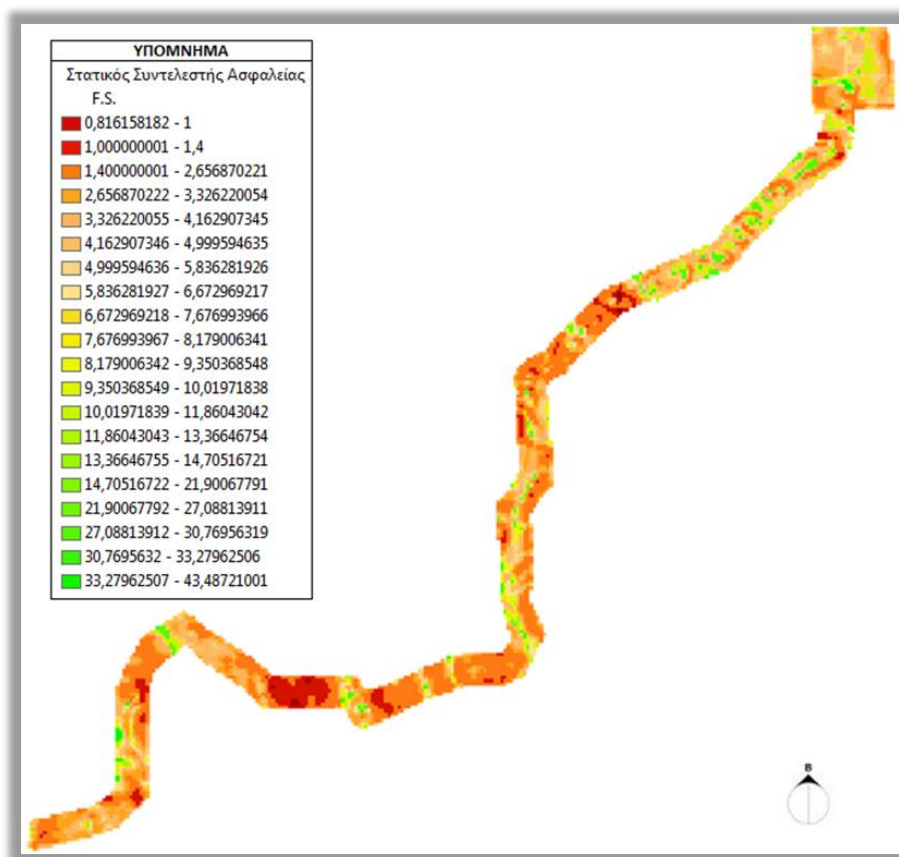


Εικόνα 6-7: Το εφαρμοζόμενο μοντέλο σε μορφή διαγράμματος ροής εργασιών. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

6.2.5 Αποτελέσματα μοντέλου

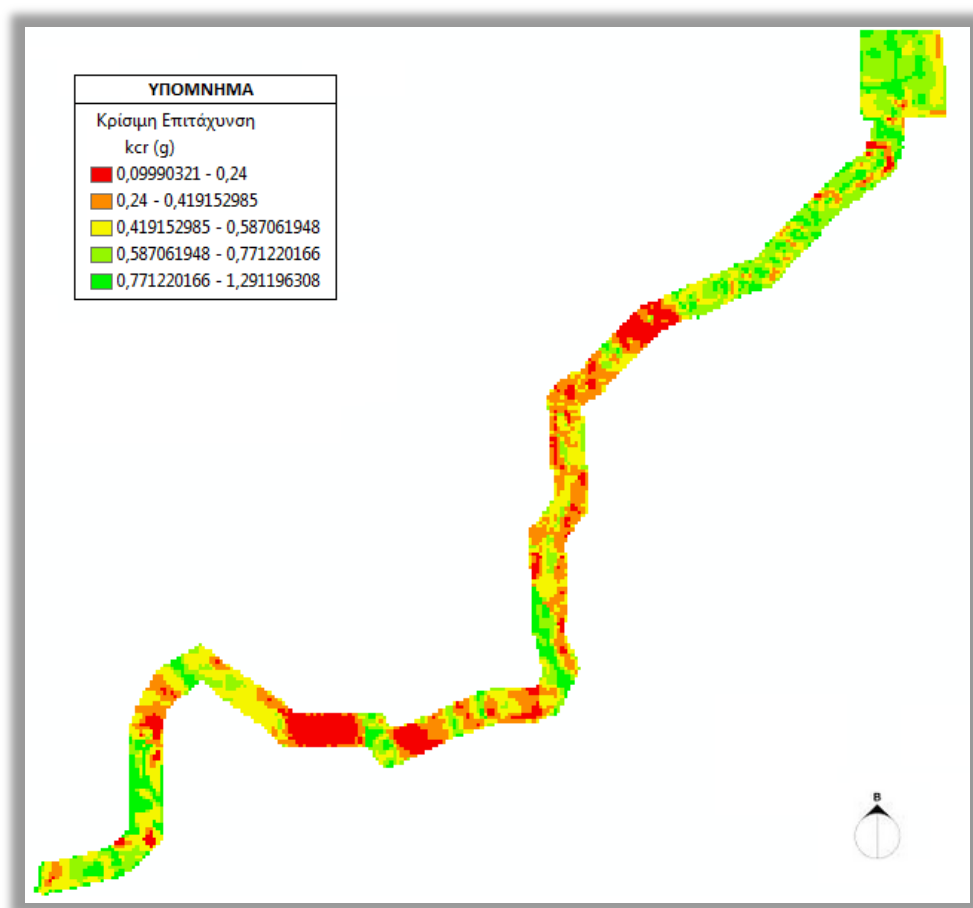
Από την εφαρμογή του μοντέλου, προέκυψαν δύο θεματικά επίπεδα ψηφιδωτής μορφής (raster layers), τα οποία περιέχουν την πληροφορία για τον στατικό συντελεστή ασφαλείας F.S. και την κρίσιμη σεισμική επιτάχυνση αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 6-8 παρουσιάζεται το θεματικό επίπεδο των τιμών του στατικού συντελεστή ασφαλείας, στο οποίο έχει εφαρμοστεί μία ημιαυτόματη ταξινόμηση. Ουσιαστικά, θέλοντας να επιτευχθεί η κατάλληλη διαβάθμιση των ευρών των κλάσεων τιμών, τροποποιήθηκαν το άνω όριο της πρώτης κλάσης σε 1 και το κάτω της όριο (και άνω όριο της δεύτερης κλάσης) σε 1,4, που αποτελούν τις τιμές που ενδιαφέρουν την μελέτη για εξαγωγή συμπερασμάτων. Έχει χρησιμοποιηθεί μία χρωματική κλίμακα απεικόνισης από το κόκκινο στο πράσινο, με τις αποχρώσεις του κόκκινου να αποτελούν τις περιοχές με τιμές στατικού συντελεστή ασφαλείας μικρότερου ή ίσου του 1,4 (κριτήριο $F.S. \leq 1,4$) και τις υπόλοιπες περιοχές, χρώματος από έντονη απόχρωση του πορτοκαλί μέχρι έντονη απόχρωση πρασίνου, να αποτελούν τις περιοχές σταδιακά αυξανόμενης ευστάθειας.



Εικόνα 6-8: Απεικόνιση του θεματικού επιπέδου ψηφιδωτής μορφής του στατικού συντελεστή ασφαλείας, χωρίς κλίμακα. Οι περιοχές με τιμές F.S. μικρότερες του 1 απεικονίζονται με την σκούρα απόχρωση του κόκκινου ενώ οι περιοχές με τιμές μεταξύ των 1 και 1,4 με την λίγο πιο ανοιχτή απόχρωση κόκκινου. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Στην Εικόνα 6-9 παρουσιάζεται το θεματικό επίπεδο ψηφιδωτής μορφής της κρίσιμης επιτάχυνσης στο οποίο έχει, επίσης, εφαρμοστεί ημιαυτόματη ταξινόμηση, αλλάζοντας το άνω όριο της πρώτης κλάσης σε 0,24. Έχει χρησιμοποιηθεί κλίμακα χρωματικής απεικόνισης από το κόκκινο στο πράσινο, με το κόκκινο να ορίζει τις επικίνδυνες, υπό σεισμικές - δυναμικές συνθήκες, περιοχές σύμφωνα με το κριτήριο που είχε προηγουμένως οριστεί. Οι υπόλοιπες περιοχές από το πορτοκαλί έως το πράσινο παρουσιάζουν μία φθίνουσα πορεία της επικινδυνότητας.



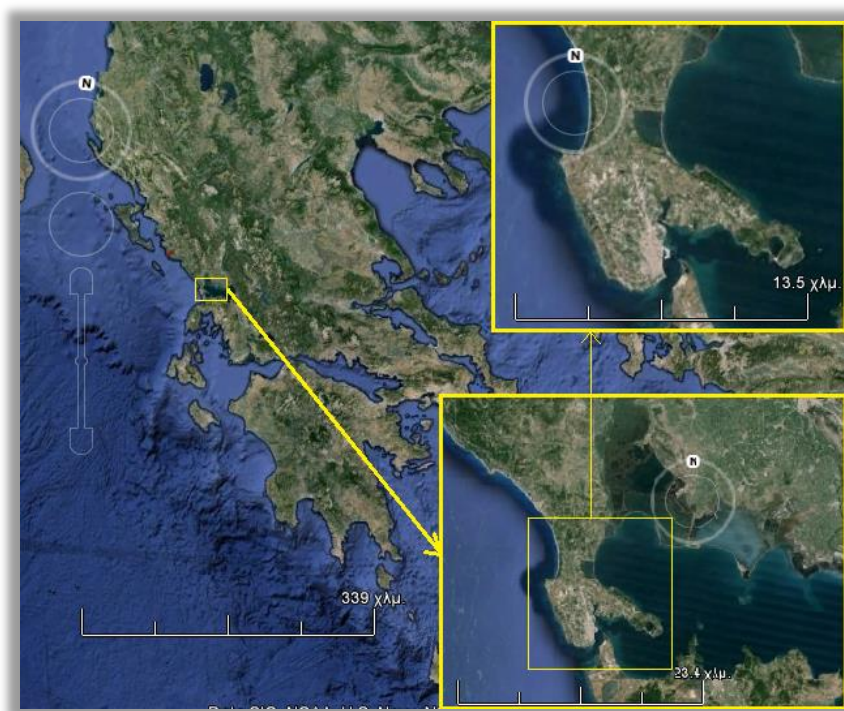
Εικόνα 6-9: Απεικόνιση του θεματικού επιπέδου ψηφιδωτής μορφής της κρίσιμης επιτάχυνσης, χωρίς κλίμακα. Οι περιοχές με τιμές κρίσιμης επιτάχυνσης μικρότερες της μέσης σεισμικής (0,24g) απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και αντιπροσωπεύουν τις δυνητικά επικίνδυνες περιοχές υπό σεισμικές συνθήκες. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

6.3 2^η Εφαρμογή : Χάραξη διαδρομής αγωγού σε χερσαίο έδαφος στον δήμο Πρέβεζας

6.3.1 Γενικό πλαίσιο και περιοχή μελέτης

Η πρώτη εφαρμογή, αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι η ευστάθεια πρανών αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς και καταστροφικούς γεωκινδύνους για τους αγωγούς, είχε ως μόνο στόχο τον ορισμό των επικίνδυνων περιοχών υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες. Η δεύτερη εφαρμογή, ωστόσο, αποτελεί μία πιο ευρεία και πολύπλοκη εφαρμογή που σχετίζεται με την χάραξη ενός αγωγού σε χερσαίο έδαφος, βάσει των μετέπειτα ορισθέντων κριτηρίων και συμπεριλαμβάνοντας το αποτέλεσμα της προτεινόμενης διαδικασίας της πρώτης εφαρμογής ως κριτήριο.

Η περιοχή που επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης αυτής της εφαρμογής είναι τμήμα του δήμου Πρέβεζας (Εικόνα 6-10), λόγω του όγκου διαθέσιμης πληροφορίας σχετικά με τα χαρακτηριστικά του. Ο δήμος Πρέβεζας, διοικητικά, αποτελεί τμήμα του νομού ή περιφερειακής ενότητας της Πρέβεζας, η οποία με την σειρά της ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Ηπείρου (www.el.wikipedia.org/wiki/Δήμος_Πρέβεζας, 2014).



Εικόνα 6-10: Η θέση της περιοχής μελέτης του τμήματος του δήμου Πρέβεζας, όπως ορίζεται στον ελλαδικό χώρο. (Πηγή: Google Earth, 2015)

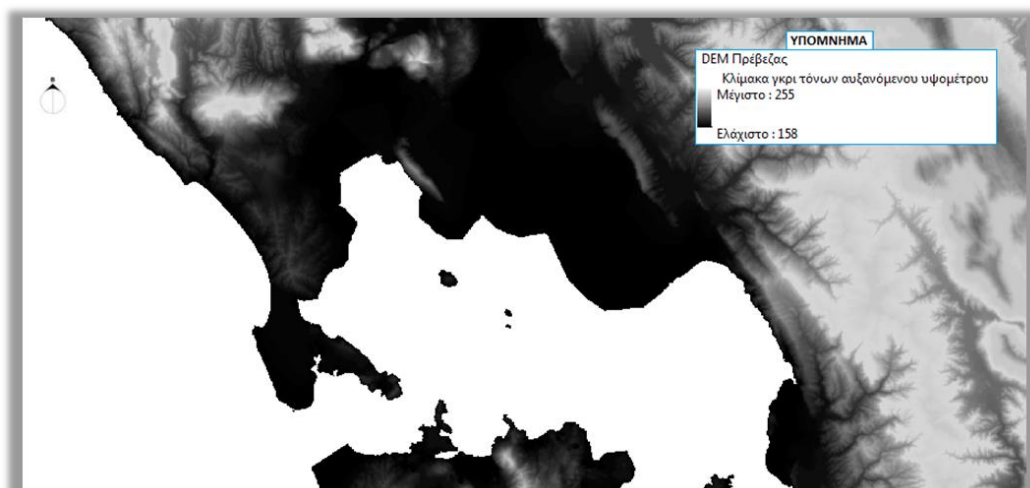
6.3.2 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων

Τον ορισμό της περιοχής ακολούθησε ο καθορισμός των απαραίτητων δεδομένων για την εκπόνηση της διαδικασίας και η συλλογή τους. Επισημαίνεται ότι η διαδικασία επιλογής δεδομένων και ορισμού των χρησιμοποιούμενων κριτηρίων αποτέλεσε

αμφίδρομη, όπως και στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης. Τα απαιτούμενα δεδομένα καθορίστηκαν ως εξής:

- Τοπογραφικό Ανάγλυφο ή DEM της περιοχής μελέτης, με στόχο τη συλλογή της υψομετρικής πληροφορίας
- Γεωλογικό ή εδαφολογικό χάρτη, με στόχο τον ορισμό των εδαφικών κατηγοριών
- Χαρακτηριστικά των εδαφικών κατηγοριών (c, γ, φ)
- Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας
- Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα
- Χάρτης χρήσεων γης
- Χάρτη περιβαλλοντικών περιορισμών, όπως αρχαιολογικοί χώροι και μνημεία
- Χάρτη τοπογραφικής αποτύπωσης, με στόχο την αποτύπωση περιοχών προς αποφυγήν, όπως οι λίμνες.

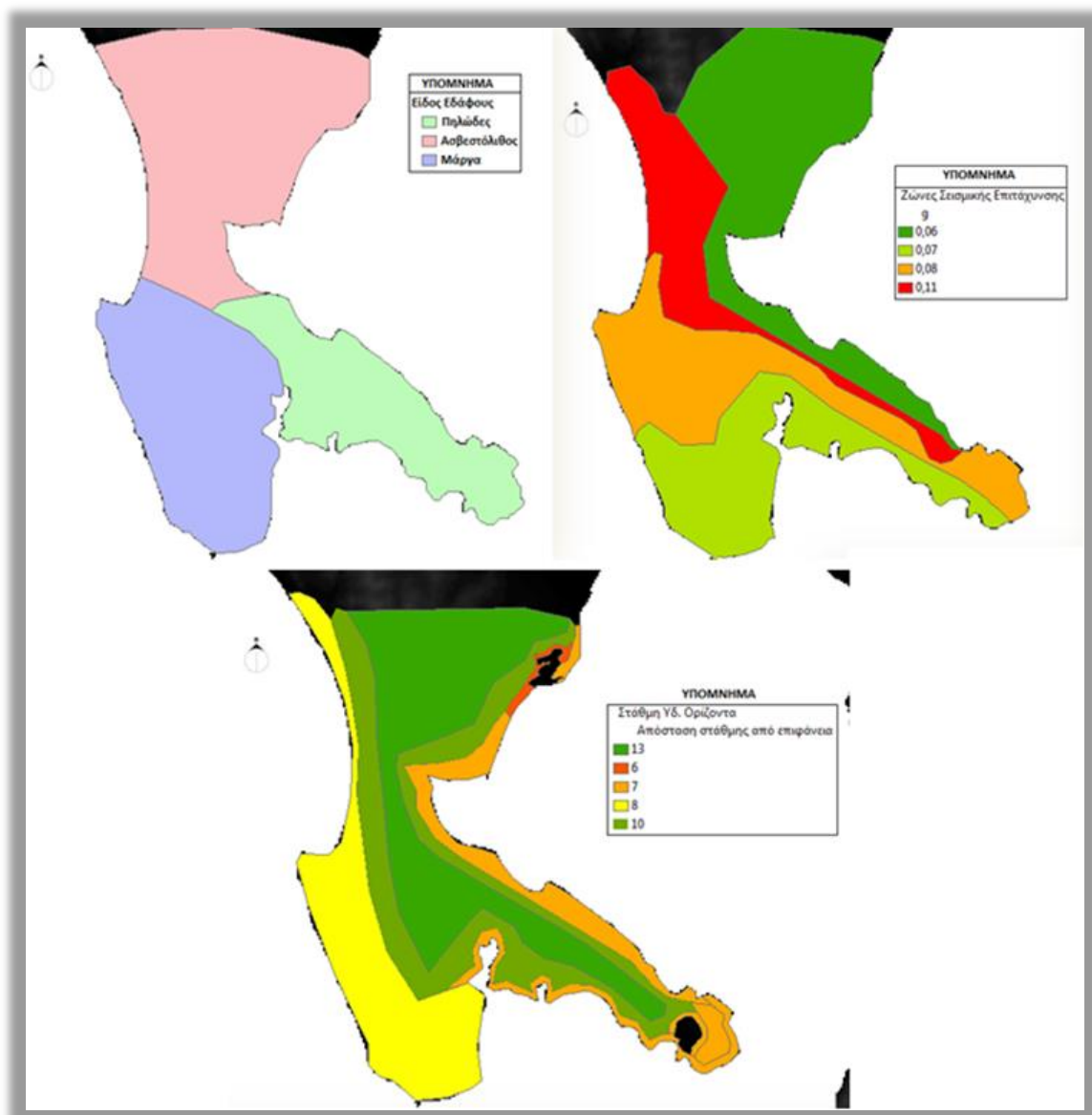
Όλα τα προαναφερθέντα απαραίτητα δεδομένα αποκτήθηκαν από την ιστοσελίδα δημόσιων ανοιχτών γεωχωρικών δεδομένων www.geodata.gov.gr (2012), σε μορφή αρχείων .shp και .geotiff για το DEM (Εικόνα 6-11) της περιοχής (διαστάσεων κελιού 50 x 50 m), με εξαίρεση των δεδομένων εδαφικών κατηγοριών και των βασικών τους κατηγοριών. Το σύστημα χωρικής αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για το σύνολο όλων των δεδομένων ήταν η εγκάρσια μερκατορική προβολή της Βόρειας Αμερικής '83 (North American 1983 Transverse Mercator), όπως ορίστηκε από το δοσμένο DEM.



Εικόνα 6-11: Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο ευρύτερης περιοχής της Πρέβεζας. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Τα δεδομένα των εδαφικών κατηγοριών (Εικόνα 6-12) αποκτήθηκαν από τον εδαφολογικό χάρτη που χρησιμοποιήθηκε και στην πρώτη μελέτη περίπτωσης, ενώ οι μέσες τιμές των εδαφικών χαρακτηριστικών αυτών λήφθηκαν από το βιβλίο «Εδαφομηχανική: Αρχές και Εφαρμογές» του G. Barnes (2005). Λόγω της απώλειας των τιμών των εδαφικών χαρακτηριστικών, οι προαναφερθείσες μέσες τιμές τους

λήφθηκαν ως γενικές εκτιμήσεις, προσθέτοντας άλλη μία παραδοχή στην διαδικασία της μοντελοποίησης.



Εικόνα 6-12: Χάρτες : Εδαφικών κατηγοριών Δήμου Πρέβεζας, ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης και στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Μετά την συλλογή τους και την σύνδεση του προγράμματος ArcMap με τον φάκελο προέλευσης τους (πρόγραμμα ArcCatalog), τα δεδομένα εισήχθησαν σε μία βάση χωρικών δεδομένων, με στόχο την βέλτιστη διαχείριση του μεγάλου όγκου πληροφοριών της μελέτης περίπτωσης και τον σαφή ορισμό των σχέσεων μεταξύ τους. Η διαδικασία, η ανάλυση της οποίας ακολουθεί, άντλησε τα δεδομένα από την συγκεκριμένη γεωβάση δεδομένων.

6.3.3 Διαμόρφωση κριτηρίων

Με στόχο την, όσο το δυνατό, βέλτιστη χάραξη του αγωγού και μέσω της αναλυθείσας διαδικασίας δημιουργήθηκαν θεματικά επίπεδα, το καθένα εκ των

οποίων αντιπροσώπευσε ένα κριτήριο στην διαδικασία επιλογής της διαδρομής του αγωγού. Σε αυτά τα θεματικά επίπεδα ορίστηκαν διαφορετικά βάρη, έτσι ώστε μετά την υπέρθεση τους να προκύψει ένα τελικό σύνολο δεδομένων που θα μεταφράζεται ως το συνολικό σταθμισμένο «κόστος» της διέλευσης του αγωγού από κάθε τμήμα της περιοχής μελέτης. Το σύνολο των κελιών με την χαμηλότερη συνολική τιμή «κόστους» αποτέλεσε την βάση για την τελική χάραξη του αγωγού. Επισημαίνεται ότι η έννοια «κόστος» χρησιμοποιήθηκε όχι για να δώσει οικονομική υπόσταση στο αποτέλεσμα του προβλήματος, αλλά ως μέσο ποιοτικής εκτίμησης της βέλτιστης χάραξης, όπως προκύπτει από τα επιλεγμένα κριτήρια. Ως βασικά κριτήρια για την εξαγωγή του τελικού σταθμισμένου κόστους, λοιπόν, ορίστηκαν:

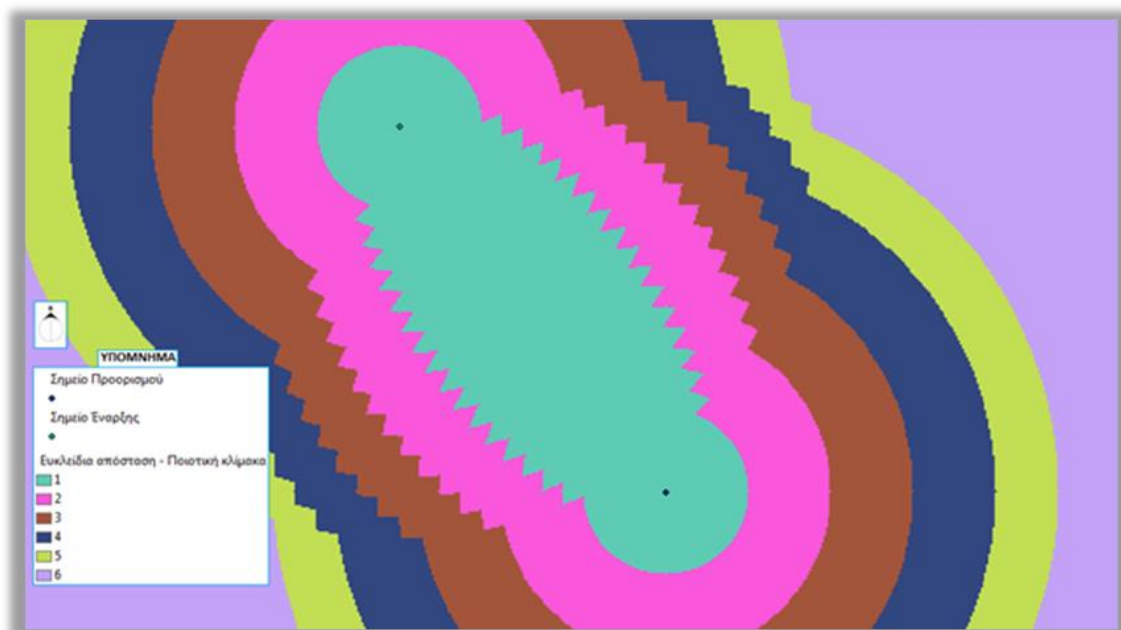
- Η αποφυγή των κατοικημένων περιοχών, αρχαιολογικών χώρων και λιμνών
- Η αποφυγή των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης εδάφους
- Η ελάχιστη απόσταση (ευκλείδεια απόσταση), συνεπώς το ελάχιστο δυνατό μήκος διαδρομής
- Η αποφυγή των δυνητικά ασταθών πρανών υπό δυναμικές – στατικές συνθήκες

6.3.4 Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία

Βάσει των προαναφερθέντων κριτηρίων, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ροής εργασιών μέσω του εργαλείου Model Builder για την εξαγωγή της τελικής διαδρομής του αγωγού εντός της περιοχής μελέτης. Λόγω της πλειοψηφίας των δεδομένων σε μορφή raster, ορίστηκαν ως προκαθορισμένες διαστάσεις κελιού για όλα τα αποτελέσματα μορφής raster αυτές του DEM (όπως έγινε και στις τρεις μελέτες περίπτωσης). Το μοντέλο διαμόρφωσε, σε πρώτη φάση, κατάλληλα τα δεδομένα για να εισαχθούν στην αλληλουχία εργαλείων, σε δεύτερη φάση υπολόγισε τα ψηφιδωτά των θεματικών επιπέδων των κριτηρίων και σε τρίτη φάση όρισε το συνολικό κόστος και την τελική διαδρομή. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε επιδέχθηκε πολλές απλοποιήσεις, χάριν της πολυπλοκότητας του προβλήματος, οδηγώντας σε μία προσεγγιστική χάραξη. Τα βήματα της διαδικασίας, όπως ορίστηκαν και απεικονίζονται διαγραμματικά στην Εικόνα 6-17, ήταν τα εξής:

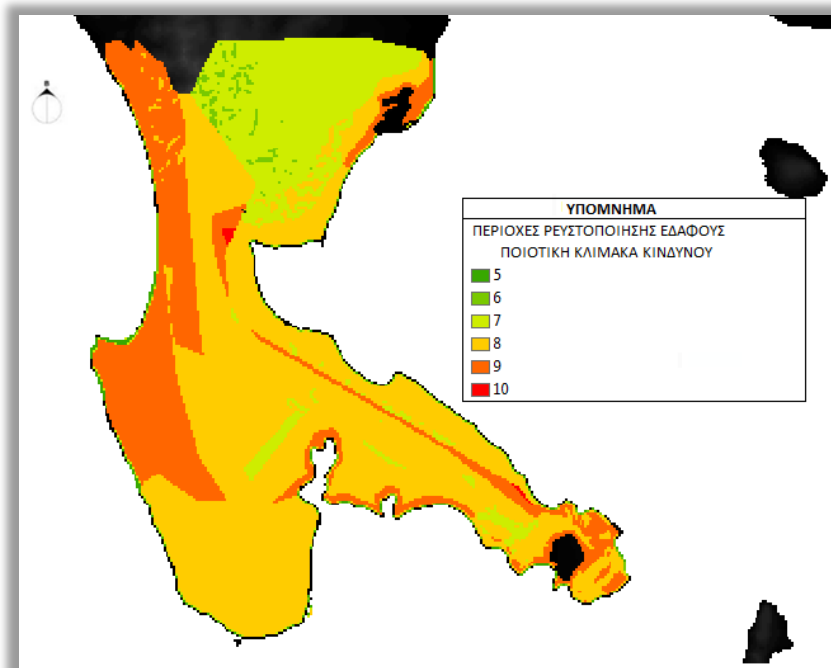
- Ορίστηκαν ένα σημείο εκκίνησης της διαδρομής και ένα σημείο πέρατος της εντός της περιοχής μελέτης, τα οποία επιλέχθηκαν έτσι ώστε να βρίσκονται εκτός των περιοχών προς αποφυγή.
- Τα σημεία αυτά προβλήθηκαν στο χωρικό σύστημα αναφοράς του DEM με το εργαλείο Project.
- Υπολογίστηκε η ευκλείδεια απόσταση και από τα δύο σημεία με το εργαλείο Euclidean Distance.
- Από τα αποτελέσματα των ευκλείδειων αποστάσεων προέκυψε μία σταθμισμένη τιμή ευκλείδειας απόστασης που συμπεριλαμβάνει τιμές και για τα δύο σημεία, με το εργαλείο Weighted Sum. Παρόλο που το μετέπειτα εργαλείο της εξαγωγής σταθμισμένου κόστους συνυπολογίζει το σημείο της εκκίνησης, δεν συμπεριλαμβάνει ταυτόχρονα τις τιμές του σημείου πέρατος.

Λόγω αυτού, παρατηρήθηκε μία λιγότερο γραμμική συμπεριφορά της προκύπτουσας χάραξης, με αποτέλεσμα να μην ακολουθείται η συντομότερη διαδρομή όπου δύναται. Για αυτό και υπολογίστηκε το σταθμισμένο άθροισμα των τιμών των ευκλείδειων αποστάσεων και για τα δύο σημεία και προστέθηκε, έπειτα, ως επιπρόσθετο κριτήριο στην διαδικασία. Επισημαίνεται ότι, για λεπτομερέστερη τελική απεικόνιση, έγινε επαναταξινομήση των δεδομένων των ευκλείδειων αποστάσεων σε περισσότερες κλάσεις πριν το σταθμισμένο άθροισμα με το εργαλείο Reclassify (Εικόνα 6-13).



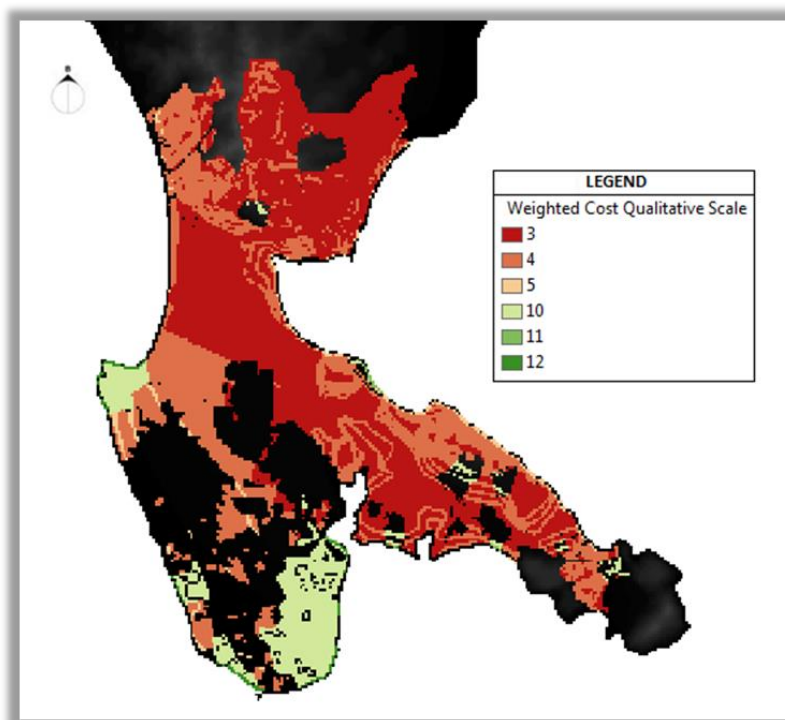
Εικόνα 6-13: Το σταθμισμένο άθροισμα της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του σημείου πέρατος. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Ακολούθησε ο υπολογισμός της κλίσης εδάφους από το αρχικό DEM, με το εργαλείο Slope. Το αποτέλεσμα, έπειτα, επαναταξινομήθηκε σε 15 κλάσεις για λεπτομερέστερη απεικόνιση, με το εργαλείο Reclassify.
- Για τον ορισμό των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης εδάφους, χρησιμοποιήθηκε η σταθμισμένη υπέρθεση (εργαλείο Weighted Overlay) των θεματικών επιπέδων της κλίσης εδάφους, των ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, αφού πρώτα και τα τελευταία δύο μετατράπηκαν σε δεδομένα ψηφιδωτής μορφής από πολυγωνικές οντότητες (εργαλείο Polygon to Raster). Η επιλογή αυτών των θεματικών επιπέδων για τον προσδιορισμό έγινε αφού οι περιοχές που παρουσιάζουν ρευστοποίηση συγκεντρώνουν συνθήκες υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, υψηλής σεισμικής επιτάχυνσης και έχουν ήπιες κλίσεις (Εικόνα 6-14). Η στάθμιση έγινε ισοβαρώς, αφού δεν υπήρχαν δεδομένα διαφοροποίησης κάποιων εκ των τριών παραγόντων ως προς τη σημασία του. Επισημαίνεται ότι κάθε τιμή κάθε θεματικού επιπέδου αντιστοιχίστηκε με τιμή μίας αύξουσας ποιοτικής κλίμακας, η οποία αντιπροσωπεύει το «κόστος» για κάθε μία από αυτές.



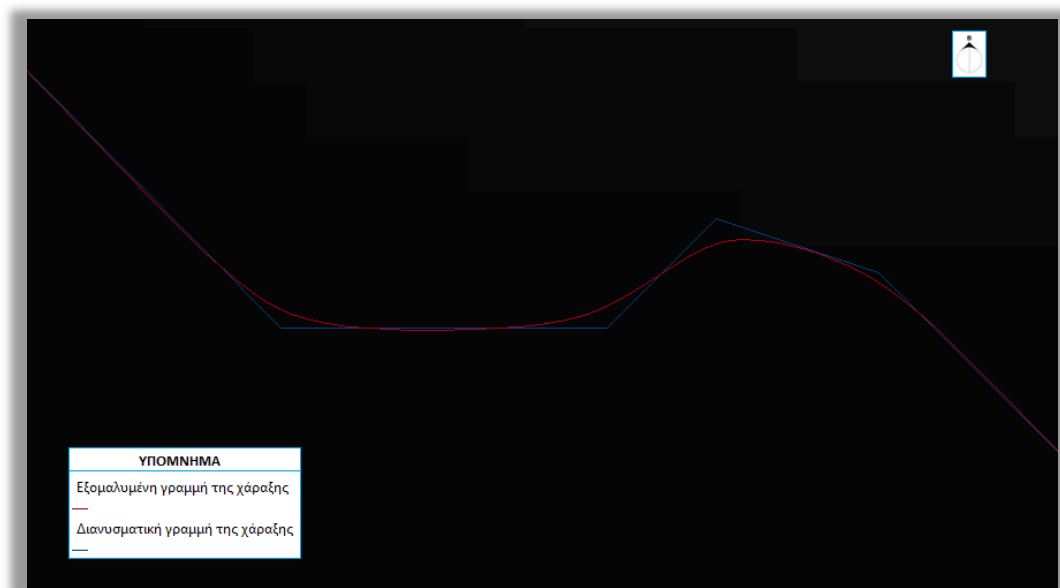
Εικόνα 6-14: Περιοχές πιθανής ρευστοποίησης εδάφους, με λιγότερο επικίνδυνες τις πράσινες περιοχές και περισσότερο τις κόκκινες. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Για τον ορισμό των περιοχών προς αποφυγή των αστικών περιοχών, των λιμνών και των αρχαιολογικών περιοχών, οι οποίες υπήρχαν αρχικά σε τρία διαφορετικά θεματικά επίπεδα, συγχωνεύθηκαν διατηρώντας τις τιμές τους στον τελικό πίνακα ιδιοτήτων και μετατράπηκαν σε δεδομένα ψηφιδωτής μορφής με το εργαλείο Polygon to Raster. Έπειτα, ακολούθησε επαναταξινόμηση τους (εργαλείο Reclassify), με σκοπό την ανάδειξη των τριών διαφορετικών κατηγοριών περιοχών. Το τελικό αυτό αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο στην τελική σταθμισμένη υπέρθεση.
- Έπειτα εκτελέστηκε η τελική σταθμισμένη υπέρθεση με το εργαλείο Weighted Overlay, όπου εισάχθηκαν ως θεματικά επίπεδα – κριτήρια επιρροής οι επαναταξινομημένες περιοχές των λιμνών, αρχαιολογικών χώρων και αστικών ιστών, οι περιοχές πιθανής ρευστοποίησης εδάφους, το σταθμισμένο άθροισμα των ευκλείδειων αποστάσεων των σημείων εκκίνησης και πέρατος της διαδρομής και οι περιοχές πιθανής αστάθειας πρανών σε σεισμικές συνθήκες. Οι τελευταίες περιοχές δημιουργήθηκαν με την διαδικασία που προτάθηκε από την πρώτη μελέτη περίπτωσης, εισάγοντας τα δεδομένα της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης (η διαδικασία τους δεν αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής του νέου μοντέλου για αποφυγή της επανάληψης). Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης ήταν ένα θεματικό επίπεδο ψηφιδωτής μορφής (raster layer), που περιείχε τις τιμές σταθμισμένου ποιοτικού κόστους για το κάθε κελί της περιοχής (Εικόνα 6-15).



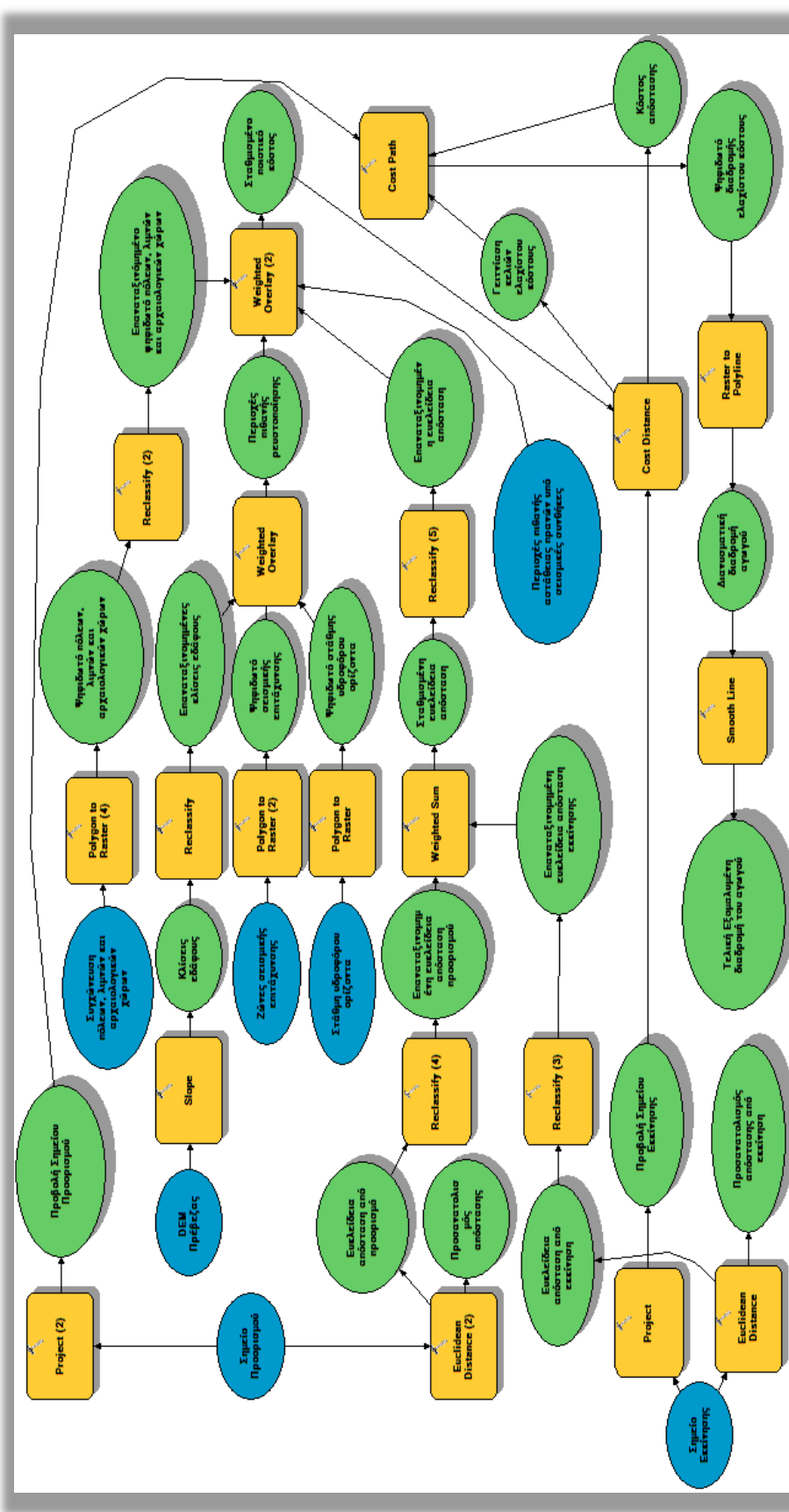
Εικόνα 6-15: Η επιφάνεια κόστους ως αποτέλεσμα της σταθμισμένης υπέρθεσης όλων των κριτηρίων. Βασίζεται σε μία αυθαίρετη ποιοτική κλίμακα κόστους. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τα θεματικά επίπεδα του κόστους απόστασης και της διαδρομής σε μορφή raster, με τα εργαλεία Cost Distance και Cost Path αντίστοιχα. Όπως αναλύθηκε και στο υποκεφάλαιο 5.4.1, τα συγκεκριμένα εργαλεία δέχτηκαν ως εισαγόμενα δεδομένα μορφής raster το θεματικό επίπεδο της σταθμισμένης υπέρθεσης των κριτηρίων και το σημείο εκκίνησης, και το κόστος απόστασης, το ψηφιδωτό γειτνίασης των κελιών με τις ελάχιστες τιμές κόστους (Backlink raster) και το σημείο προορισμού, αντίστοιχα.
- Η διαδρομή του αγωγού μετατράπηκε από μορφή raster σε διανυσματική πολυγωνική γραμμή, με το εργαλείο Raster to Polyline, διότι η γραμμική αναπαράσταση προσεγγίζει περισσότερο την φυσική υπόσταση του αγωγού από αυτή της διαδοχικής σειράς κελιών, διαστάσεων 50 x 50 μέτρων.
- Τέλος, με στόχο την καλύτερη χαρτογραφική απεικόνιση και την ρεαλιστικότερη κατασκευαστική θεώρηση της χάραξης, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Smooth Line για εξομάλυνση της προηγούμενης διανυσματικής χάραξης. Η ρεαλιστικότερη θεώρηση έγκειται στο γεγονός ότι κατά την κατασκευή των τελικών τμημάτων γραμμής δεν είναι υλοποιήσιμη η δημιουργία αρθρώσεων γωνιών. Ουσιαστικά, θέτοντας ως μέγιστο επιτρεπόμενο όριο για μετακίνηση των κορυφών της πολυγωνικής γραμμής της χάραξης στα 100 μέτρα (λόγω του μεγάλου μεγέθους του κελιού, άρα της μικρής ανάλυσης του DEM) οι γωνίες αντικαταστάθηκαν από κυκλικά τόξα, όπως φαίνεται και σε ένα σημείο της χάραξης στην Εικόνα 6-16.



Εικόνα 6-16: Απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ της πολυγωνικής γραμμής της χάραξης και της εξομαλυμένης μορφής της. Χωρίς κλίμακα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Το μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή αυτής της αλληλουχίας εργαλείων, απεικονίζεται ως διάγραμμα ροής στην παρακάτω Εικόνα 6-17, όπου ως μπλε ελλείψεις συμβολίζονται τα εισαγόμενα δεδομένα (input), ως πράσινες ελλείψεις τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output) και ως κίτρινα ορθογώνια τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία.



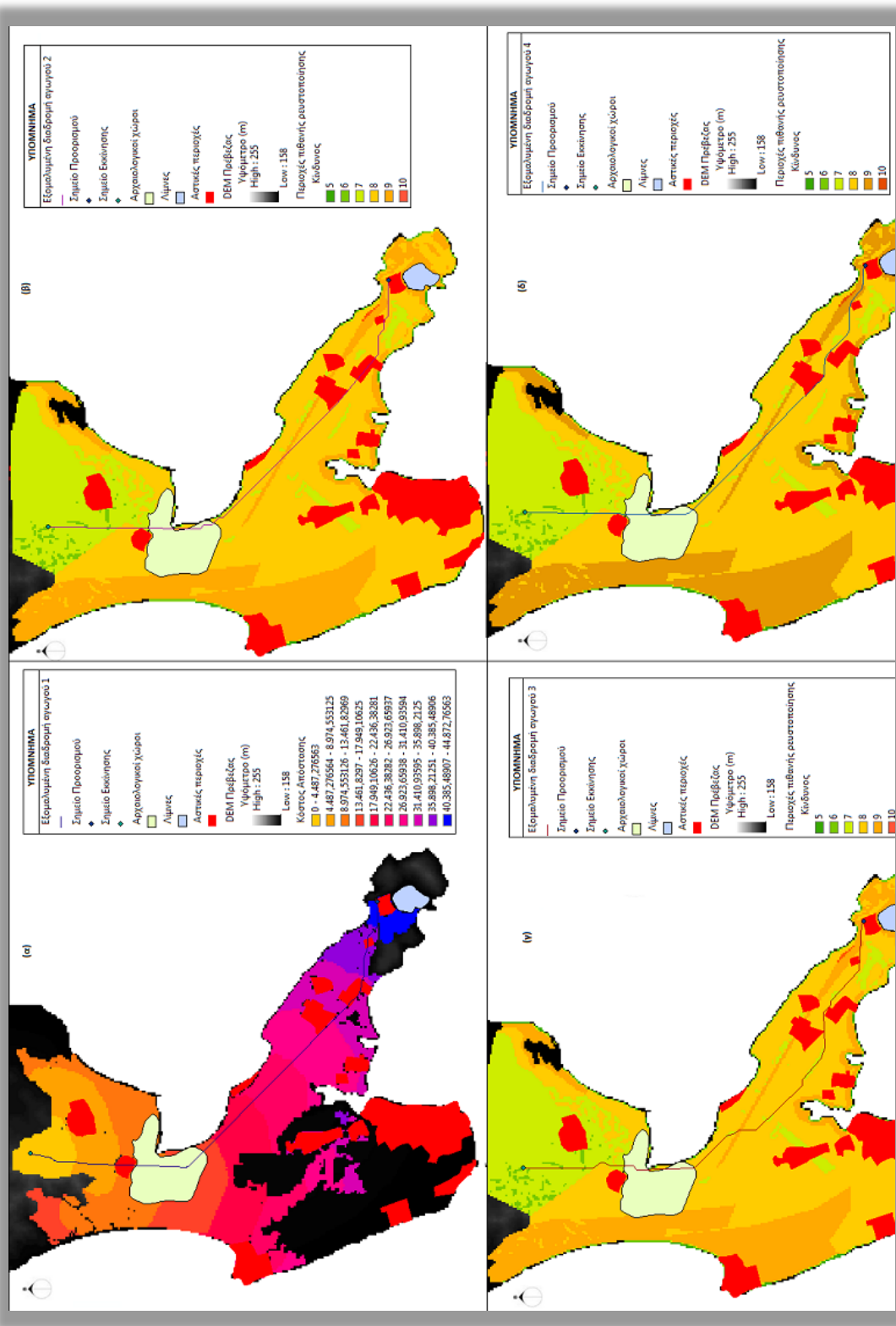
Εικόνα 6-17: Διαγραμματική αναπαράσταση του μοντέλου εξαγωγής της τελικής διαδρομής του αγωγού στην περιοχή μελέτης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

6.3.5 Αποτελέσματα μοντέλου

Ως αποτέλεσμα του παραπάνω μοντέλου, προέκυψε μία τελική εξομαλυμένη διανυσματική διαδρομή του αγωγού που λαμβάνει υπόψη τα προκαθορισθέντα κριτήρια. Επισημαίνεται ότι η χάραξη της τελικής διαδρομής εξαρτήθηκε σημαντικά από τον καθορισμό των βαρών κάθε κριτηρίου. Έχοντας υπόψη ότι το άθροισμα των βαρών πρέπει πάντα να είναι μονάδα (ή 100%), εφαρμόστηκαν διαφορετικές κατανομές βαρών.

Στην Εικόνα 6-18 φαίνονται τέσσερις διαφορετικές χαράξεις της γραμμής του αγωγού, λόγω διαφορετικής κατανομής των βαρών. Στην εικόνα (α) παρουσιάζεται η διαδρομή με ίση κατανομή βαρών στα τέσσερα κριτήρια (βάρος 25% ή 0,25), όπου διέρχεται μέσα από αστικές περιοχές και αρχαιολογικούς χώρους και δεν ακολουθεί την συντομότερη διαδρομή, γεγονός που την καθιστά μη επιθυμητή. Στην εικόνα (β) δίνεται μεγαλύτερο βάρος στην συντομότερη διαδρομή (40% ή 0,4 έναντι περίπου 20% στα υπόλοιπα κριτήρια), όπου παρατηρείται η χάραξη να διέρχεται ξανά μέσα από τις αστικές περιοχές αλλά και να μην λαμβάνει υπόψη της τον αυξημένο κίνδυνο ρευστοποίησης μερικών περιοχών. Στην εικόνα (γ) δίνεται βάρος στην αποφυγή αστικών περιοχών και αρχαιολογικών χώρων, ενώ ταυτόχρονα δίνεται δευτερεύουσα σημασία στον παράγοντα των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης εδάφους και τριτεύουσα στους υπόλοιπους δύο παράγοντες (40% στις αστικές περιοχές και αρχαιολογικούς χώρους, 30% στις περιοχές ρευστοποίησης και 15% στα υπόλοιπα 2 κριτήρια), με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αποφυγή των αστικών και των επικίνδυνων προς εδαφική ρευστοποίηση περιοχών, αλλά να αμελείται σε πολύ μεγάλο βαθμό το κριτήριο της συντομότερης απόστασης. Για αυτό και ο παρών μελετητής κατέληξε στην απόδοση βαρών : 30% στο κριτήριο της μικρότερης απόστασης και στην αποφυγή των πόλεων και 20% στα κριτήρια της ρευστοποίησης και των σεισμικά ασταθών περιοχών πρηνών, με αποτέλεσμα που φαίνεται στην εικόνα (δ) και παρουσιάζει την συντομότερη δυνατή διαδρομή, αποφεύγοντας τις αστικές περιοχές και την πλειονότητα των γεωτεχνικά επικίνδυνων περιοχών. Αυτά που δεν επιτεύχθηκαν ακόμη και με την βελτίωση της χάραξης είναι η αποφυγή διάσχισης όλων των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης καθώς και του αρχαιολογικού χώρου. Για τις λίγες περιπτώσεις διάσχισης αυτών των περιοχών το ενδεχόμενο εφαρμογής μέτρων άμβλυνσης πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Τελικώς, ο μηχανικός ορίζει την σημασία του κάθε κριτηρίου βάσει της δικής του λογικής και των υπαρκτών περιορισμών στην διαδικασία, όπως αυτοί αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 (καθεστώς ιδιοκτησίας γης, κανονιστικές διατάξεις και νομοθεσία, διοικητικές παρεμβάσεις).



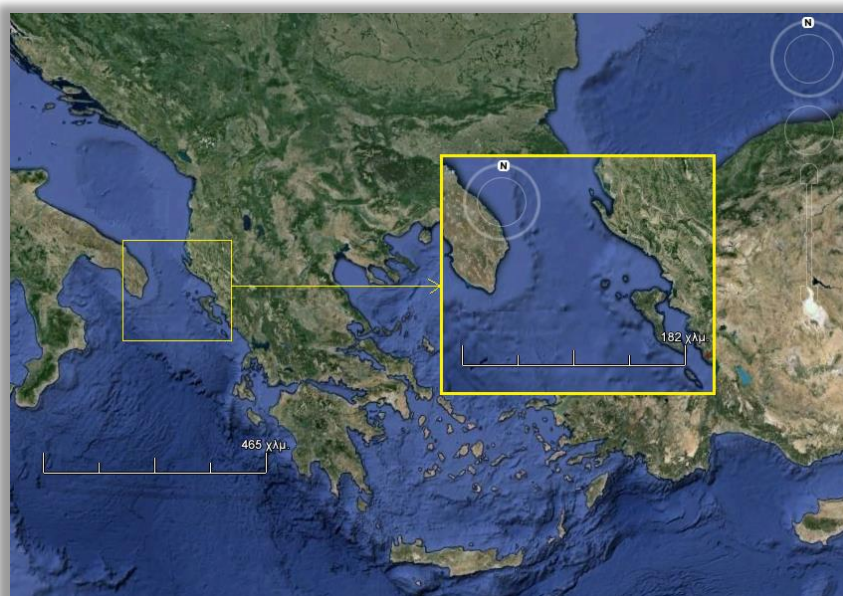
Εικόνα 6-18: Απεικόνιση των τεσσάρων διαφορετικών διαδρομών αγωγού μεταξύ των επιλεχθέντων σημείων εκκίνησης και πέρατος. Η διαφορά έγκειται στην διαφορετική στάθμιση των κριτηρίων. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

6.4 3^η Εφαρμογή : Χάραξη διαδρομής υπεράκτιου αγωγού στην Αδριατική θάλασσα

6.4.1 Γενικό πλαίσιο και περιοχή μελέτης

Στη εφαρμογή, αναγνωρίζοντας την σημασία των υπεράκτιων αγωγών, οι οποίοι συνεχώς και πληθαίνουν ανά τον κόσμο λόγω της ανάγκης συντομότερης και οικονομικότερης μεταφοράς προϊόντων και ανακάλυψης νέων υποθαλάσσιων πηγών (κυρίως υδρογονανθράκων), στόχος αποτέλεσε η προσέγγιση της βέλτιστης χάραξης ενός τμήματος υποθαλάσσιου αγωγού, βάσει των διαθέσιμων δεδομένων.

Η περιοχή που επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης αυτής της εφαρμογής εμφανίζεται στο νότιο τμήμα της Αδριατικής θάλασσας, που αποτελεί τμήμα της Μεσογείου θάλασσας, μεταξύ Ελλάδας και Αλβανίας από την ανατολική πλευρά και Ιταλίας από την δυτική (Εικόνα 6-19). Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε λόγω της ύπαρξης ενός, έστω και περιορισμένου, αριθμού δημόσιων διαθέσιμων δεδομένων προς επεξεργασία.



Εικόνα 6-19: Περιοχή μελέτης στο νότιο τμήμα της Αδριατικής Θάλασσας, μεταξύ Ιταλίας και Αλβανίας. (Πηγή: Google Earth, 2015)

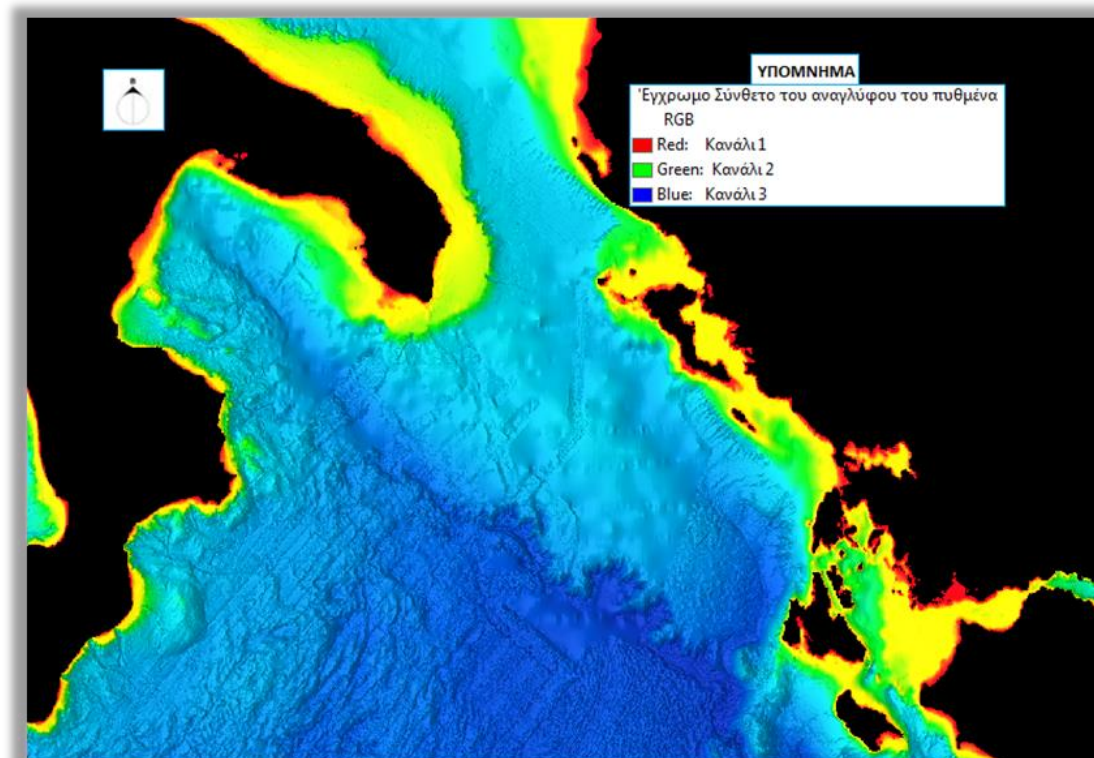
6.4.2 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων

Μετά τον καθορισμό των ορίων της περιοχής μελέτης, ακολούθησε ο ορισμός των απαραίτητων δεδομένων και η συλλογή τους. Τα απαιτούμενα δεδομένα καθορίστηκαν ως εξής:

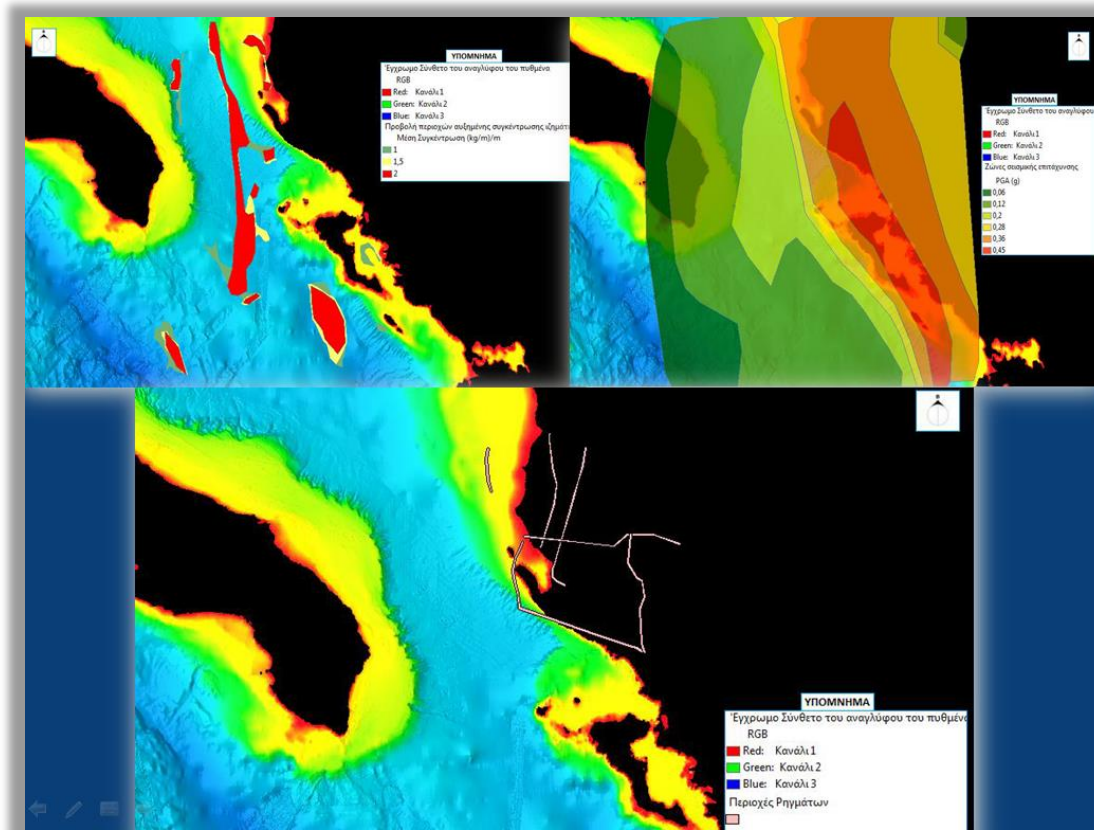
- Τοπογραφικό ανάγλυφο του πυθμένα της Αδριατικής ή ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο εδάφους DEM
- Χάρτης των βασικών ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος
- Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, για την συλλογή πληροφοριών πάνω στις μέσες τιμές των αναπτυσσόμενων σεισμικών επιταχύνσεων στην επιφάνεια του πυθμένα

- Χάρτης απεικόνισης της μέσης συγκέντρωσης καθιζήσεων στην επιφάνεια του πυθμένα ή γεωλογικός χάρτης και εδαφικά χαρακτηριστικά

Τα δεδομένα που τελικά συγκεντρώθηκαν εκ αυτών είναι ένα ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο εδάφους DEM, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-20, (σε αρχείο μορφής geotiff) από το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Θαλάσσιας Παρακολούθησης και Δεδομένων EMODnet (www.portal.emodnet-bathymetry.eu/mean-depth-full-coverage, 2015), ένας χάρτης βασικών ρηγμάτων στην Αδριατική θάλασσα, ένας χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας από την «Εκτίμηση σεισμικών κινδύνων για την Αδριατική» των D.Slejko et al. (1999) με περίοδο επαναφοράς 475 ετών (Εικόνα 6-21) και ένας χάρτης απεικόνισης της μέσης συγκέντρωσης καθιζήσεων στον πυθμένα της θάλασσας, από το Εθνικό Ινστιτούτο Γεωφυσικής και Ηφαιστειολογίας ADRICOSM (www.gnoo.bo.ingv.it/adricosm-star/INGV/quickview.htm, 2003). Το κελί του DEM είχε διαστάσεις 210,959 x 210,959 μέτρα (μικρή χωρική ανάλυση) και σύστημα χωρικής αναφοράς WGS '84 UTM της ζώνης 33N. Όλα τα δεδομένα εκτός του DEM ψηφιοποιήθηκαν και αναφέρθηκαν στο ίδιο σύστημα, ενώ ταυτόχρονα ορίστηκε κάθε ψηφιδωτό θεματικό επίπεδο να έχει τις ίδιες διαστάσεις κελιού με αυτές του βαθυμετρικού μοντέλου.



Εικόνα 6-20: Ψηφιακό βαθυμετρικό μοντέλο της Αδριατικής θάλασσας. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)



Εικόνα 6-21 : Δεδομένα εφαρμογής : Μέση επιφανειακή συγκέντρωση ιζημάτων, ζώνες επιτάχυνσης, ρήγματα. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

Μετά την συλλογή των δεδομένων και αρχική τους επεξεργασία, μέσω του εργαλείου ArcCatalog, δημιουργήθηκε σύνδεση του προγράμματος ArcMap με τον φάκελο προέλευσης τους και ακολούθησε η εισαγωγή τους στην γεωβάση, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση τους. Η επόμενη διαδικασία άντλησε τα δεδομένα από την προαναφερθείσα γεωβάση.

6.4.3 Διαμόρφωση κριτηρίων

Επιθυμώντας να χαραχθεί η διαδρομή του υποθαλάσσιου αγωγού με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο μέσω της εκπονούμενης διαδικασίας, όπως και στην δεύτερη μελέτη περίπτωσης, δημιουργήθηκαν θεματικά επίπεδα το καθένα εκ των οποίων αντιπροσώπευσε ένα κριτήριο στην επιλογή της τελικής διαδρομής. Μέσω της σταθμισμένης υπέρθεσης ορίστηκαν διαφορετικά βάρη σε αυτά τα επίπεδα και προέκυψε ένα τελικό σύνολο δεδομένων σε ψηφιδωτή (raster) μορφή, που απεικόνισε το συνολικό «ποιοτικό κόστος» της διέλευσης της διαδρομής μέσα από κάθε τμήμα της περιοχής. Η τελική χάραξη ορίστηκε από το σύνολο των διαδοχικών κελιών που μεταφράστηκε στο χαμηλότερο «κόστος». Ως βασικά κριτήρια για την εξαγωγή του τελικού σταθμισμένου κόστους διαμορφώθηκαν:

- Η επίτευξη της συντομότερης δυνατής διαδρομής (βάσει του κανόνα της ευθύτητας)
- Η αποφυγή των ενεργών και εν δυνάμει ενεργών ρηγμάτων της περιοχής

- Η αποφυγή των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης του εδαφικού υλικού του πυθμένα

Σε αυτό το σημείο, κρίθηκε απαραίτητο να επισημανθεί η σημαντική απώλεια του κριτηρίου αποφυγής των περιοχών πιθανής υποθαλάσσιας κατολίσθησης. Η απώλεια δεδομένων σε συνδυασμό με την πιο περίπλοκη φύση του προβλήματος υπό της θαλάσσιας επιφανείας από ότι σε χερσαίο έδαφος οδήγησε σε αυτή την αρχικά ανεπιθύμητη απλοποίηση.

Ειδικότερα, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις (submarine landslides) αποτελούν το φαινόμενο μεταφοράς ιζημάτων κατά μήκος του επιπέδου του πυθμένα και προκαλούνται όταν η κατακόρυφα ασκούμενη δύναμη (π.χ. βαρύτητα) ξεπεράσει την διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού του πυθμένα εκκινώντας μετακινήσεις κατά μήκος μίας ή περισσότερων κοίλων ή επίπεδων επιφανειών (www.en.wikipedia.org/wiki/Submarine_landslide, 2015). Η σημαντικότερη διαφορά τους από τις κατολισθήσεις σε χερσαίο έδαφος αποτελεί το γεγονός ότι προκαλούνται από μία σειρά αιτίων, όπως η υπερπίεση πόρων, η ύπαρξη κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, οι ροές εδαφικού υλικού, τα υποθαλάσσια ηφαίστεια, τα υδάτινα ρεύματα και τα παλιρροϊκά κύματα, που αποτελούν σύνθετα φαινόμενα προς μελέτη. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη δεδομένων σχετικά με τα περισσότερα από αυτά τα αίτια για την δημιουργία μίας μεθοδολογίας προσδιορισμού της εμφάνισης τους, πριν την χρησιμοποίησή τους για τον καθορισμό των περιοχών πιθανής εμφάνισης υποβρύχιων κατολισθήσεων.

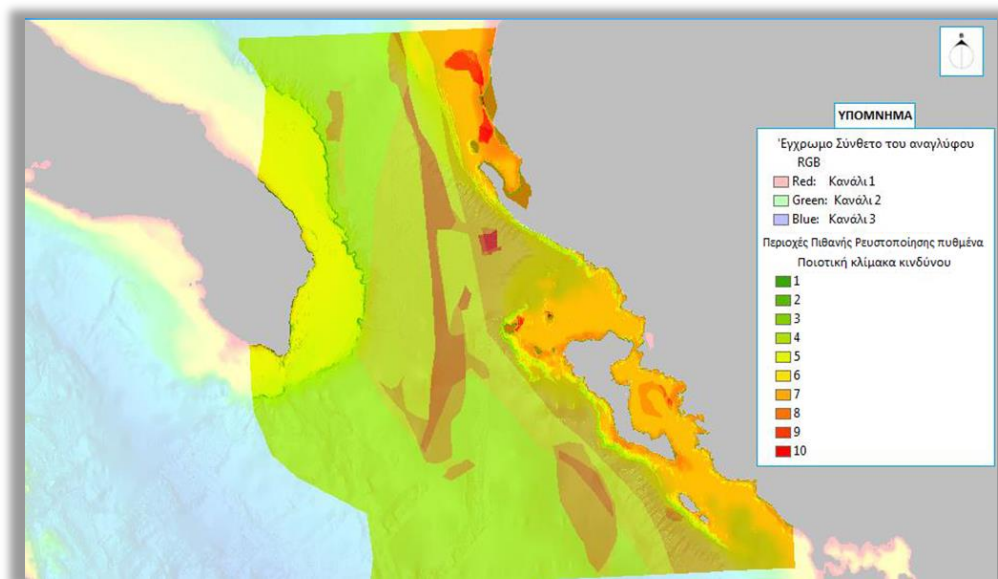
6.4.4 Δημιουργία μοντέλου και εκπονούμενη διαδικασία

Βάσει των προαναφερθέντων κριτηρίων, δημιουργήθηκε άλλο ένα μοντέλο ροής εργασιών στα πλαίσια αυτής της μελέτης περίπτωσης, με το εργαλείο Model Builder του προγράμματος ArcMap. Σε πρώτη φάση, διαμορφώθηκαν κατάλληλα τα δεδομένα για να εισαχθούν στην αλληλουχία εργαλείων, σε δεύτερη φάση παράχθηκαν τα θεματικά επίπεδα των εφαρμοζόμενων κριτηρίων και στην τρίτη και τελευταία φάση ορίστηκε το συνολικό ποιοτικό κόστος και η τελική χάραξη της διαδρομής σε διανυσματική μορφή. Επισημαίνεται, σε αυτό το σημείο, ότι οι ενδιάμεσοι χάρτες όλων των εφαρμογών παρατίθενται στο Παράρτημα στο τέλος της παρούσας εργασίας. Τα βήματα της διαδικασίας, όπως διαφαίνονται μέσω του διαγράμματος ροής του μοντέλου της Εικόνας 6-24, ήταν τα εξής:

- Ένωση του θεματικού επιπέδου του πολυγώνου που όρισε την θαλάσσια περιοχή μελέτης με εκείνο της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων (εργαλείο Union), έτσι ώστε να παραχθεί θεματικό επίπεδο που θα καλύπτει όλη την περιοχή μελέτης αλλά θα περιέχει και τα δεδομένα της μέσης συγκέντρωσης.
- Μετατροπή του νέου θεματικού επιπέδου σε μορφή ψηφιδωτού, με το εργαλείο Polygon to Raster και επαναταξινόμηση των δεδομένων του με το εργαλείο Reclassify.
- Τομή των ζωνών σεισμικής επιτάχυνσης με το πολύγωνο της θαλάσσιας περιοχής (εργαλείο Intersect), για τον ίδιο σκοπό που εφαρμόστηκε και η

προηγούμενη ένωση. Ακολούθησε η μετατροπή του αποτελέσματος της τομής σε μορφή ψηφιδωτού με το εργαλείο Polygon to Raster και επαναταξινόμηση των δεδομένων με το εργαλείο Reclassify.

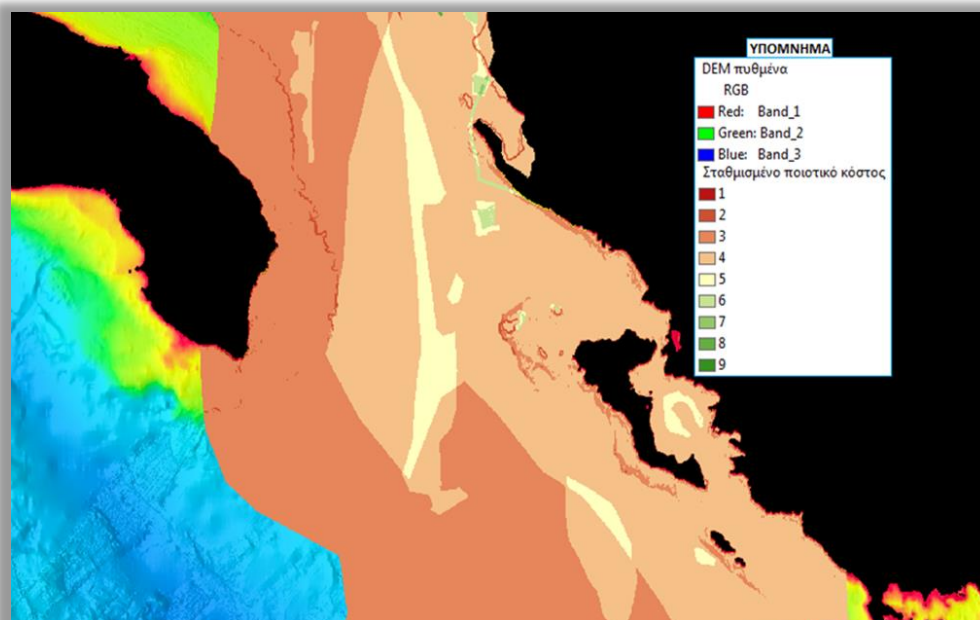
- Υπολογισμός της κλίσης του εδάφους του πυθμένα από το δοσμένο DEM μέσω του εργαλείου Slope και επαναταξινόμηση των τελικών δεδομένων με το εργαλείο Reclassify.
- Ακολούθησε η σταθμισμένη υπέρθεση των θεματικών επιπέδων του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων στον πυθμένα, του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού της κλίσης του πυθμένα και του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού των σεισμικών επιταχύνσεων με το εργαλείο Weighted Overlay. Αποτέλεσμα αυτής της ισοβαρούς υπέρθεσης (δεν υπήρχαν δεδομένα διαφοροποίησης από την ισοβαρή ανάλυση) ήταν οι περιοχές πιθανής ρευστοποίησης του εδαφικού υλικού του πυθμένα (Εικόνα 6-22). Αυτό προέκυψε από την λογική υπόθεση ότι οι περιοχές του πυθμένα που παρουσιάζουν ταυτόχρονα υψηλή συγκέντρωση ιζημάτων, υψηλή τιμή μέσης σεισμικής επιτάχυνσης και έχουν πολύ ήπια κλίση μπορούν να οριστούν ως περιοχές που ενδέχεται να υποκύψουν σε ρευστοποίηση.



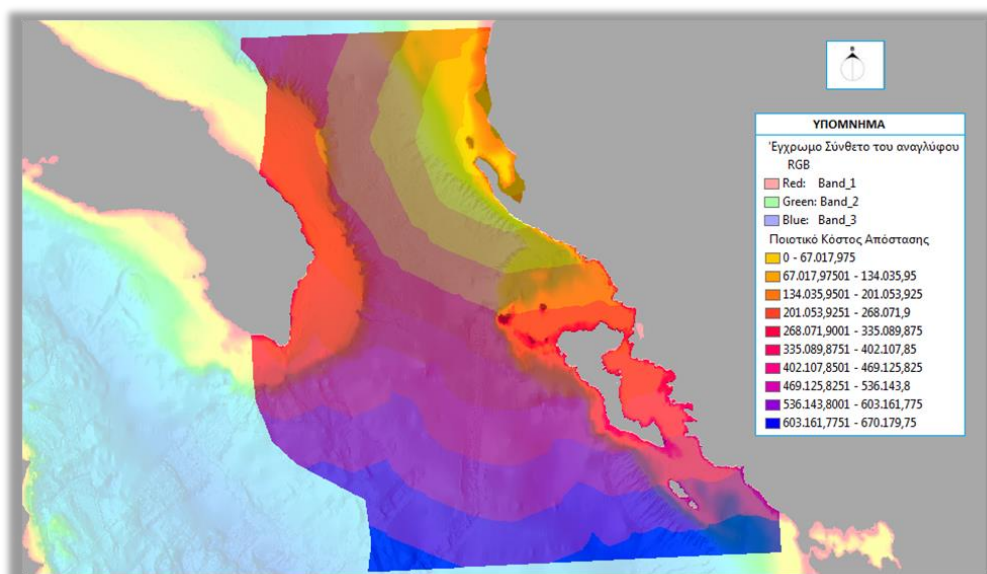
Εικόνα 6-22: Περιοχές πιθανής ρευστοποίησης πυθμένα (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

- Έπειτα, μετατράπηκαν τα ρήγματα της περιοχής από πολύγωνα σε ψηφιδωτή μορφή με το εργαλείο Polygon to Raster, τα δεδομένα της οποίας επαναταξινομήθηκαν με το εργαλείο Reclassify. Τονίζεται ότι τα ρήγματα αναπαραστάθηκαν ως πολύγωνα μικρού πλάτους (100 μέτρων) σε σύγκριση με την διάσταση του ενός κελιού (210,959 μέτρα), έτσι ώστε να μπορούν να παρασταθούν γραφικά και να χρησιμοποιηθούν στη μετέπειτα τελική υπέρθεση των θεματικών επιπέδων – κριτηρίων.
- Υλοποιήθηκε η τελική σταθμισμένη υπέρθεση των κριτηρίων (Εικόνα 6-23) με το εργαλείο Weighted Overlay. Ως κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν τα θεματικά επίπεδα του επαναταξινομημένου ψηφιδωτού των ρηγμάτων και των

περιοχών πιθανής ρευστοποίησης, στα οποία ορίστηκαν αντίστοιχα βάρη για κάθε χαρακτηριστική τιμή τους. Το κριτήριο της συντομότερης διαδρομής συμπεριλήφθηκε τμηματικά σε αυτή την εφαρμογή, στα επόμενα εργαλεία Cost Distance και Cost Path, των οποίων οι διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί προηγουμένως στο ίδιο κεφάλαιο.



- Υπολογίστηκε το κόστος απόστασης με το εργαλείο Cost Distance, εισάγοντας το σημείο εκκίνησης και το αποτέλεσμα της τελικής σταθμισμένης υπέρθεσης. Τα σημεία εκκίνησης και πέρατος καθορίστηκαν σε θέση των ακτογραμμών της Αλβανίας και της Ιταλίας αντίστοιχα, έτσι ώστε να διερευνηθούν οι δυνατότητες αποφυγής των ρηγμάτων και των περιοχών ρευστοποίησης.



Εικόνα 6-23 : Ψηφιδωτό κόστους απόστασης από σημείο εκκίνησης. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

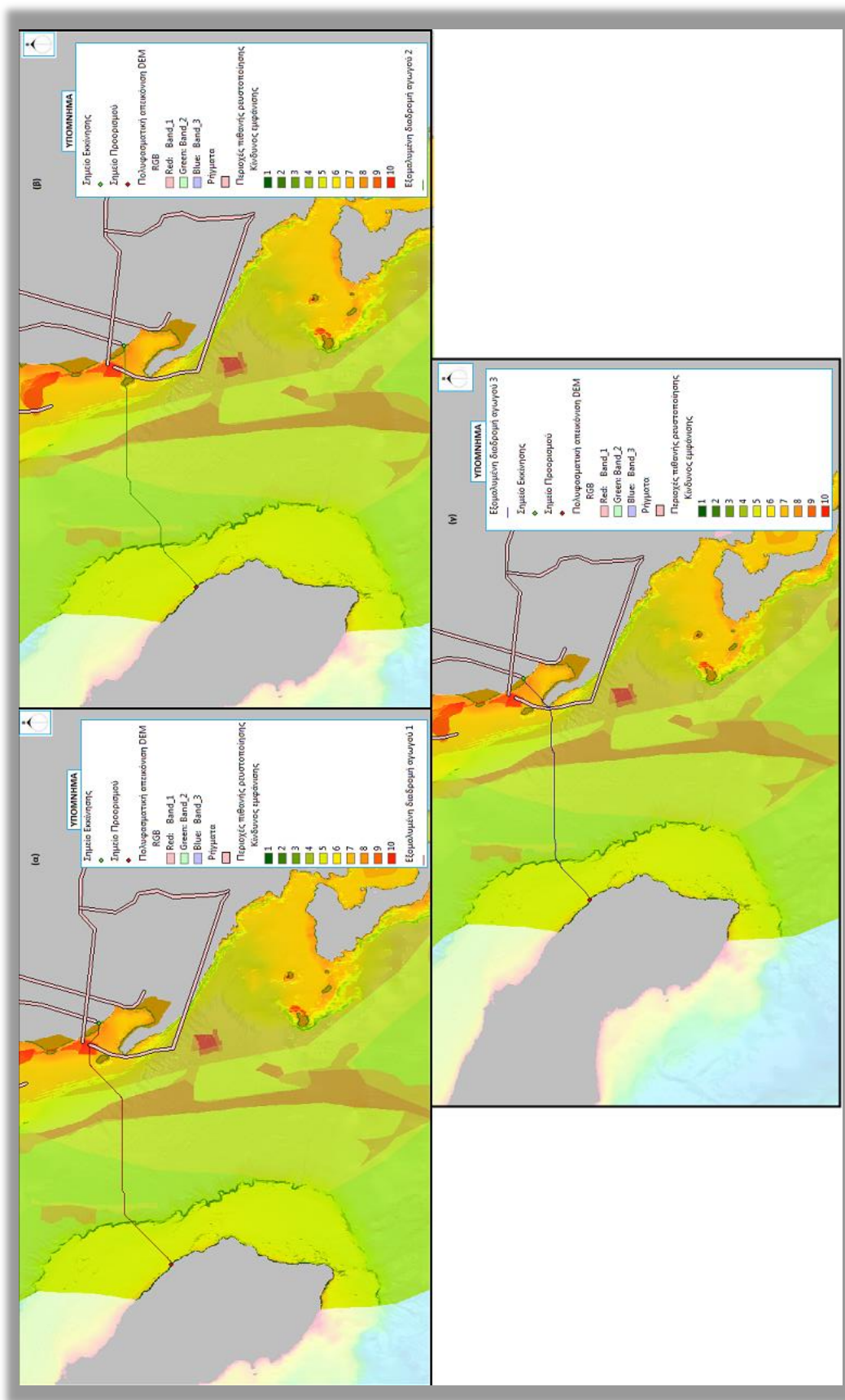
- Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Cost Path, στο οποίο εισάχθηκαν το σημείο πέρατος και το κόστος απόστασης και από το οποίο παράχθηκε η τελική διαδρομή του αγωγού σε μορφή raster.
- Η τελική διαδρομή μετατράπηκε σε διανυσματική με το εργαλείο Raster to Polyline και εξομαλύνθηκε από το εργαλείο Smooth Line σύμφωνα με τον αλγόριθμο ΡΑΕΚ (όπως και στην δεύτερη μελέτη περίπτωσης) και μέγιστο επιτρεπόμενο όριο απόκλισης από τις κορυφές 300 μέτρα (λόγω των πολύ μεγάλων διαστάσεων του βασικού κελιού του DEM).

Το μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή της προηγουμένως περιγραφείσας διαδικασίας απεικονίζεται στην Εικόνα 6-24, όπου ως μπλε ελλείψεις συμβολίζονται τα εισαγόμενα δεδομένα (input), ως πράσινες ελλείψεις τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output) και ως κίτρινα ορθογώνια τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία.

6.4.5 Αποτελέσματα μοντέλου

Ως αποτέλεσμα του παραπάνω μοντέλου προέκυψε μία τελική εξομαλυμένη διανυσματική διαδρομή του υπεράκτιου αγωγού, βάσει των ορισθέντων κριτηρίων. Όπως, όμως, και στην δεύτερη μελέτη περίπτωσης, εκτελέστηκε με διαφορετικές τιμές στην σταθμισμένη υπέρθεση, με στόχο την εξαγωγή εναλλακτικών διαδρομών προς αξιολόγηση.

Στην Εικόνα 6-25 φαίνονται τρεις διαφορετικές χαράξεις του αγωγού με διαφορετικές κατανομές βαρών. Στην εικόνα (α) το μεγαλύτερο βάρος αντιστοιχίζεται με το θεματικό επίπεδο των ρηγμάτων και την αποφυγή τους (70% ρήγματα - 30% περιοχές ρευστοποίησης), γεγονός που επιτυγχάνεται, χωρίς όμως να πληρούνται τα κριτήρια της συντομότερης διαδρομής και της αποφυγής των περιοχών ρευστοποίησης. Στην εικόνα (β) το μεγαλύτερο βάρος δίνεται στο θεματικό επίπεδο των περιοχών πιθανής ρευστοποίησης (70% ρευστοποίηση - 30% ρήγματα) και, συνεπώς, στην αποφυγή τους, στο οποίο αποτέλεσμα, όμως, παρατηρείται η διαδρομή να διέρχεται από την περιοχή του ρήματος και να μην πληρεί, πάλι, το κριτήριο της συντομότερης διαδρομής. Στην εικόνα (γ) εφαρμόστηκε η στάθμιση βάσει της άποψης του παρόντος μηχανικού, η οποία πήρε την μορφή 60% για τις περιοχές ρευστοποίησης και 40% για τα ρήγματα και είχε ως αποτέλεσμα την σύντομη διέλευση από το ρήγμα και μία βελτιωμένη γραμμική συμπεριφορά σε ορισμένα σημεία, καθιστώντας την πιο αποδεκτή από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Οι παραπάνω προκύπτουσες εναλλακτικές δρομολογήσεις του αγωγού υπογραμμίζουν αυτό που είχαν επισημάνει και οι εναλλακτικές διαδρομές της προηγούμενης μελέτης περίπτωσης. Το γεγονός, δηλαδή, ότι ο μηχανικός βάσει των δικών του κριτηρίων μπορεί να καθορίσει το τελικό αποτέλεσμα με μία διαφορετική στάθμιση.



Εικόνα 6-25: Οι τρεις εναλλακτικές χαράξεις της διαδρομής του υποθαλάσσιου αγωγού, όπως αναλύθηκαν προηγουμένως. (Πηγή: Προσωπικό Αρχείο, 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα και αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν τα βασικά είδη των γεωκινδύνων που παρουσιάζονται, κυρίως, υπό σεισμικές συνθήκες και αφορούν την χάραξη χερσαίων και, δευτερευόντως, υπεράκτιων αγωγών μεγάλου μήκους. Αναπτύχθηκαν μέθοδοι προσδιορισμού των ορίων των περιοχών πιθανής εμφάνισης τους, εντός μίας περιοχής μελέτης, μέσω του λογισμικού ArcMap και παρουσιάστηκε το πώς μπορούν να επηρεάσουν την τελική χάραξη ενός αγωγού μέσω τριών εφαρμογών, όπως αυτές αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 6. Ο προσδιορισμός αυτών των περιοχών έγινε βάσει της εφαρμογής μίας αυθαίρετης αύξουσας κλίμακας ποιοτικού κόστους, της οποίας οι τιμές αντιστοιχήθηκαν με την αύξηση του δυνητικά εμφανιζόμενου κινδύνου, όπως προέκυψε από την σταθμισμένη υπέρθεση των επιλεχθέντων κριτηρίων ανάλυσης. Ουσιαστικά, έγινε η προσπάθεια ανάπτυξης ενός εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων κατά την χάραξη ενός αγωγού, με βασική εστίαση στην αποφυγή των αναλυθέντων περιοχών.

Βασική αποτελεί, ωστόσο, η αποτίμηση της εργασίας βάσει του ποσοστού εκπλήρωσης των αρχικών στόχων της. Κατά την αρχική θεώρηση της ιδέας του εργαλείου, υπενθυμίζεται ότι οι προς επίτευξη στόχοι ήταν : ο ορισμός και η αναγνώριση των περιοχών πιθανής εκδήλωσης των γεωκινδύνων υπό σεισμικές συνθήκες και για τις δύο περιπτώσεις αγωγών, η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση του κινδύνου σε κάθε μία εκ αυτών των περιοχών, η βελτιστοποίηση της διαχείρισης και επεξεργασίας των απαραίτητων συλλεχθέντων πληροφοριών – δεδομένων κατά την διαδικασία της χάραξης και, τελικώς, η επιτάχυνση της διαδικασίας επιλογής της χαρακτηρισμένης διαδρομής του αγωγού μέσω εργαλείου λήψης αποφάσεων. Όλοι οι παραπάνω υποστόχοι βρίσκονται υπό τον βασικό στόχο της εργασίας, ο οποίος ορίστηκε ως η βελτιστοποίηση της χάραξης ενός αγωγού βάσει ενός εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στο θέμα των γεωκινδύνων υπό σεισμικές συνθήκες.

Όσον αφορά, λοιπόν, τους επιθυμητούς στόχους, εκπληρώθηκαν όλοι σε ικανοποιητικό επίπεδο, εκτός της ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου των σεισμικά επικίνδυνων περιοχών. Ειδικότερα, μέσω της ανάπτυξης του εργαλείου σε περιβάλλον ArcMap, επετεύχθησαν η αποτελεσματική αποθήκευση, διαχείριση αλλά και επεξεργασία του διαθέσιμου όγκου πληροφοριών σε βάσεις δεδομένων, καθώς και η μοντελοποίηση της χάραξης αγωγού που αποφεύγει αυτόματα τις σεισμικά επικίνδυνες περιοχές, βάσει μίας προκαθορισμένης από τον χρήστη ποιοτικής κλίμακας. Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής της μεθοδολογίας προέκυψε η τελική

διανυσματική χάραξη του αγωγού, για την οποία προσφέρεται η δυνατότητα εξαγωγής εναλλακτικών διαδρομών για αξιολόγηση, εντός ενός σύντομου διαστήματος εκτέλεσης του εργαλείου (5-10 λεπτών). Επισημαίνεται ότι οι εναλλακτικές διαδρομές προέκυψαν βάσει διαφορετικών σταθμίσεων των κριτηρίων και των επιμέρους τιμών τους, οι οποίες διαφοροποιούνται για κάθε μελετητή βάσει της κριτικής θεώρησης του. Πέραν αυτών, όμως, η έλλειψη των απαραίτητων λεπτομερών δεδομένων, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας, και της απαραίτητης μαθηματικής διαδικασίας οδήγησε στην αδυναμία ορισμού μίας ποσοτικής κλίμακας εκτίμησης του κινδύνου. Επιπρόσθετα, δεν υπήρξαν διαθέσιμα δεδομένα και για την σύγκριση τους με τα τελικά αποτελέσματα, αφήνοντας ένα κενό στην επιβεβαίωση της ορθότητας τους.

Εκτός των στόχων που δεν επετεύχθησαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, η μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής, όπως αναπτύχθηκε βάσει του διαθέσιμου λογισμικού και δεδομένων, παρουσίασε κάποιους περιορισμούς λειτουργικής φύσης. Αυτοί πρέπει να επισημανθούν και είναι οι εξής:

- Απαίτηση μεγάλου όγκου δεδομένων, καθιστώντας δυσκολότερη την εύρεση όλων των προαπαιτούμενων
- Άμεση σύνδεση ακρίβειας αποτελεσμάτων με την ακρίβεια των εισαγόμενων δεδομένων, με κύριο παράδειγμα τις δοθείσες διαστάσεις κελιού των υψομετρικών μοντέλων εδάφους
- Απλοποιημένη θεώρηση των βασικών γεωκινδύνων, λόγω έλλειψης δεδομένων και κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων προς εφαρμογή
- Απώλεια πληρότητας, λόγω απώλειας δεδομένων για την συμπερίληψη και άλλων γνωστών γεωκινδύνων στην διαδικασία
- Απώλεια ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου και του ρίσκου

7.2 Μελλοντικές προεκτάσεις μεθοδολογίας και εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για την υποστήριξη στην λήψη αποφάσεων κατά την χάραξη ενός αγωγού μεγάλου μήκους αναδεικνύουν την μεγάλη σημασία της ενεργούς συμμετοχής των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων στην διαδικασία. Σε αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα εργασία θέτει τις βάσεις ενός καινοτόμου εργαλείου υποστήριξης λήψης αποφάσεων κατά αυτή την διαδικασία, που αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της χάραξης. Ειδικότερα, παρουσιάστηκε ένα πρώιμο στάδιο του, με σκοπό την διερεύνηση των προσφερόμενων δυνατοτήτων προσάρτησης και επεξεργασίας δεδομένων σε ένα Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα. Η διερεύνηση αυτή αποκάλυψε ένα μέρος των μελλοντικών προοπτικών του, όπως αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Σύνδεση εργαλείου και παγκόσμιου συστήματος θέσης (GPS) : Ουσιαστικά, το αναπτυχθέν εργαλείο μπορεί να συνδεθεί με σταθμούς μέτρησης συντεταγμένων, οι οποίοι θα τον τροφοδοτούν με την απαραίτητη χωρική πληροφορία.

- Σύνδεση με συστήματα επιτόπιων μετρήσεων και εγκαταστάσεις παρακολούθησης : Μπορεί να λαμβάνει απευθείας μετρήσεις από κλισιόμετρα, επιταχυνσιογράφους και αισθητήρες παραμόρφωσης, με σκοπό τον καθορισμό των αιτίων μίας φθοράς της κατασκευής, αλλά και του τελικού της αποτελέσματος σε αυτήν.
- Σύνθεση ενός «ευφυούς» εργαλείου : Μετά την συλλογή του απαραίτητου μεγάλου όγκου δεδομένων και την επεξεργασία τους, μπορεί να εφαρμοστεί μία αυτόματη μεθοδολογία εκτίμησης της ποσοτικής κλίμακας του ρίσκου. Ειδικότερα, η εκτίμηση του ρίσκου θα συμπεριελάμβανε την πιθανότητα εμφάνισης των βασικών γεωκινδύνων και τις πιθανές επιπτώσεις τους στην κατασκευή του αγωγού, ως επιδεκτικότητα του σε θραύση (V). Η τελική εκτίμηση θα μπορούσε να δίνεται από τον τύπο $R = H(x) V(x) C$ (Rizkalla, 2008), όπου C η εκτίμηση των επιπτώσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

1. Aki, K. (1984), “Asperities, Barriers, Characteristic Earthquakes and Strong Motion Prediction”, *Journal of Geophysical Research*, Volume 89 (No. B7), p.5867-5872
2. Bolt, B. και Oliveira, C. (1989), “Rotational Components of surface ground motion”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Volume 18 (No.4)
3. Gazetas, G., Kallou, P. and Psarropoulos, P. (2001), “Topography and Soil Effects in the Ms 5.9 Parnitha (Athens) Earthquake: The Case of Adames”, *Natural Hazards*, Volume 27, p. 133-169
4. Slejko, D., et al. (1999), “Seismic hazard assessment for Adria”, *Annals of Geophysics*, Volume 42 (No.6), p. 1085 – 1105
5. Zhang, B. και Papageorgiou, A. (1996). “Simulation of the Response of the Marina District Basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta Earthquake”, *BSSA*, Vol. 86 (No. 5), p. 1382-1400.

Άρθρα σε πρακτικά συνεδρίων

1. Nyman, D. , et al. (2008), “Mitigating Geohazards for International Pipeline Projects : Challenges and Lessons Learned”, *Proceedings of 7th International Pipeline Conference 2008*, September 29 – October 3 2008, Calgary, Alberta, Canada
2. Psarropoulos, P. , et al. (2012), “Designing Pipelines in Areas with Moderate or High Seismic Risk: Geohazard Assessment beyond EC8 Provisions”, *Proceedings of 7th Pipeline Technology Conference*, 28 – 30 April 2012, Hannover Congress Centrum, Hannover, Germany
3. Χαραλάμπους, Σ. και Σακελλαρίου, Μ. (2005), “Εκτίμηση της ευστάθειας φυσικών και τεχνητών πρικών σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Έμφαση σε έργα Οδοποιίας”, *Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Οδοποιίας*, 18-20 Μαΐου 2005, Βόλος, Ελλάδα

Βιβλία

1. Barnes, G. (2005), *Εδαφομηχανική : Αρχές και Εφαρμογές*, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος
2. Burrough, P. (1986), *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assesment*, Oxford: Oxford University Press
3. Dean, R. (2010), *Offshore geotechnical engineering : Principles and practice*, London: Thomas Telford Limited
4. Forouzan, B. και Mosharraf, F. (2010), *Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υπολογιστών*, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος
5. Hager, B. και O'Connell, R. (1978), *Subduction zone dip angles and flow driven by plate motion*, Amsterdam: Elsevier V.B.
6. Kramer, S. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Upper Saddle River: Prentice Hall
7. Longley, P., et al. (2010), *Συστήματα και Επιστήμη Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)*, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος
8. Moness, R. (2008), *Pipeline Geo – Environmental Design and Geohazard Management*, New York: ASME
9. O' Rourke, M. και Liu, J. (2012), *Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines*, New York: MCEER
10. Ortigao, J., et al. (2004), *Handbook of Slope Stabilization*, New York: Springer – Verlag Berlin Heidelberg GmbH
11. Robinson, A., et al. (2002), *Στοιχεία Χαρτογραφίας*, Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
12. Wahba, G. (1990), *Spline Models for Observational Data*, Philadelphia: SIAM
13. Αργιαλάς, Δ. (1998), *Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση*, Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
14. Κουτσόπουλος, Κ. (2009), *Πραγματεία Ανάλυσης Χώρου – Τόμος Α' : Θεωρία*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου
15. Σακελλαρίου, Μ. (2008), *Γεωτεχνική Μηχανική*, Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Ηλεκτρονικά Άρθρα

1. AdricoSm STAR (2006), “Adriatic Sediment Transport”, http://gnoo.bo.ingv.it/adricosm-star/INGV/quick_view.htm, [πρόσβαση: 27/9/2015]
2. Albrecht, J. (2015), “Geographic data models”, <http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lectures/lecture05/concepts/03%20-%20Geographic%20data%20models.html>, [πρόσβαση: 30/5/2015]
3. ArcGIS Resource Center (2012), “ArcGIS Help Library”, http://help.arcgis.com/EN/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Welcome_to_the_ArcGIS_Help_Library, [πρόσβαση: 25/5/2015]
4. ArcGIS Resources (2014), “Understanding Euclidean distance analysis”, http://resources.arcgis.com/EN/HELP/MAIN/10.2/index.html#/Understanding_Euclidean_distance_analysis/009z0000001t000000/, [πρόσβαση: 23/9/2015]
5. EMODnet (2015), “Portal for Bathymetry: Bathymetry Viewing and Download service”, <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/mean-depth-full-coverage>, [πρόσβαση 27/9/2015]
6. IPLOCA (2015), “Pipeline Route Selection Process”, <http://wiki.iploca.com/display/rtswiki/Appendix+5.1.1+Pipeline+Route+Selection+Process#Appendix5.1.1-PipelineRouteSelectionProcess-5.1.1.2BasisforEngineering>, [πρόσβαση: 20/8/2015]
7. Marathon Data Systems (2008), “Προϊόντα ArcGIS”, <http://www.marathondata.gr/arcgis.htm>, [πρόσβαση: 20/6/2015]
8. Nuclead (2015), “Lead Caulk Applications”, <http://www.nuclead.com/leadcaulkapps.html>, [πρόσβαση: 15/9/2015]
9. Robinson, A., et al. (2014), “Overview of Programming Languages for GIS”, <https://www.e-education.psu.edu/geog583/node/67>, [πρόσβαση: 25/6/2015]
10. Tubb, R. (2015), “Pipeline & Gas Journal’s 2015 Worldwide Construction Report”, <http://www.pipelineandgasjournal.com/pipeline-gas-journal%E2%80%99s-2015-worldwide-construction-report?page=2>, [πρόσβαση: 8/10/2015]
11. United States Geological Survey (USGS) (2004), “Earthquake Hazards Program”, <http://earthquake.usgs.gov/learn/.php>, [πρόσβαση: 8/10/2015]

12. Wermac (2015), “Welding Joints - Butt welded & Fillet welded Joints”, http://www.wermac.org/others/welding_basic-welding-joints_butt-weld_fillet-weld.html, [πρόσβαση: 15/9/2015]
13. Wiki GIS (2011), “ArcToolbox”, <http://wiki.gis.com/wiki/index.php/ArcToolbox>, [πρόσβαση: 20/9/2015]
14. Wikipedia Project (2013), “Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών”, https://el.wikipedia.org/wiki/Σύστημα_Γεωγραφικών_Πληροφοριών, [πρόσβαση: 30/5/2015]
15. Wikipedia Project (2015), “1989 Loma Prieta earthquake”, https://en.wikipedia.org/wiki/1989_Loma_Prieta_earthquake, [πρόσβαση: 13/9/2015]
16. Wikipedia Project (2015), “Geohazards”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Geohazard>, [πρόσβαση: 10/6/2015]
17. Wikipedia Project (2015), “Jenks natural breaks optimization”, https://en.wikipedia.org/wiki/Jenks_natural_breaks_optimization, [πρόσβαση: 22/9/2015]
18. Wikipedia Project (2015), “Γη”, <https://el.wikipedia.org/wiki/Γη>, [πρόσβαση: 5/7/2015]
19. Wikipedia Project (2015), “Νομός Θεσπρωτίας”, https://el.wikipedia.org/wiki/Νομός_Θεσπρωτίας, [πρόσβαση: 22/9/2015]
20. Wikipedia Project (2015), “Pipeline Transport”, https://en.wikipedia.org/wiki/Pipeline_transport, [πρόσβαση: 5/9/2015]
21. Wikipedia Project (2015), “SQL: Structured Query Language”, <https://en.wikipedia.org/wiki/SQL>, [πρόσβαση: 29/9/2015]
22. Wikipedia Project (2015), “Submarine Landslides”, https://en.wikipedia.org/wiki/Submarine_landslide, [πρόσβαση: 1/10/2015]
23. Wikipedia Project (2015), “Θεωρία Γράφων”, https://el.wikipedia.org/wiki/Θεωρία_γράφων, [πρόσβαση: 29/9/2015]
24. Wikipedia Project (2015), “Τεκτονικές πλάκες”, https://el.wikipedia.org/wiki/Τεκτονικές_πλάκες, [πρόσβαση: 13/9/2015]

25. Σωμαράς, Χ. (2013), “Τι είναι τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών”, <http://xsomaras.somweb.gr/?p=469>, [πρόσβαση: 15/9/2015]
26. Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. (2007), “Παγκόσμια γεωδυναμική”, http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/mth1063e/pdf/10th_Chapter.pdf, [πρόσβαση: 13/9/2015]
27. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος Ε.Κ.Π.Α. (2007), “Ρήγματα Μετασχηματισμού και Οριζόντια Ολίσθησης”, <http://labtect.geol.uoa.gr/pages/pdfs/Dynamic/7-Ch5.pdf>, [πρόσβαση: 16/9/2015]
28. Χαϊδεμενόπουλος, Γ. (2010), “Εισαγωγή στην τεχνολογία και επιστήμη των συγκολλήσεων”, http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/L1_Εισαγωγή.pdf, [πρόσβαση: 15/9/2015]