



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

ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΧΑΡΑΞΗ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΩΝ
ΣΕ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΥΣ ΜΕΣΩ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΥΓΙΑΝΟΣ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

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

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

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαρίνο Καττή και τον κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο που ως επιβλέποντες της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνέβαλαν σημαντικά στην εκπόνηση της.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο για την κρίσιμη συνεισφορά και καθοδήγησή του σε κάθε βήμα της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης, και τον Νικόλαο Μακράκη για την άμεση ανταπόκρισή του προς την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος προέκυψε στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ανιδιοτελή υποστήριξή τους. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω την Βίβιαν για την συνεχή υποστήριξή της.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή γίνεται η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου, το οποίο θα παρέχει την δυνατότητα αυτοματοποίησης της βέλτιστης χάραξης ενός υποθαλάσσιου αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη την γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης αλλά και τον γεωκίνδυνο των ρηγμάτων. Ο γεωκίνδυνος των ρηγμάτων λαμβάνεται υπόψη μέσω της παραμόρφωσης που μπορεί να επιφέρει στον αγωγό σε περίπτωση διασταύρωσής τους. Για την ανάπτυξη του εργαλείου έγινε χρήση του λογισμικού ABAQUS, για να γίνουν προσομοιώσεις και να γίνει υπολογισμός παραμορφώσεων στον αγωγό, του λογισμικού QGIS για την διαχείριση των γεωχωρικών δεδομένων και τέλος, της TensorFlow για την κατασκευή και εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου που δρα ως συνδεδετικός κρίκος ανάμεσα στα δύο προαναφερμένα λογισμικά. Στην συνέχεια με χρήση της rython 3 και διάφορων βιβλιοθηκών της, όπως η GDAL, και του QGIS έγινε ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για τον υπολογισμό της βέλτιστης χάραξης, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα βαθυμετρίας, κλίσεων και εδαφικών χαρακτηριστικών. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου έγινε ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου, το οποίο διαχειρίζεται όλα τα διαθέσιμα εργαλεία και δεδομένα, ενώ ταυτόχρονα διαθέτει ενσωματωμένες μεθόδους για την σωστή εκτέλεση του αλγορίθμου και την αποτελεσματική διασύνδεση των διαθέσιμων εργαλείων. Μετά την ανάπτυξη του λογισμικού και την επιτυχημένη διασύνδεσή των εργαλείων, έγιναν πολλαπλές δοκιμές του εργαλείου σε διάφορα σενάρια και έγινε βαθμονόμηση των βαρών και των παραμέτρων του αλγορίθμου, ενώ ταυτόχρονα έγινε διόρθωση διάφορων μικρών σφαλμάτων του εργαλείου (debugging). Τέλος, έγιναν δοκιμές σε συγκεκριμένα σενάρια για τον έλεγχο των δυνατοτήτων του υπολογιστικού εργαλείου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα εργαλείο που αυτοματοποιεί σε μεγάλο βαθμό την διαδικασία χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών.

ABSTRACT

The purpose of this Thesis is the development of an automated tool, that gives the user the ability to easily calculate the best possible routing for an offshore pipeline connecting two specific points, while considering the possible geohazard present in the area of interest. The submarine geohazard of faults is taken into consideration in the form of the deformation that they can impose on the pipeline in case of contact. To develop the software in question, ABAQUS was used to run simulations and calculate the deformation of the pipeline in different scenarios and gather the relevant data, and a GIS software (QGIS) was used to manage geospatial data. After, a neural network was built and trained with the forementioned data, using TensorFlow, to act as a link between ABAQUS and QGIS and further automate the process. Then, an algorithm to calculate the best possible routing, while taking bathymetry, slope data and ground characteristics, into consideration was created with the use of python 3 and a variety of available libraries, like GDAL, and the GIS software. Moreover, a tool was developed to execute the algorithm and manage all available geospatial data. The tool provides the user with some support tools, like a GUI. The developed software also achieves limited interoperability between the GIS and the finite element software. After the development, the software was tested with various scenarios and the algorithm was calibrated to achieve better results. In the end, the software was tested and debugged in different scenarios to check its ability to calculate optimal routes. The result is a software that can automatically calculate optimal routes for offshore pipelines.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	4
ABSTRACT	6
1. Εισαγωγή	10
2. Θαλάσσιοι γεωκίνδυνοι & υποθαλάσσιοι αγωγοί	12
2.1 Θαλάσσιοι γεωκίνδυνοι	12
2.1.1 Γενικά στοιχεία	12
2.1.2 Σεισμοί	13
2.1.3 Ρήγματα	13
2.1.4 Αστάθειες υποθαλάσσιων πρηνών & Γεωμορφολογία πυθμένα	15
2.1.5 Πιθανές συνέπειες γεωκινδύνων	16
2.2 Υποθαλάσσιοι αγωγοί	16
2.2.1 Γενικά για υποθαλάσσιους αγωγούς.....	16
2.2.2 Τύποι υποθαλάσσιων αγωγών	17
2.2.3 Εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών	18
2.2.4 Σημαντικοί υποθαλάσσιοι αγωγοί & δίκτυα παγκοσμίως.....	20
3. Υπολογιστικά και προγραμματιστικά εργαλεία	22
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 ABAQUS	22
3.3 Python & βιβλιοθήκες	23
3.3.1 Python	23
3.3.2 Βιβλιοθήκες	24
3.3.3 Jupyter Notebook	27
3.4 Σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών(GIS) & εργαλεία	27
3.4.1 QGIS	27
3.4.2 Περιγραφή QGIS	28
3.4.3 Graphical modeler & QGIS Processing Executor	29
3.4.4 GRASS GIS	29
3.4.5 Σημαντικά εργαλεία του QGIS & του GRASS GIS που χρησιμοποιήθηκαν	30
3.5 TensorFlow & νευρωνικά δίκτυα	33
3.5.1 Γενικά για την TensorFlow	33
3.5.2 Keras API	33
3.5.3 Optimizers.....	34
3.5.4 Loss functions & Metrics	37
3.5.5 Activation functions	38
3.5.6 TensorBoard.....	38
3.5.7 Διαδικασία εκπαίδευσης (feedforward, backpropagation).....	39
3.6 Visual Studio Code	40
4. Διασύνδεση εργαλείων, διαδικασία βέλτιστης χάραξης	40
4.1 Εισαγωγή	40
4.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Παπαθωμά, 2021)	41
4.3 Κατασκευή νευρωνικού δικτύου	43
4.4 Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου με βάση το μοντέλο ABAQUS	44

4.4.1 Μετασχηματισμός δεδομένων	44
4.4.2 Επιλογή συνάρτησης απωλειών και μετρητικής συνάρτησης.....	47
4.4.3 Εκπαίδευση και βέλτιστες παράμετροι εκπαίδευσης	47
4.4.4 Τελική εκπαίδευση και έλεγχος.....	52
4.5 Προετοιμασία δεδομένων εισόδου	52
4.6 Κατασκευή γραφικής διεπαφής χρήστη GUI	54
4.6.1 Γενικά για το GUI	54
4.6.2 Grid	54
4.6.3 Τελική διεπαφή.....	55
4.7 Μοντέλα QGIS.....	56
4.8 Python scripts.....	58
4.8.1 Γενικά	58
4.9 Λειτουργία εργαλείου.....	60
4.9.1 Προαπαιτούμενα για την χρήση του εργαλείου	60
4.9.2 Βοηθητικές επιλογές.....	61
4.9.3 Βασικός αλγόριθμος του εργαλείου	62
4.9.4 Αναλυτικό διάγραμμα ροής αλγορίθμου	65
4.9.5 Εξήγηση λογικής αλγορίθμου	66
5. Εφαρμογές	68
5.1 Εισαγωγή	68
5.2 Εφαρμογή Κρήτη - Κύπρος	68
6. Γενικά συμπεράσματα & προτάσεις	74
7.Βιβλιογραφία	76

1. Εισαγωγή

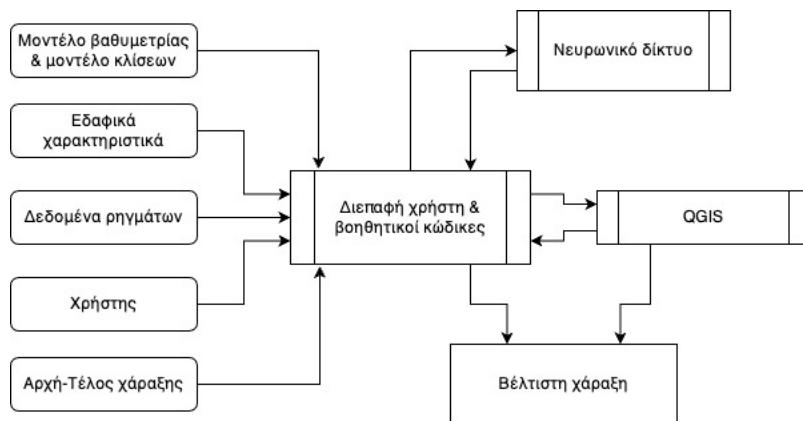
Είναι προφανές ότι η κατασκευή διάφορων θαλάσσιων έργων, όπως οι πλατφόρμες εξορύξεων, η ανάγκη εύρεσης και εξόρυξης υδρογονανθράκων στην θάλασσα και οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, έχουν οδηγήσει σε σκέψεις για κατασκευές νέων υποθαλάσσιων αγωγών και μάλιστα σε περιοχές που έχουν περίπλοκα γεωμορφολογικά φαινόμενα και πολλούς γεωκινδύνους. Επιπλέον, στη σύγχρονη εποχή με την ταχεία ανάπτυξη των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών και των τεχνολογιών μηχανικής μάθησης, παρουσιάζεται γρήγορη ανάπτυξη διάφορων λογισμικών υποστηρικτικής μορφής για τον σχεδιασμό διάφορων έργων.

Τα έργα μεγάλου μήκους, όπως οι υποθαλάσσιοι αγωγοί, αποτελούν έργα για τα οποία είναι αναγκαία και κρίσιμη η διεξοδική μελέτη για την προστασία από κινδύνους. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην μελέτη τέτοιων έργων είναι οι γεωκίνδυνοι και η γεωμορφολογία των περιοχών τις οποίες διασχίζουν. Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό αυτών των έργων απαιτείται πολύ σωστή διαχείριση των πιθανών ρίσκων, καθώς πέρα από το υψηλό κόστος σε περίπτωση ζημιάς, υπάρχει και μεγάλος κίνδυνος για περιβαλλοντικές καταστροφές.

Στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται προσπάθεια προστασίας των αγωγών από τα σεισμικά ρήγματα και τα απότομα πρηνή. Στην περίπτωση των ρηγμάτων, γίνεται προσπάθεια πρόβλεψης της παραμόρφωσης του αγωγού σε περίπτωση διάρρηξης του ρήγματος, δηλαδή γίνεται προσπάθεια να προβλεφθεί το αν ο αγωγός θα αντέξει σε περίπτωση διάρρηξης του ρήγματος. Όσον αφορά τα πρηνή γίνεται προσπάθεια αποφυγής περιοχών με απότομες κλίσεις, και προτίμηση περιοχών με ομαλότερες κλίσεις, το πόσο επιθετική θα είναι αυτή η αντιμετώπιση αφήνεται στην ευχέρεια του χρήστη, υπό την μορφή βαρών στην διαδικασία weighted overlay, κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Σε γενικές γραμμές, καθοριστικό ρόλο για την μελέτη αυτών των έργων έχει η διαδρομή που θα ακολουθήσουν.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε ανάπτυξη ενός αυτόματου εργαλείου, το οποίο με την χρήση και διασύνδεση μεθόδων και προγραμμάτων, όπως το ABAQUS και το QGIS, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη, να υπολογίσει την βέλτιστη χάραξη, για τα διαθέσιμα δεδομένα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, δίνεται έμφαση και παρουσιάζονται εφαρμογές για υποθαλάσσιους αγωγούς σε περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, έγινε κατασκευή και εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, το οποίο δρα ως συνδεδεμένος κρίκος ανάμεσα στο ABAQUS και το QGIS.

Στην συνέχεια, έγινε ανάπτυξη ενός αλγορίθμου, με βάση τον οποίο θα γίνεται η διαχείριση των γεωχωρικών δεδομένων, και η βέλτιστη χάραξη του αγωγού. Ο αλγόριθμος αυτός χωρίζει την περιοχή μελέτης σε μικρές υποπεριοχές ανάλογα με την ανάλυση των δεδομένων βαθυμετρίας και κλίσεων. Έπειτα, χρησιμοποιώντας δεδομένα για τα ρήγματα, τα εδαφικά χαρακτηριστικά στην περιοχή μελέτης και το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, εξάγει προβλέψεις σχετικά με την παραμόρφωση του αγωγού σε περίπτωση διάρρηξης για κάθε ρήγμα στην περιοχή μελέτης και για όλα τα εδαφικά χαρακτηριστικά στις περιοχές των ρηγμάτων. Με βάση αυτές τις προβλέψεις και την μέγιστη, δοσμένη από τον χρήστη, αξονική παραμόρφωση, γίνεται έλεγχος για την δυνατότητα ή μη, διασταύρωσης του αγωγού με κάθε ρήγμα στην περιοχή μελέτης. Τέλος, ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του όλα τα δεδομένα, καθώς και βάρη σχετικά με την βαρύτητα της αποφυγής κλίσεων, για να δημιουργήσει ένα raster θεωρητικού κόστους για την προσπέλαση κάθε υποπεριοχής από τον αγωγό. Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής γίνεται χρήση ενός Plugin του QGIS για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής με ελάχιστο θεωρητικό συνολικό κόστος. Για την εκτέλεση όλων αυτών των διεργασιών απαιτείται η σωστή συνεργασία πολλών εργαλείων, όπως το QGIS, η GDAL και διάφορων άλλων βιβλιοθηκών της Python. Επίσης, για την πρακτικότερη χρήση του εργαλείου αναπτύχθηκε μια διεπαφή χρήστη, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να ορίσει κάποια βάρη για την αλγόριθμο και να χρησιμοποιήσει ορισμένα βοηθητικά εργαλεία.



Σχήμα 1: Λειτουργία του λογισμικού

2. Θαλάσσιοι γεωκίνδυνοι & υποθαλάσσιοι αγωγοί

2.1 Θαλάσσιοι γεωκίνδυνοι

2.1.1 Γενικά στοιχεία

Θαλάσσιοι γεωκίνδυνοι ορίζονται ως, οι κίνδυνοι που σχετίζονται με γεωτεχνικά ή γεωλογικά χαρακτηριστικά και διεργασίες κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, οι οποίες απειλούν την σωστή κατασκευή ή λειτουργία μιας θαλάσσιας κατασκευής. Οι γεωκίνδυνοι μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο εκδήλωσής τους. Αρχικά, υπάρχει η κατηγορία των επικίνδυνων γεγονότων, στην οποία εντάσσονται τα ασυνήθιστα και επεισοδιακά γεγονότα (Randolph & Gourvenec, 2011), όπως οι σεισμοί, οι κατολισθήσεις, και οι απότομες ροές ρευμάτων. Στην δεύτερη κατηγορία εντάσσονται οι επικίνδυνες εδαφικές καταστάσεις, οι συγκεκριμένοι γεωκίνδυνοι εξελίσσονται με αργούς ρυθμούς και σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, σε αυτούς τους γεωκινδύνους συμπεριλαμβάνονται οι αργές εδαφικές κινήσεις και οι διάφορες αργές γεωλογικές διαδικασίες.

Είναι επίσης εφικτό γεωκίνδυνοι να δημιουργηθούν από τον ανθρώπινο παράγοντα (Dean, 2010) με μορφή παλαιών έργων ή κατασκευών αλλά και υπό την μορφή ναυαγίων και χαμένου εξοπλισμού, όπως π.χ. ελαττωματικές βόμβες, ή φορτία ναυαγίων. Η κάθε περαιτέρω χρήση του

πυθμένα για θεμελίωση κατασκευών προκαλεί διαταραχές σε αυτόν, επιπλέον ο πυθμένας χρησιμοποιείται από πλοία για την αγκύρωσή τους.

2.1.2 Σεισμοί

Οι σεισμοί είναι εκτονώσεις συσσωρευμένων τάσεων σε επιφάνειες ρηγμάτων, είτε στον μανδύα της γης, είτε στον φλοιό. Οι εκτονώσεις αυτές έχουν την μορφή δονήσεων οι οποίες ταξιδεύουν στο έδαφος και είναι ανάλογες των συσσωρευμένων τάσεων που εκτονώθηκαν. Το φαινόμενο μπορεί να εκδηλωθεί είτε ηπειρωτικά, είτε στον πυθμένα της θάλασσας, είτε σε αρκετά μεγάλα βάθη στην θάλασσα. Οι σεισμοί αποτελούν μεγάλο κίνδυνο καθώς είναι ακαριαίοι, απρόβλεπτοι και ταυτόχρονα μπορούν να προκαλέσουν διάφορους άλλους γεωκινδύνους, οι οποίοι μπορούν να αποτελέσουν μεγαλύτερη απειλή για κάποιο τεχνικό έργο από τον ίδιο τον σεισμό. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι ο σεισμός μέσω των σεισμικών κυμάτων και των ρηγμάτων προκαλεί επίσης παραμόρφωση του εδάφους, εξ αιτίας αυτού είναι πιθανό να υπάρξουν ζημιές σε θεμελιώσεις και παραμορφώσεις σε κατασκευές. Οι σεισμοί με επίκεντρα στην θάλασσα είναι συνήθως δυσκολότερα να εντοπισθούν με ακρίβεια, καθώς τα κύρια δίκτυα σεισμικής παρακολούθησης βρίσκονται στην στεριά.

2.1.3 Ρήγματα

Ένας από τους κύριους γεωκινδύνους που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία είναι αυτός των ρηγμάτων. Ρήγμα δημιουργείται όταν συσσωρευμένες τάσεις στους γεωλογικούς σχηματισμούς μιας περιοχής ξεπεράσουν το όριο αντοχής των αντίστοιχων σχηματισμών πετρωμάτων και γίνεται θραύση τους. Με την θραύση αυτή παρατηρείται η δημιουργία δύο τέρμαχων ή μπλοκ τα οποία μετακινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο. Η επιφάνεια ανάμεσα στα δύο μπλοκ ονομάζεται ρήγμα.

Τα ρήγματα κατηγοριοποιούνται συνήθως ανάλογα με την μεταξύ μετακίνηση των δύο τέρμαχων τους. Το υπερκείμενο τέρμαχος της επιφάνειας του ρήγματος ονομάζεται άνω τέρμαχος και το υποκείμενο,

κάτω τέμαχος. Με βάση τα παραπάνω διακρίνονται τρεις κατηγορίες ρηγμάτων:

1. Κανονικά ρήγματα

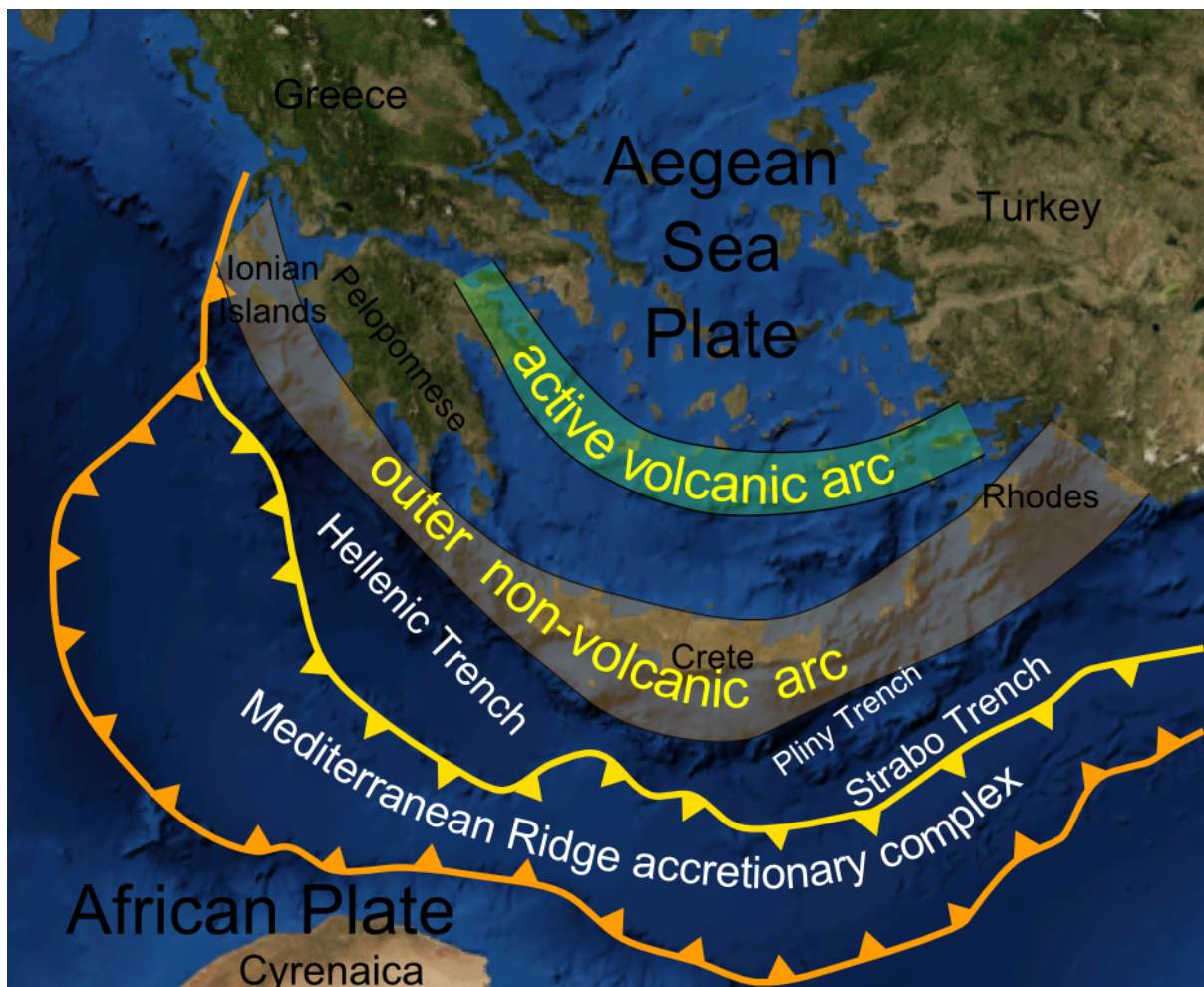
Ένα ρήγμα χαρακτηρίζεται κανονικό όταν το υπερκείμενο τέμαχος ανυψώνεται σε σχέση με το υποκείμενο.

2. Ανάστροφα ρήγματα

Ένα ρήγμα ονομάζεται ανάστροφο όταν το υπερκείμενο τέμαχος βυθίζεται σε σχέση με το υποκείμενο.

3. Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

Ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ονομάζονται τα ρήγματα στα οποία τα δύο τέμαχοι παρουσιάζουν κινήσεις πάνω στον άξονα που διασχίζει κατά μήκος το ρήγμα.



Εικόνα 1: Ελληνικό τόξο και East Mediterranean Ridge (Πηγή: Wikipedia)

2.1.4 Αστάθειες υποθαλάσσιων πρανών & Γεωμορφολογία πυθμένα

Οι αστάθειες πρανών αποτελούν έναν πολύ δύσκολα ανιχνεύσιμο γεωκίνδυνο, γιατί πολλές φορές ο κίνδυνος δεν είναι προφανής. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος που επιφέρουν οι αστάθειες πρανών είναι αυτός της κατολίσθησης, η οποία με την σειρά της μπορεί να πυροδοτήσει ακόμα περισσότερες κατολισθήσεις και άλλους γεωκινδύνους. Τέτοιες αστάθειες μπορεί να εξελιχθούν ακόμα και σε πρανή με πολύ μικρές κλίσεις, έχουν σημειωθεί αστοχίες σε πρανή με κλίση ακόμα και 0.5°. Επιπλέον, οι αστάθειες πρανών σε συνδυασμό με άλλες διεργασίες και γεγονότα όπως ο σεισμός, η αποβολή αερίων και οι αλλαγές των θαλάσσιων ρευμάτων, μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε κατολισθήσεις.

Ο πυθμένας της θάλασσας, όπως και το έδαφος στην στεριά, έχει πλούσιο και μεταβαλλόμενο ανάγλυφο. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι η γεωμορφολογία του πυθμένα της θάλασσας είναι πολύ πιο γρήγορα μεταβαλλόμενη, κυρίως λόγω των ρευμάτων, της χαμηλής αντοχής των ιζηματογενών στρώσεων και των διάφορων γεωλογικών διεργασιών που λαμβάνουν μέρος στον πυθμένα της θάλασσας. Ένα παράδειγμα γεωκινδύνου βασισμένου στην γεωμορφολογία του πυθμένα είναι οι περιοχές κάτω από τις οποίες υπάρχουν σχηματισμοί αλάτων (Randolph & Gourvenec, 2011). Οι σχηματισμοί αλάτων χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές αντοχές και από υψηλή κινητικότητα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνησή τους όταν αυξάνεται η πίεση που δέχονται, πράγμα που προκαλεί διάφορες παραμορφώσεις στα ανώτερα στρώματα του πυθμένα και ότι τυχαίνει να βρίσκεται πάνω σε αυτές. Ακόμα ένα παράδειγμα τέτοιων γεωκινδύνων είναι τα αποθέματα ένυδρων αερίων, τα οποία στην φυσική τους ήρεμη κατάσταση αποτελούν στερεούς σχηματισμούς, αλλά με διάφορες αλλαγές σε πίεση ή θερμοκρασία μπορούν να μετατραπούν σε υγρά και αέρια, γεγονός το οποίο προκαλεί την απότομη μείωση των αντοχών των στρωμάτων του πυθμένα στα οποία αυτά βρίσκονται ενώ ταυτόχρονα προκαλούνται παραμορφώσεις καθώς στην αέρια και υγροί μορφή τους καταλαμβάνουν μεγαλύτερο.

2.1.5 Πιθανές συνέπειες γεωκινδύνων

Σε γενικές γραμμές, οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι συμπεριλαμβάνουν την κινητοποίηση του ίδιου του πυθμένα ή στρωμάτων κάτω από αυτόν. (Randolph & Gourvenec, 2011). Τα ιζήματα που κινητοποιούνται στις περιπτώσεις αυτές δύνανται να προκαλέσουν πρόβλημα σε τεχνικά έργα. Ο όγκος της κινητοποιημένης μάζας μπορεί να ποικίλει από μερικά κυβικά μέτρα μέχρι μερικές χιλιάδες κυβικά χιλιόμετρα. Επιπλέον, εξ αιτίας των περίπλοκων μηχανισμών των υποθαλάσσιων γεωκινδύνων υπάρχει πάντα η πιθανότητα αλυσιδωτής εκδήλωσης γεωκινδύνων όπου ο ένας θα προκαλεί το έναυσμα για την εκδήλωση του επόμενου. Για παράδειγμα, είναι πιθανόν από την εκτόνωση των τάσεων ενός ρήγματος να προκληθούν σεισμικές δονήσεις οι οποίες με την σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν μια κατολίσθηση σε ένα ασταθές πρανές ή την ρευστοποίηση του πυθμένα. Τέτοιες διεργασίες αποτελούν πιθανούς κινδύνους για οποιοδήποτε υπεράκτιο τεχνικό έργο και λόγω της πολυπλοκότητας τους, και του μεγάλου αριθμού τους είναι συνήθως δύσκολο να αποφευχθούν όλοι, ως εκ τούτου είναι κομβικής σημασίας σε κάθε μελέτη τεχνικού έργου να γίνεται σωστή διαχείριση του ρίσκου σε περίπτωση διασταύρωσης με κάποιον γεωκίνδυνο. Η διαχείριση αυτών των ρίσκων έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στις μελέτες υποθαλάσσιων αγωγών, καθώς πρέπει σε μόνιμη βάση να αποφασίζεται ποια είναι η βέλτιστη διαδρομή για τον αγωγό ανάλογα με τους κινδύνους και το κόστος κατασκευής και συντήρησης.

2.2 Υποθαλάσσιοι αγωγοί

2.2.1 Γενικά για υποθαλάσσιους αγωγούς

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί ραγδαία αύξηση στην κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών και ιδιαίτερα αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτό συνέβη κυρίως λόγω της αυξημένης ζήτησης ενέργειας που συνεπάγεται αυξημένη ζήτηση υδρογονανθράκων. Επιπλέον, ζωτικής σημασίας για το ενεργειακό τοπίο αποδείχθηκε πως ήταν η εύρεση και αξιοποίηση κοιτασμάτων φυσικού αερίου και

πετρελαίου εκτός της ξηράς. Όταν εντοπίστηκαν τα πρώτα υπεράκτια κοιτάσματα, πέρα από το πρόβλημα της εξόρυξής τους έπρεπε να λυθεί και το πρόβλημα της αποτελεσματικής μεταφοράς τους στην στεριά. Σε αυτό το σημείο άρχισε να γίνεται χρήση υποθαλάσσιων αγωγών. Από τότε οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου διαθέτουν κρίσιμο ρόλο για τις ενεργειακές ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο. Ένα ακόμα πρόβλημα που έχει λυθεί με την χρήση υποθαλάσσιων αγωγών είναι η μεταφορά καθαρού νερού αλλά και υγρών αποβλήτων. Όποια και αν είναι η χρήση τους είναι σίγουρο πως έχουν, και θα συνεχίσουν να έχουν, σημαντικό ρόλο ως ενεργειακές υποδομές.

2.2.2 Τύποι υποθαλάσσιων αγωγών

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το τι μεταφέρουν, σε ποιο κομμάτι του δικτύου βρίσκονται, αλλά και ανάλογα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τρεις από τις σημαντικότερες λειτουργίες των υποθαλάσσιων αγωγών είναι η μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού, οι αγωγοί όμως που μεταφέρουν τα παραπάνω υγρά διαφέρουν σε τεχνικό επίπεδο, καθώς τα παραπάνω υγρά έχουν και διαφορετικές φυσικές ιδιότητες αλλά ταυτόχρονα μεταφέρονται σε διαφορετικές πιέσεις και καταστάσεις. Για παράδειγμα, το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε πολύ υψηλότερες πιέσεις από αυτές που μεταφέρεται το νερό.

Ένας ακόμα τρόπος διαφοροποίησης των αγωγών είναι με βάση το υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί, και με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά όμως σημαντικότερο ρόλο για την συμπεριφορά τους σε δυναμικές φορτίσεις έχουν οι συνδέσεις των επί μέρους τμημάτων των αγωγών. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των συνδέσεων αυτών οι αγωγοί μπορούν να διαφοροποιηθούν σε 4 κύριες κατηγορίες (O'Rourke & Liu, 2012). Η πρώτη κατηγορία έχει ως βασικό χαρακτηριστικό το γεγονός ότι η αξονική και περιστροφική σκληρότητα του αγωγού στα σημεία σύνδεσης είναι σε ανάλογο επίπεδο με αυτή που

έχει ο αγωγός σε συνεχές κομμάτι του, οι συγκεκριμένοι αγωγοί θεωρούνται συνεχείς αγωγοί. Αυτοί οι αγωγοί παρουσιάζουν την καλύτερη γενικά συμπεριφορά σε δυναμικές φορτίσεις συγκριτικά με τις άλλες κατηγορίες. Η δεύτερη κατηγορία αγωγών χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλότερη σκληρότητα στις συνδέσεις συγκριτικά με την σκληρότητα στα συνεχή τμήματα των αγωγών. Αυτοί οι αγωγοί χαρακτηρίζονται ως κατακερματισμένοι (segmented) και έχουν χειρότερη συμπεριφορά σε δυναμικές φορτίσεις από τους συνεχείς αγωγούς, καθώς τείνουν να παρουσιάζουν βλάβες στις συνδέσεις.

Τέλος οι αγωγοί κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την χρήση τους στις ενεργειακές υποδομές. Σε πρώτη φάση συναντώνται οι εντός πεδίου αγωγοί οι οποίοι διαθέτουν βοηθητικό ρόλο για την διαδικασία της εξόρυξης και της προετοιμασίας για μεταφορά, συνήθως μεταφέρουν μίξη πετρελαίου αερίου αλλά και νερού και ονομάζονται και γραμμές ροής ή γραμμές τροφοδοσίας. Σε δεύτερη φάση εντοπίζονται οι αγωγοί εξαγωγής των οποίων η χρήση βρίσκεται στην μεταφορά πετρελαίου ή αερίου εκτός του πεδίου εξόρυξης προς την ξηρά για περαιτέρω επεξεργασία και διύλιση, χωρίζονται σε αγωγούς μιας φάσης, εάν μεταφέρουν μόνο πετρέλαιο ή αέριο, και σε αγωγούς πολλαπλών φάσεων εάν μεταφέρουν και τα δύο. Τέλος, υπάρχουν οι αγωγοί μεταφοράς οι οποίοι αναλαμβάνουν την μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου ή φυσικού αερίου συνήθως από μια ακτή σε μια άλλη.

2.2.3 Εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών

Για την εγκατάσταση των υποθαλάσσιων αγωγών διακρίνονται συνήθως 3 διαφορετικές μέθοδοι, η κάθε μια με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Αρχικά η πιο συνηθισμένη μέθοδος εγκατάστασης υποθαλάσσιων αγωγών είναι η S-lay η οποία χαρακτηρίζεται από σχετικά γρήγορες ταχύτητες εγκατάστασης και χρησιμοποιείται σε βάθη έως 2500 μέτρα και για αγωγούς διαμέτρου 10-30 ιντσών. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα

της μεθόδου αυτής είναι ότι το βάθος εγκατάστασης περιορίζεται από την αντοχή του σκάφους σε τάσεις. Για την εγκατάσταση με αυτή την μέθοδο απαιτείται η χρήση ενός σκάφους τύπου S-lay, το οποίο αποτελεί στην ουσία ένα πλωτό εργοστάσιο σωληνώσεων καθώς πάνω του γίνεται η κατασκευή του αγωγού πριν αυτός καταλήξει στην θέση εγκατάστασής του. Το σκάφος S-lay απαρτίζεται από 6 κύρια κομμάτια, το γερανό μεταφοράς αγωγών, την αποθήκη αγωγών, το εργοστάσιο συνδέσεων, την γραμμή main firing line, τους εντατήρες και τέλος το stinger. Πιο αναλυτικά η διαδικασία εγκατάστασης αγωγών με χρήση της μεθόδους S-lay έχει ως εξής:

1. Μεταφορά αγωγού στο σκάφος
2. Προσωρινή αποθήκευση στο σκάφος
3. Προετοιμασία συνδέσεων
4. Ευθυγράμμιση αγωγών
5. Σύνδεση αγωγών
6. Δοκιμές συνδέσεων
7. Εισαγωγή στους εντατήρες
8. Εφαρμογή επιπλέον προστατευτικών στρώσεων
9. Προώθηση του αγωγού στην θάλασσα με χρήση του stinger για τον έλεγχο των κλίσεων κατά την κάθοδο του αγωγού.

Δεύτερη μέθοδος εγκατάστασης αγωγών είναι η J-lay η οποία σε αντίθεση με την S-lay που η κατασκευή του αγωγού γίνεται κατά μήκος του σκάφους, η κατασκευή γίνεται ουσιαστικά εξολοκλήρου σε σχεδόν κατακόρυφη ράμπα. Αυτό έχει ως σημαντικό μειονέκτημα το γεγονός ότι οι κατασκευές είναι αρκετά πιο χρονοβόρες καθιστώντας την μέθοδο αυτή ως την πιο αργή. Δεύτερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ρηχά ύδατα. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων η χρήση αυτής της μεθόδου περιορίζεται σε ύδατα βάθους τέτοιου που καθιστούν αδύνατη την χρήση της μεθόδου S-lay.

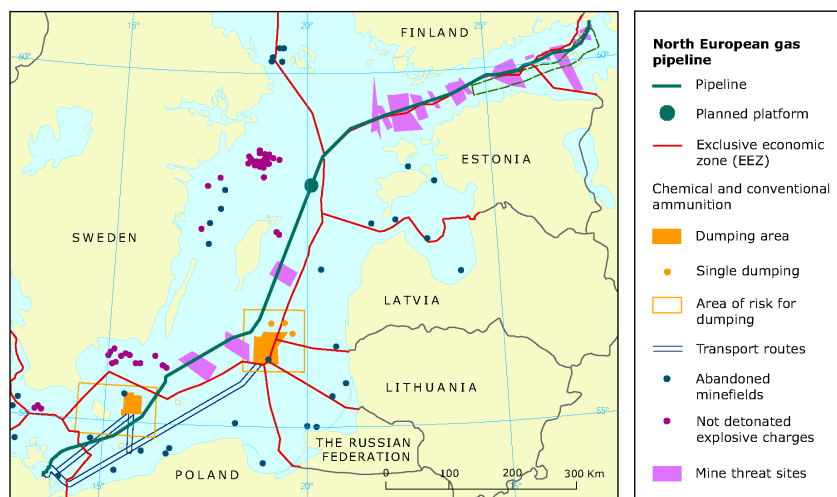
Τέλος, υπάρχει και η μέθοδος Reel-lay κατά την οποία ο αγωγός είναι προκατασκευασμένος από την στεριά ή από άλλη εγκατάσταση και είναι αποθηκευμένος σε καρούλια. Το γεγονός ότι ο αγωγός είναι προκατασκευασμένος σημαίνει ότι η μέθοδος αυτή είναι η πιο γρήγορη

αλλά ταυτόχρονα περιορίζεται αρκετά από το μέγεθος του αγωγού που μπορεί να διαχειριστεί.

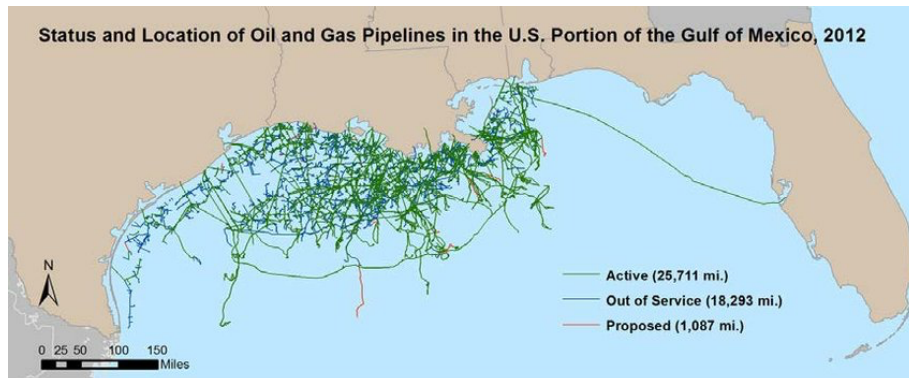
Ακόμα μια μέθοδος είναι η μέθοδος Tow (ρυμούλκησης) κατά την οποία ο αγωγός συγκρατείται στην επιφάνεια με χρήση μονάδων άνωσης και ρυμουλκείτε στο σημείο εγκατάστασης όπου τοποθετείται στην θέση εγκατάστασης με διάφορες διαδικασίες. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στις καιρικές συνθήκες.

2.2.4 Σημαντικοί υποθαλάσσιοι αγωγοί & δίκτυα παγκοσμίως

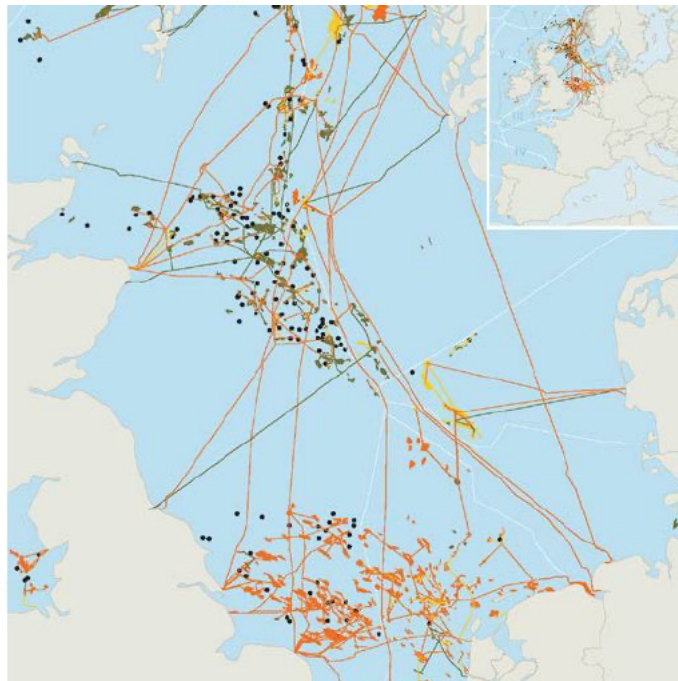
Ορισμένοι από τους πιο σημαντικούς είναι οι αγωγοί Nord Stream στην βαλτική θάλασσα, τα δίκτυα αγωγών που υποστηρίζουν τις εξορύξεις πετρελαίου και αερίου στον κόλπο του Μεξικού και το δίκτυο αγωγών που υποστηρίζει τις εξορύξεις πετρελαίου και αερίου νότιο ανατολικά της Νορβηγίας.



Εικόνα 2: Χάρτης υποθαλάσσιων αγωγών βόρειας Ευρώπης
(Πηγή: www.eea.europa.eu)



Εικόνα 3: Χάρτης υποθαλάσσιων αγωγών κόλπου Μεξικού (Πηγή: www.researchgate.net)



Εικόνα 4: Χάρτης υποθαλάσσιων αγωγών βόρειας θάλασσας (Πηγή: www.offshoreengineering.com)

Πέρα από τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα υποθαλάσσιων αγωγών συνεχώς προτείνονται ιδέες για νέα δίκτυα, μια από τις σημαντικότερες πιθανές προσθήκες στον χώρο των υποθαλάσσιων αγωγών αποτελεί η προσθήκη ενός υποθαλάσσιου αγωγού στην Μεσόγειο με σκοπό την σύνδεση της Κύπρου με την Κρήτη. Η Μεσόγειος όμως λόγω της πλούσιας γεωμορφολογίας της παρουσιάζει αρκετές απειλές για υποθαλάσσιους αγωγούς κυρίως υπό την μορφή γεωκινδύνων.

3. Υπολογιστικά και προγραμματιστικά εργαλεία

3.1 Εισαγωγή

Για την δημιουργία του εργαλείου αυτόματου υπολογισμού χάραξης ήταν αναγκαία η χρήση 4 βασικών λογισμικών. Αρχικά μέσω του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS) έγινε η συλλογή των δεδομένων εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, μέσω δύο προσομοιώσεων διάρρηξης ρήγματος. Για την παραγωγή, εκπαίδευση και χρήση του νευρωνικού δικτύου έγινε χρήση της βιβλιοθήκης TensorFlow της Python. Για την εκτέλεση των διάφορων γεωχωρικών επεξεργασιών, την δημιουργία, διαχείριση και επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων, έγινε χρήση του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών QGIS. Για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών καθώς και την δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη έγινε χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python.

3.2 ABAQUS

Το ABAQUS είναι ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση και ανάλυση διάφορων πολύπλοκων σεναρίων σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της επιστήμης αλλά και των κατασκευαστικών και βιομηχανικών κλάδων. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην διακριτοποίηση των πολύπλοκων συνεχών σωμάτων και γεωμετριών σε επιμέρους στοιχεία, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους για να δημιουργήσουν το πλέγμα (mesh) με βάση το οποίο θα εκτελεσθεί η προσομοίωση σε πιο απλά υπολογιστικά βήματα και κομμάτια. Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η ακριβής προσομοίωση πολύπλοκων σεναρίων ή και σεναρίων που δεν μπορούν να περιγραφούν ολοκληρωμένα από αναλυτικές μεθόδους. Οι αναλύσεις μπορούν να διεκπεραιωθούν μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του ABAQUS ή με την χρήση αρχείων κειμένων εντολών που μπορεί να διαβάσει και να κατανοήσει το λογισμικό. Για κάθε προσομοίωση το λογισμικό δημιουργεί και συντηρεί μια βάση δεδομένων

στην οποία αποθηκεύει τα αναγκαία δεδομένα για την εκτέλεση της ανάλυσης και της προσομοίωσης.

3.3 Python & βιβλιοθήκες

3.3.1 Python

Η Python είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, δηλαδή είναι μια γλώσσα προγραμματισμού η οποία είναι πιο κοντά στις φυσικές γλώσσες του ανθρώπου, είναι κατά κάποιο τρόπο απαλλαγμένη σε έναν βαθμό από τις εκτενείς λεπτομέρειες που χρειάζεται ο υπολογιστής για να εκτελέσει βασικά υπολογιστικά βήματα. Η Python δίνει βάση στην αναγνωσιμότητα του κώδικα και η σωστή εκτέλεση της είναι βασισμένη στην σωστή 'ενδοπαραγραφοποίηση' (indentation). Διαθέτει αυτόματο σύστημα 'συλλογής σκουπιδιών' (garbage collection) για την αυτόματη διαχείριση και απελευθέρωση μνήμης όταν αυτή έχει σταματήσει να είναι αναγκαία για την εκτέλεση του προγράμματος. Είναι ικανή για αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, συναρτησιακό προγραμματισμό αλλά και για δομημένο προγραμματισμό. Επιπλέον είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η Python είναι μια από τις πιο διαδεδομένες γλώσσες προγραμματισμού καθώς είναι πιο φιλική προς τους ανθρώπους που δεν έχουν εμπειρία στον τομέα του προγραμματισμού, αλλά ταυτόχρονα είναι μια από τις ισχυρότερες γλώσσες. Εξ αιτίας αυτού του χαρακτηριστικού η python διαθέτει έναν τεράστιο όγκο open-source βιβλιοθηκών για την επίλυση αμέτρητων προβλημάτων και για πάρα πολλές εφαρμογές. Σε γενικές γραμμές η python έχει εδραιωθεί στους τομείς της ανάλυσης δεδομένων, της επιστήμης των δεδομένων καθώς και της μηχανικής μάθησης. Μερικές από τις βιβλιοθήκες έχουν χρησιμοποιηθεί για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την δημιουργία του εργαλείου που πραγματεύεται. Για τις ανάγκες της εργασίας έγινε χρήση της python 3.9.12 σε δύο διαφορετικά προγραμματιστικά περιβάλλοντα, σε συνδυασμό με τον διαχειριστή πακέτων και προγραμματιστικών περιβαλλόντων Conda.

3.3.2 Βιβλιοθήκες

NumPy

Η πρώτη βιβλιοθήκη που θα αναλυθεί είναι η NumPy. Στόχος της NumPy είναι η πρόσθεση υποστήριξης για μεγάλους πολυδιάστατους πίνακες και μητρώων μαζί με διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις οι οποίες συνοδεύουν αυτούς τους πίνακες. Επιπλέον η NumPy είναι προαπαιτούμενη βιβλιοθήκη για την TensorFlow με βάση την οποία έγινε η δημιουργία και η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου.

Σημαντικές συναρτήσεις της NumPy που έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία είναι οι εξής:

1. `hstack()`

Ενώνει δύο πίνακες με βάση τον δεύτερο άξονα τους, δηλαδή τις στήλες.

2. `vstack()`

Ενώνει δύο πίνακες με βάση τον πρώτο άξονα τους, δηλαδή τις γραμμές.

3. `array()`

Δημιουργεί έναν πίνακα NumPy με βάση τις παραμέτρους που δίνονται.

4. `random.uniform()`

Δημιουργεί έναν πίνακα με τυχαίους αριθμούς με βάση τις παραμέτρους που δίνονται.

Pandas

Είναι μια βιβλιοθήκη που χρησιμοποιείται για ανάλυση και χειραγώγηση δεδομένων. Συγκεκριμένα διαθέτει αντικείμενα όπως DataFrames για την αποτελεσματική διαχείριση αριθμητικών δεδομένων με ενσωματωμένο σύστημα δεικτοδότησης και συναρτήσεις για την αποτελεσματική διαχείρισή τους. Επιπλέον διαθέτει εργαλεία για την ανάγνωση και εγγραφή δεδομένων σε διάφορα formats.

Μερικές από τις συναρτήσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι:

1. `read_csv()`

Ανάγνωση αρχείου CSV (comma separated values).

2. `DataFrame()`

Δημιουργία αντικειμένου τύπου `DataFrame` ανάλογα με τις παραμέτρους που δίνονται.

3. `Head()`

Εκτύπωση των πρώτων 5 στηλών του `DataFrame` για έλεγχο.

4. `Transpose()`

Αναστροφή δεδομένων καταχωρημένων σε αντικείμενο `DataFrame`.

5. `to_csv()`

Αποθήκευση δεδομένων από `DataFrame` σε αρχείο CSV

6. `Columns()`

Επιστρέφει τις ετικέτες των στηλών του `DataFrame`

Geopandas

Η `Geopandas` είναι μια βιβλιοθήκη χτισμένη πάνω στην `pandas` με σκοπό την πρόσθεση υποστήριξης για ανάγνωση και διαχείριση γεωγραφικών δεδομένων. Η βιβλιοθήκη αυτή θα χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία αρχείων τύπου `shapefile`.

GDAL

Η `GDAL` (Geospatial Data Abstraction Library) είναι μια βιβλιοθήκη η οποία χρησιμοποιείτε για την ανάγνωση, επεξεργασία και αποθήκευση αρχείων `raster` και `vector`. Η `GDAL` είναι αρχικά υλοποιημένη σε `C++` αλλά διαθέτει `APIs` (application programming interfaces/ Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών) για διάφορες γλώσσες προγραμματισμού, συμπεριλαμβανομένης της `Python`. Η `GDAL`

χρησιμοποιείται σε πολλά λογισμικά συμπεριλαμβανομένων των QGIS και ArcGIS.

PROJ

Η βιβλιοθήκη PROJ αποτελεί ένα λογισμικό μετασχηματισμού συντεταγμένων από ένα σύστημα αναφοράς σε ένα άλλο. Χρησιμοποιείτε από την GDAL για τους διάφορους πιθανούς μετασχηματισμούς που μπορεί να προκύψουν. Άρχισε σαν μια απλή χαρτογραφική εφαρμογή αλλά με την πάροδο του χρόνου και με την συνεχή πρόσθεση νέων μετασχηματισμών έχει εξελιχθεί σε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο και καλύπτει την συντριπτική πλειοψηφία των μετασχηματισμών μεταξύ συστημάτων αναφοράς.

Tkinter & Tk GUI toolkit

Για την δημιουργία της γραφικής διεπαφής χρήστη έγινε χρήση του Tk GUI toolkit. Το Tk GUI toolkit αποτελεί μια σουίτα εργαλείων για την δημιουργία βασικών γραφικών διεπαφών, είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα, όπως η πλειοψηφία των λογισμικών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Επιπλέον πρόκειται για την de facto σουίτα GUI για την python. Για να μπορεί να γίνει χρήση της σουίτας αυτής όμως είναι αναγκαία η χρήση μιας βιβλιοθήκης που δρα ως περιτύλιγμα της σουίτας για την python, μεταφράζει δηλαδή τις εντολές που γράφονται στην python σε εντολές που κατανοεί ο διερμηνέας της σουίτας, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στον διερμηνέα της python. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλα τα "εξαρτήματα" του GUI που είναι ορατά στον χρήστη ονομάζονται widgets.

Για την διεπαφή που δημιουργήθηκε για το εργαλείο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία έγινε χρήση 3 τύπων widget.

1. Label (ετικέτα)

Το συγκεκριμένο widget διαθέτει απλά ένα κομμάτι κειμένου το οποίο φαίνεται στον χρήστη στην θέση που έχει οριστεί από τον προγραμματιστή.

2. Button (κουμπι)

Το widget αυτό διαθέτει την λειτουργία της ετικέτας αλλά επιπλέον μπορεί να καλέσει μια συνάρτηση που έχει επιλέξει ο προγραμματιστής.

3. Entry

Το widget αυτό αποτελεί μια κενή γραμμή πάνω στην οποία μπορεί να πληκτρολογήσει ο χρήστης δεδομένα χρήσιμα για την εκτέλεση του εργαλείου.

Matplotlib

Η βιβλιοθήκη αυτή δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργεί και να επεξεργάζεται διαγράμματα διάφορων ειδών. Επιπλέον μέσω διάφορων προεκτάσεων διαθέτει περιορισμένες χαρτογραφικές δυνατότητες καθώς και πολλές άλλες λειτουργίες. Στην παρούσα εργασία η Matplotlib χρησιμοποιήθηκε κυρίως για διάφορους ελέγχους κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

3.3.3 Jupyter Notebook

Το jupyter Notebook είναι ένα εργαλείο μέσω του οποίου μπορεί να γίνει εκτέλεση κώδικα διάφορων γλωσσών ανάλογα με τον πυρήνα που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση. Για της ανάγκες της παρούσας εργασίας έγινε χρήση πυρήνα ipython kernel για εκτέλεση κώδικα python. Το εργαλείο αυτό αποτελεί μια εφαρμογή τύπου server-client, η οποία μπορεί να γίνει hosted και τοπικά χωρίς ανάγκη ύπαρξης σύνδεσης με το ίντερνετ. Τέλος είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα εργαλεία για data science.

3.4 Σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών(GIS) & εργαλεία

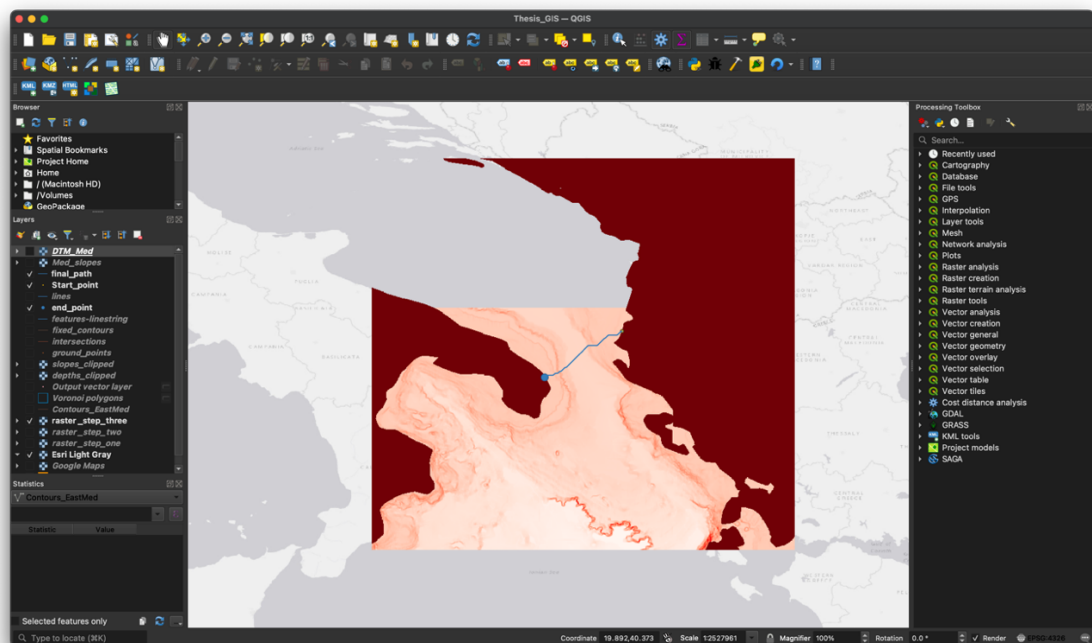
3.4.1 QGIS

Το QGIS είναι ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ανοιχτού κώδικα που υποστηρίζει την ανάγνωση, επεξεργασία, προβολή, αποθήκευση και ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων. Το QGIS είναι γραμμένο κυρίως σε C++ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα λειτουργικά συστήματα

συμπεριλαμβανομένων των Microsoft Windows, Linux & Mac OS X. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα που διαθέτει σε σχέση με άλλα εμπορικά λογισμικά GIS είναι ότι έχει σε γενικές γραμμές χαμηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις από αυτά ενώ ταυτόχρονα παραμένει ένα από τα πιο ισχυρά και ευέλικτα GIS.

3.4.2 Περιγραφή QGIS

Ένα τυπικό παράθυρο QGIS αποτελείται από τον κানাβο, διάφορες μπάρες εργαλείων, το toolbox, μέσα στο οποίο βρίσκονται όλα τα εργαλεία που είναι εγκατεστημένα με την συγκεκριμένη έκδοση, καθώς και τρεις πίνακες, έναν πλοήγησης, έναν θεματικών επιπέδων και έναν που δείχνει τα στατιστικά του επιλεγμένου θεματικού επιπέδου.



Εικόνα 5: Διεπιφάνεια χρήση QGIS

Ο κানাβος αποτελεί τον χώρο οπτικοποίησης των πληροφοριών που είναι φορτωμένες στο λογισμικό με τον κατάλληλο τρόπο ανάλογα με τις επιλογές στο panel των θεματικών επιπέδων. Στο toolbox βρίσκεται το σύνολο των εργαλείων και διαδικασιών που διαθέτει το QGIS. Το panel πλοήγησης χρησιμοποιείτε για την πλοήγηση στα συστήματα αρχείων στα οποία έχει πρόσβαση το QGIS και έχει την δυνατότητα γρήγορης ανάγνωσης και εισαγωγής στο λογισμικό διάφορων αρχείων. Στο panel

θεματικών επιπέδων βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα αρχεία που έχουν φορτωθεί στο λογισμικό στην παρούσα εργασία (project) και μέσω αυτού εκτελούνται διάφορες διεργασίες για την σωστή οπτικοποίηση των αρχείων στον κানাβο του λογισμικού.

3.4.3 Graphical modeler & QGIS Processing Executor

Ένα από τα πιο χρήσιμα ενσωματωμένα εργαλεία του QGIS είναι ο graphical modeler μέσω του οποίου προγραμματίζονται πολλές διεργασίες με συγκεκριμένη σειρά, οι οποίες είναι οπτικοποιημένες σε μορφή γραφικών μοντέλων για την εύκολη και πρακτική διαχείριση τους. Τα μοντέλα που κατασκευάζονται μέσω του graphical modeler έχουν την δυνατότητα να εκτελεστούν από το λογισμικό σε μετέπειτα χρόνο, είτε με αρχεία που είναι φορτωμένα σε αυτό, είτε με αρχεία που είναι αποθηκευμένα σε σύστημα αρχείων στο οποίο έχει πρόσβαση το QGIS. Όλα τα μοντέλα είναι επίσης, εφικτό να μεταφραστούν σε κώδικα python που μπορεί να κατανοήσει ο διερμηνέας python που διαθέτει ενσωματωμένο το QGIS.

Επιπλέον, μια σχετικά νέα προσθήκη στην σουίτα εργαλείων του QGIS είναι ο QGIS Processing Executor. Το συγκεκριμένο κομμάτι λογισμικού χρησιμοποιείτε ως δίαυλος επικοινωνίας του Command Line ή του τερματικού ενός λειτουργικού συστήματος με το QGIS. Συγκεκριμένα, δίνει στον χρήστη την δυνατότητα εκτέλεσης μοντέλων του graphical modeler ή κώδικα python χωρίς την εκτέλεση του QGIS σαν ολοκληρωμένο λογισμικό. Το συγκεκριμένο εργαλείο συνιστά πολύ σοβαρό βήμα για την ανάπτυξη εφαρμογών και την αυτοματοποίηση διάφορων διεργασιών που βασίζονται στο QGIS.

3.4.4 GRASS GIS

Όπως και το QGIS έτσι και το GRASS GIS αποτελεί ουσιαστικά μια σουίτα εργαλείων για την επεξεργασία ανάλυση οπτικοποίηση και διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών. Είναι δηλαδή ένα σύστημα γεωγραφικών

πληροφοριών. Επιπλέον είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα και μάλιστα τα εργαλεία του εμπεριέχονται στο QGIS υπό την μορφή ενός module.

3.4.5 Σημαντικά εργαλεία του QGIS & του GRASS GIS που χρησιμοποιήθηκαν

Μέσα στα πολυάριθμα εργαλεία του QGIS για την παρούσα εργασία χρειάστηκαν τα εξής:

1. Voronoi polygons

Δημιουργία vector αρχείου με τα πολύγωνα Voronoi για το συγκεκριμένο σετ σημείων που δόθηκε. Πολύγωνα Voronoi είναι τα πολύγωνα που αντιπροσωπεύουν τις περιοχές σε ένα διάγραμμα Voronoi. Οι περιοχές αυτές ορίζονται ως οι περιοχές μέσα στις οποίες όλα τα σημεία είναι πιο κοντά στο σημείο ενδιαφέροντος που αυτές περικλείουν.

2. Buffer

Το εργαλείο αυτό δημιουργεί vector αρχείο που περιέχει πολύγωνα που αντιπροσωπεύουν ζώνες συγκριμένων αποστάσεων γύρω από τα vector δεδομένα ενδιαφέροντος.

3. Intersection

Το εργαλείο αυτό εντοπίζει τις κοινές περιοχές δύο θεματικών επιπέδων τύπου vector και τις αποθηκεύει σε αρχείο vector. Οι νέες περιοχές συγκρατούν τα attributes και των δύο θεματικών επιπέδων που δόθηκαν.

4. Rasterize (GDAL)

Το εργαλείο rasterize μετατρέπει δεδομένα τύπου vector σε δεδομένα τύπου raster. Συγκεκριμένα δημιουργεί ένα raster

αρχείο κατάλληλα γεωαναφερμένο με τις διαστάσεις ή την ανάλυση που ορίζει ο χρήστης και πάνω σε αυτό κάνει εγγραφή της ανάλογες τιμές που προκύπτουν από το attribute table του vector αρχείου ή από κάποια άλλη παράμετρο που θα ορίσει ο χρήστης.

5. Reproject

Το εργαλείο reproject δέχεται ένα αρχείο vector και δημιουργεί ένα νέο το οποίο είναι προβεβλημένο σε διαφορετικό σύστημα αναφοράς αλλά διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά με το αρχικό.

6. Clip raster by extend

Το εργαλείο αυτό δέχεται ένα αρχείο raster και ένα extend υπό την μορφή συντεταγμένων ή αρχείου vector και δημιουργεί ένα νέο αρχείο raster με τα ίδια δεδομένα με το αρχικό αλλά 'κομμένο' στα όρια που έχει ορίσει ο χρήστης μέσω του extend.

7. R.Null

Αυτό το εργαλείο δέχεται ένα αρχείο raster και μια σταθερή τιμή την οποία καταχωρεί σε κάθε pixel που δεν διαθέτει ήδη κάποια τιμή.

8. Assign projection

Σε αντίθεση με το reproject το συγκεκριμένο εργαλείο δέχεται ένα αρχείο vector ή ένα αρχείο raster (ανάλογα με το variant του εργαλείου) χωρίς σύστημα αναφοράς και του αναθέτει το σύστημα αναφοράς που του έδωσε ο χρήστης.

9. Smooth

Το εργαλείο smooth δέχεται ένα αρχείο vector τύπου γραμμών ή πολύγωνων και δημιουργεί ένα νέο αρχείο με τα ίδια χαρακτηριστικά αλλά έχοντας αλλάξει την γεωμετρία με τέτοιο τρόπο ώστε να κάνει τις γραμμές πιο ομαλές, αυξάνοντας τον αριθμό κόμβων.

10.Least Cost Path Plugin

Το συγκεκριμένο plug in δέχεται τρία αρχεία, ένα cost raster, ένα start point(vector) και ένα finish point(vector). Το εργαλείο προσπαθεί να υπολογίσει βέλτιστο μονοπάτι μεταξύ του σημείου προέλευσης και του σημείου προορισμού με βάση τις τιμές των pixel στο cost raster θεωρώντας τα pixel χωρίς τιμή (Null) απροσπέλαστα. Τέλος δίνει ένα αρχείο vector με το μονοπάτι.

11.R.Slope.aspect

Το εργαλείο αυτό δέχεται ένα raster αρχείο το οποίο περιέχει το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου μιας περιοχής. Έπειτα υπολογίζει raster που περιέχουν τις κλίσεις του εδάφους, τις προοπτικές του εδάφους ανάλογα με τις παραμέτρους υπολογισμού, την καμπυλότητα του εδάφους και τις μερικές παραγώγους.

12.R.surf.contour

Το πρόγραμμα αυτό δέχεται ένα αρχείο raster που περιέχει ισοϋψείς καμπύλες και υπολογίζει ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους το οποίο αποθηκεύει σε ένα νέο αρχείο raster.

13.HCMGIS plugin

Το συγκεκριμένο plugin προσφέρει διάφορα εργαλεία. Πιο συγκεκριμένα προσφέρει την δυνατότητα χρήσης διάφορων basemaps όπως google satellite, την μαζική μετατροπή αρχείο csv

σε shapefiles και την χρήση ορισμένων διεργασιών τύπου field calculator.

3.5 TensorFlow & νευρωνικά δίκτυα

3.5.1 Γενικά για την TensorFlow

Η TensorFlow είναι μια βιβλιοθήκη δωρεάν και ανοιχτού κώδικα για εφαρμογές μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης. Αρχικά δημιουργήθηκε από την Google, συγκεκριμένα από την ομάδα Google Brain Team και δόθηκε στο κοινό αρχικά το 2015. Τον Νοέμβριο του 2019 έγινε αναβάθμιση σε TensorFlow 2.0 με διάφορες αλλαγές και προσθήκες στην βιβλιοθήκη. Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί την έκδοση 2.11.0. Η TensorFlow είναι διαθέσιμη σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού όπως η Python, η C++ και η Java.

3.5.2 Keras API

Το Keras API αποτελεί την πιο διαδεδομένη διεπαφή για την TensorFlow. Είναι βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα που δημιουργήθηκε αρχικά το 2015 και για αρκετό καιρό υποστήριζε διάφορες βιβλιοθήκες τεχνητής νοημοσύνης αλλά πλέον υποστηρίζει μόνο την TensorFlow. Σκοπός της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης είναι να κάνει την κατασκευή και εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων πιο φιλική προς τον χρήστη χωρίς όμως να θυσιάζει δυνατότητες του λογισμικού.

Εργαλεία του API που χρησιμοποιήθηκαν:

1. Normalization layer

Το επίπεδο κανονικοποίησης δίνει την δυνατότητα στο νευρωνικό δίκτυο να κανονικοποιεί τα δεδομένα εισόδου με βάση τα στατιστικά μεγέθη των δεδομένων εκπαίδευσης, αυτό βοηθάει στο να έρθουν όλα τα μεγέθη εισόδου σε ανάλογη κλίμακα και με

αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνήθως ταχύτερη και καλύτερη προσαρμογή των παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου.

2. Dense layer

Στο επίπεδο αυτό βρίσκονται οι τεχνητοί νευρώνες του δικτύου.

3. Adapt

Με την εντολή αυτή γίνεται η παραμετροποίηση του επιπέδου κανονικοποίησης με βάση τα στατιστικά στοιχεία του δοσμένου συνόλου δεδομένων.

4. Functional API

Το API αυτό δίνει την δυνατότητα στον προγραμματιστή να κατασκευάσει νευρωνικά δίκτυα που δεν έχουν γραμμικές αρχιτεκτονικές σε αντίθεση με το sequential API.

3.5.3 Optimizers

Optimizers είναι οι αλγόριθμοι μέσω των οποίων γίνεται διόρθωση των βαρών και άλλων παραμέτρων ενός νευρωνικού δικτύου. Είναι πρακτικά η μεθοδολογία/μαθηματική συνάρτηση/αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση του νευρωνικού δικτύου. Σε γενικές γραμμές οι αλγόριθμοι αυτοί προσπαθούν να βρουν το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης απώλειας, δηλαδή του σφάλματος των προβλέψεων. (Geron, 2022)

Βασικοί optimizers:

1. Gradient descent

Ο αλγόριθμος αυτός είναι ένας πολύ συνηθισμένος αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Σε γενικές γραμμές ο αλγόριθμος προσπαθεί, αλλάζοντας παραμέτρους, να πετύχει την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους. Στην περίπτωση του νευρωνικού δικτύου οι παράμετροι είναι τα τυχαία αρχικά βάρη του μοντέλου και η συνάρτηση σφάλματος είναι συνάρτηση απώλειας (loss function). Η διόρθωση των παραμέτρων γίνεται με επαναληπτική διαδικασία. Η ισχύς του αλγορίθμου, δηλαδή το πόσο απότομα γίνεται η

αλλαγή των παραμέτρων, καθορίζεται από τον ρυθμό μάθησης (learning rate). Η επιλογή του σωστού ρυθμού μάθησης είναι σημαντική για την σωστή ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους (loss function).

2. Batch gradient descent

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου gradient descent είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των μερικών παραγώγων της συνάρτησης απώλειας για κάθε παράμετρο που πρόκειται να αλλάξει. Σε αντίθεση με το παραπάνω, στον αλγόριθμο Batch gradient descent γίνεται υπολογισμός της μερικής παραγώγου για πολλά δείγματα μαζί και για κάθε παράμετρο μέσω υπολογισμού του διανύσματος κλίσης.

3. SGD (stochastic gradient descent)

Η SGD έχει το χαρακτηριστικό ότι σε κάθε πέρασμα (feedforward) διαλέγει μόνο ένα δείγμα από τα δεδομένα εκπαίδευσης το οποίο περνάει από το νευρωνικό δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη εκτέλεση της κάθε επανάληψης αλλά ταυτόχρονα για την σωστή προσαρμογή στα δεδομένα απαιτούνται πολλές επαναλήψεις.

4. Momentum optimization

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο σε κάθε επανάληψη λαμβάνεται υπόψη και η διόρθωση της προηγούμενης επανάληψης ως επιτάχυνση για την ταχύτητα της ελαχιστοποίησης, μέσω ενός διανύσματος ορμής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται πιο γρήγορα η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απωλειών.

5. Nesterov Accelerated Gradient

Ο αλγόριθμος αυτός πρόκειται για μια παραλλαγή του παραπάνω αλγορίθμου. Συγκεκριμένα αντί να γίνεται υπολογισμός των μερικών παραγώγων στο σημείο της παραμέτρου, ο υπολογισμός γίνεται πιο μπροστά και προς την κατεύθυνση του διανύσματος ορμής. Επειδή σε γενικές γραμμές το διάνυσμα της ορμής δείχνει

προς την σωστή κατεύθυνση για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος, με αυτή την αλλαγή επιτυγχάνεται ακόμα ταχύτερη ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας.

6. AdaGrad

Ο αλγόριθμος αυτός διαθέτει κάτι που λέγεται προσαρμοστικός ρυθμός μάθησης. Στην ουσία σε κάθε επανάληψη, ο αλγόριθμος αλλάζει το διάνυσμα κλίσης στις πιο απότομες διαστάσεις του, ανάλογα με τις προηγούμενες κλίσεις σε κάθε διάσταση. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται γρήγορη ελαχιστοποίηση του σφάλματος ενώ ταυτόχρονα απαιτείται λιγότερη παραμετροποίηση καθώς ο αλγόριθμος προσαρμόζεται μόνος του ανάλογα με το κάθε πρόβλημα. Ένα βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι το γεγονός ότι υπάρχει πιθανότητα να μειώσει την ταχύτητα του πολύ νωρίς και να σταματήσει να ελαχιστοποιεί την συνάρτηση απώλειας.

7. RMSProp

Σε αντίθεση με τον προηγούμενο αλγόριθμο ο συγκεκριμένος δεν παρουσιάζει το πρόβλημα της γρήγορης μείωσης της ταχύτητας του καθώς αντί να λαμβάνει υπόψη όλες τις προηγούμενες επαναλήψεις, εξετάζει τις πιο πρόσφατες. Αυτό το πετυχαίνει χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση εκθετικής μείωσης στις τιμές των προηγούμενων επαναλήψεων.

8. Adam

Ο αλγόριθμος Adam (adaptive moment estimation) συνδυάζει τις δυνατότητες του RMSProp και του Momentum optimization σε έναν αλγόριθμο. Δηλαδή ο αλγόριθμος υπολογίζει και τον εκθετικά μειούμενο μέσο των προηγούμενων επαναλήψεων αλλά και τον εκθετικά μειούμενο τετραγωνικό μέσο των προηγούμενων επαναλήψεων. Αυτά τα δύο μεγέθη αποτελούν εκτιμήσεις του μέσου και της διακύμανσης των κλίσεων και πολύ συχνά ονομάζονται πρώτη και δεύτερη ορμή αντίστοιχα.

3.5.4 Loss functions & Metrics

Πέρα από τους optimizers στην διάρκεια της εκπαίδευσης εμφανίζονται άλλες δύο συναρτήσεις. Το loss function και τα Metrics. Το μαθηματικό πρόβλημα που προσπαθούν να λύσουν τα νευρωνικά δίκτυα είναι η βέλτιστη προσαρμογή των προβλέψεων τους στα δεδομένα εισόδου. Οι Optimizers είναι οι συναρτήσεις που υπολογίζουν την απαιτούμενη διόρθωση των βαρών ενός νευρωνικού δικτύου, αλλά για τον υπολογισμό της διόρθωσης πρώτα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός του σφάλματος. Τα loss functions είναι οι συναρτήσεις λοιπόν που επιλέγονται για τον υπολογισμό του σφάλματος και τις οποίες το νευρωνικό δίκτυο προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει.

Από την άλλη τα Metrics είναι συναρτήσεις που επιλέγονται για να δίνουν μια καθαρή εικόνα για την κατάσταση του νευρωνικού δικτύου. Συνήθως οι συναρτήσεις αυτές διαλέγονται με τρόπο τέτοιο ώστε το loss function να μην επιβαρύνει υπολογιστικά και τα Metrics με τρόπο που να δίνουν σε έναν παρατηρητή μια καλή εικόνα για την κατάσταση του δικτύου ανάλογα με τα δεδομένα. Δηλαδή το loss function συνήθως είναι μια απλή υπολογιστικά συνάρτηση όπως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα(MSE), της οποίας όμως το αποτέλεσμα προφανώς είναι σε άλλη κλίμακα από αυτή των δεδομένων, επομένως για Metric μια συνηθισμένη συνάρτηση είναι η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE).

Σημαντικά loss functions & metrics:

1. MSE-mean squared error
2. RMSE-root mean squared error
3. MAE-mean absolute error
4. MAPE-mean absolute percentage error

3.5.5 Activation functions

Κάθε νευρώνας του νευρωνικού δικτύου διαθέτει μια συνάρτηση ενεργοποίησης βάσει της οποίας αποφασίζεται η έξοδος του κάθε νευρώνα ανάλογα με την είσοδο και τις παραμέτρους του. Είναι πολύ σημαντικό κομμάτι των νευρωνικών δικτύων καθώς προσθέτει μη γραμμικότητα σε αυτό και έτσι δίνει την δυνατότητα εφαρμογών σε πιο περίπλοκα προβλήματα. Τα πρώτα MLPs αντί για συνάρτηση ενεργοποίησης διέθεταν μια βηματική συνάρτηση στην οποία όμως ήταν αδύνατο να γίνει χρήση οποιασδήποτε μορφής ελαχιστοποίηση σφάλματος με βάση την κλίση καθώς η βηματική συνάρτηση δεν έχει κλίσεις, αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μη δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμων backpropagation για την διόρθωση των παραμέτρων του δικτύου.

Αργότερα έγινε χρήση της λογιστικής συνάρτησης στην θέση της βηματικής με σκοπό την δυνατότητα υπολογισμού κλίσεων και εφαρμογής των αλγορίθμων backpropagation. Η λογιστική συνάρτηση είναι επίσης γνωστή ως σιγμοειδής συνάρτηση και ήταν η επικρατέστερη συνάρτηση ενεργοποίησης για αρκετό καιρό.

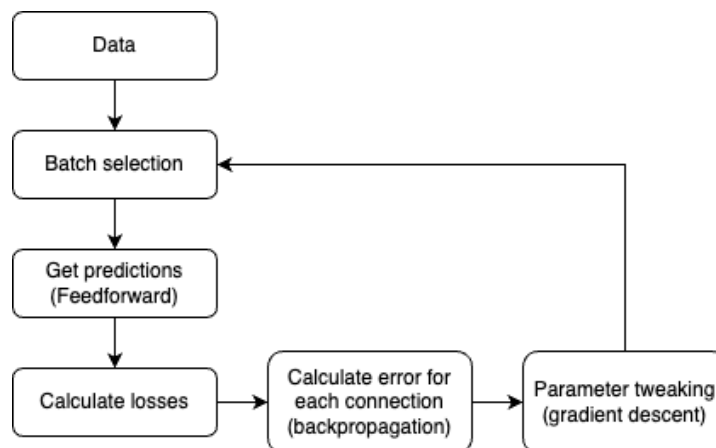
Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί νέες συναρτήσεις ενεργοποίησης κάθε μια με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, η τελική επιλογή συνάρτησης ενεργοποίησης γίνεται με βάση τα δεδομένα εισόδου, την αρχιτεκτονική του δικτύου και διάφορους άλλους παράγοντες. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η συνάρτηση ReLU (Rectified linear unit) και το παράγωγο της η LeakyReLU, οι οποίες παρουσιάζουν σταθερά καλύτερη απόδοση από την πλειοψηφία σε πληθώρα καταστάσεων.

3.5.6 TensorBoard

Το TensorBoard είναι μια σουίτα εργαλείων οπτικοποίησης για την TensorFlow. Έχει την δυνατότητα να οπτικοποιήσει διαγράμματα που αφορούν την διαδικασία της εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου, την

αρχιτεκτονική του, τα ιστογράμματα των παραμέτρων των νευρώνων κλπ. Μέσω αυτής της σουίτας γίνεται πολλές φορές ο έλεγχος για την κατάσταση του νευρωνικού δικτύου και της εκπαίδευσής του.

3.5.7 Διαδικασία εκπαίδευσης (feedforward, backpropagation)



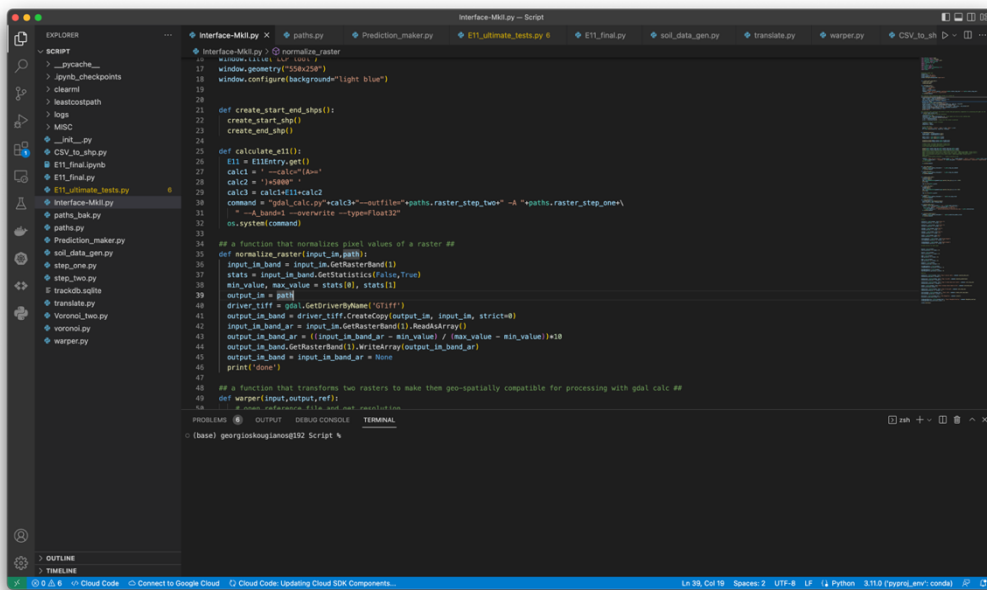
Σχήμα 2: Διαδικασία εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου

Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων γίνεται με την εξής διαδικασία. Σε πρώτη φάση γίνεται αρχικοποίηση των παραμέτρων των νευρώνων με τυχαίους αριθμούς. Σε δεύτερη φάση γίνεται τυχαία επιλογή ενός mini-batch, δηλαδή μιας ομάδας των δεδομένων εκπαίδευσης, με την οποία εκτελείται ένα πέρασμα από το νευρωνικό δίκτυο. Δηλαδή τα δεδομένα περνάνε από όλους τους νευρώνες ακριβώς όπως θα γίνονταν στην διαδικασία μιας πρόβλεψης και στο τέλος υπολογίζονται οι έξοδοι του νευρωνικού δικτύου για τα δεδομένα αυτά (διαδικασία feedforward). Στην συνέχεια, με βάση τις εξόδους του νευρωνικού δικτύου, τις επιθυμητές τιμές των προβλέψεων και το loss function που έχει επιλεχθεί, γίνεται ο υπολογισμός των σφαλμάτων. Με βάση τα υπολογισμένα σφάλματα γίνεται υπολογισμός της συνεισφοράς των συνδέσεων του επιπέδου εξόδου στο τελικό σφάλμα. Έπειτα γίνεται υπολογισμός της συνεισφοράς της κάθε σύνδεσης αρχίζοντας από τις συνδέσεις του επιπέδου εξόδου και υπολογίζοντας προς τα πίσω μέχρι το επίπεδο εισόδου, χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας (διαδικασία backpropagation). Στο τέλος με βάση τα σφάλματα που υπολογίστηκαν γίνονται οι διορθώσεις των παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου με βάση την μέθοδο gradient descent. Η διαδικασία αυτή, εκτός της

αρχικοποίησης, επαναλαμβάνεται μέχρι τα αποτελέσματα του νευρωνικού δικτύου να είναι ικανοποιητικά και κάθε μια επανάληψη λέγεται εποχή.

3.6 Visual Studio Code

Το visual studio code ή VS Code είναι ένα λογισμικό τύπου source-code editor (συντάκτης πηγαίου κώδικα), η κύρια χρήση του είναι η συγγραφή κώδικα σε διάφορες γλώσσες για την ανάπτυξη λογισμικών.



Εικόνα 6: Διεπαφή χρήσης VS code

4. Διασύνδεση εργαλείων, διαδικασία βέλτιστης χάραξης

4.1 Εισαγωγή

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει στόχο την ανάπτυξη ενός εργαλείου το οποίο λαμβάνοντας υπόψη την γεωμορφολογία του πυθμένα της θάλασσας, τα χαρακτηριστικά ενός αγωγού και δεδομένα για τα ρήγματα στην περιοχή μελέτης, θα μπορεί να υπολογίσει την βέλτιστη δυνατή χάραξη, για τα γνωστά δεδομένα για τον υποθαλάσσιο αγωγό αυτό. Το εργαλείο αναπτύχθηκε σε γλώσσα python και συνεργάζεται με το QGIS. Σε γενικές γραμμές το εργαλείο δέχεται 7 αρχεία, το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, τα αρχεία με τα σημεία αρχής και τέλους του αγωγού,

ένα αρχείο με το μοντέλο βαθυμετρίας, ένα αρχείο με τις κλίσεις σε μορφή raster, ένα αρχείο με τα γνωστά ρήγματα στην περιοχή και τέλος ένα αρχείο με γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά ανά σημείο είτε σε μορφή shaperefile είτε σε μορφή csv. Με αυτά τα αρχεία και με την επιλογή από τον χρήστη της μέγιστης ανοχής του αγωγού σε παραμόρφωση, γίνονται αυτόματα οι κατάλληλοι υπολογισμοί και το εργαλείο αποθηκεύει σε ένα αρχείο shaperefile την βέλτιστη δυνατή χάραξη που υπολογίστηκε. Δηλαδή το εργαλείο προσπαθεί να 'προστατέψει' τον αγωγό από την γεωμορφολογία και τα ρήγματα στην περιοχή μελέτης. Για να το πετύχει αυτό ακολουθεί μια λογική ελάχιστου κόστους για την βέλτιστη χάραξη, δηλαδή χρησιμοποιεί τα δεδομένα για να δημιουργήσει έναν θεωρητικό χάρτη κόστους και με βάση αυτόν υπολογίζει το μονοπάτι ελάχιστου κόστους το οποίο μετά από κάποιες διορθώσεις αποθηκεύει ως βέλτιστη χάραξη.

4.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Παπαθωμά, 2021)

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου ήταν αναγκαία η παραγωγή των κατάλληλων δεδομένων εκπαίδευσης. Για τον υπολογισμό των δεδομένων εκπαίδευσης έγινε χρήση του ABAQUS με το οποίο έγιναν προσομοιώσεις διάρρηξης ενεργού ρήγματος με το οποίο διασταυρώνεται ο αγωγός της μελέτης (Παπαθωμά, 2021). Συγκεκριμένα το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη προσομοιώνει την διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος με γωνία διάρρηξης 60°. Οι τρεις κύριες παράμετροι αυτών των προσομοιώσεων είναι τα εδαφικά χαρακτηριστικά c, ϕ, h . Το c αντιπροσωπεύει την συνοχή του εδαφικού υλικού, το ϕ την γωνία εσωτερικής τριβής και το h το πάχος της ιζηματογενούς στρώσης.

Πιο αναλυτικά, για να ληφθούν δεδομένα σχετικά με την παραμόρφωση του αγωγού έγιναν δύο ξεχωριστές αναλύσεις. Η πρώτη ανάλυση έγινε για την διάρρηξη του ρήγματος και το αποτέλεσμα της στην στρώση ιζημάτων. Η δεύτερη ανάλυση υπολογίζει την παραμόρφωση που επιφέρει η παραμορφωμένη πλέον στρώση ιζημάτων στον αγωγό. Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων είναι αναγκαίο να ορισθούν από τον

χρήστη τα φυσικά χαρακτηριστικά, αλλά και η γεωμετρία των εμπλεκόμενων σωμάτων.

Πιο συγκεκριμένα για την πρώτη ανάλυση, η ιζηματογενής στρώση έχει μήκος 1000m και η διακριτοποίηση γίνεται ανά ένα μέτρο, η διάρρηξη του ρήγματος εντοπίζεται στο μέσο του μήκους της ιζηματογενούς στρώσης, δηλαδή στα 500 μέτρα. Το υλικό των ιζημάτων θεωρήθηκε ως αργιλικό. Τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού της ιζηματογενούς στρώσης καθορίστηκαν ως εξής: πυκνότητα υλικού $\rho=2 \text{ tn/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E_0=10000 \text{ MPa}$ και λόγος Poisson $\nu=0.3$. Τα εύρη των εδαφικών χαρακτηριστικών που μελετήθηκαν αναλύονται παρακάτω. Για το πάχος ιζηματογενούς στρώσεις Η το εύρος είναι 30m – 60m και 105m – 135m, με βήμα 15m. Για την γωνία εσωτερικής τριβής ϕ το εύρος είναι $8^\circ - 40^\circ$, με βήμα 8° . Για την συνοχή του εδαφικού υλικού c το εύρος είναι 15KPa – 95KPa, με βήμα 20KPa. Σε αυτή την ανάλυση εξάγονται οι μέγιστες μετατοπίσεις στην επιφάνεια της στρώσης ιζημάτων, U_1 είναι η οριζόντια μέγιστη μετατόπιση και U_2 η κατακόρυφη μέγιστη μετατόπιση.

Σχετικά με την δεύτερη ανάλυση και τον αγωγό του προσομοιώματος. Ο αγωγός πρόκειται για αγωγό από χάλυβα με 3 επενδύσεις, μια αντιδιαβρωτική και δυο προστατευτικές, εκ των οποίων η μια αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο αγωγός διασταυρώνεται κάθετα με το ρήγμα, δηλαδή σε γωνία 90° , και έχει μήκος 1000 m, ο αγωγός χωρίζεται σε στοιχεία μήκους 1 m κατά την διάρκεια της διακριτοποίησης. Ο αγωγός είναι ένας τυπικός μεταλλικός υποθαλάσσιος αγωγός, η εξωτερική διάμετρος του ισούται με 0.6604m και το πάχος του τοιχώματος είναι 0.027m.

Για την αριθμητική προσομοίωση του αγωγού σε δύο διστάσεις έγινε χρήση πεπερασμένων στοιχείων δοκού, με σκοπό την εκτίμηση της συμπεριφοράς του. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων σε συγκεκριμένες θέσεις του αγωγού. Τέλος, η αλληλεπίδραση εδάφους αγωγού προσομοιώνεται με εδαφικά ελατήρια, των οποίων οι ιδιότητες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της

εδαφικής επίχωσης και των περιβλημάτων του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος του αγωγού συνδέεται με ελατήριο στην κάθετη, οριζόντια και εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση, με αυτό τον τρόπο οι μετακινήσεις της στρώσης ιζημάτων επιβάλλονται στον αγωγό στατικά ανάλογα με την μετακίνηση των ελεύθερων άκρων των ελατηρίων. Η παραπάνω διαδικασία καθιστά τους υπολογισμούς των ιδιοτήτων των ελατηρίων κομβικής σημασίας για την ακρίβεια και τον ρεαλισμό της προσομοίωσης. Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων των ελατηρίων έγινε με βάση τον κανονισμό ALA και τη θεωρία των O' Rourke & Liu.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτές τις προσομοιώσεις και θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου είναι τα U1,U2,E11. Ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα διπλωματική εργασία έχει το δεδομένο E11 που αποτελεί την αξονική παραμόρφωση που δέχεται ο αγωγός κατά την διάρρηξη του ρήγματος και χρησιμοποιείται από τον αναπτυγμένο αλγόριθμο για την χάραξη του υποθαλάσσιου αγωγού.

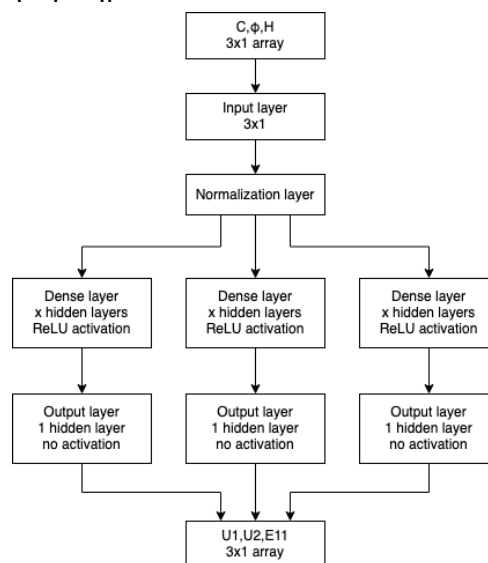
4.3 Κατασκευή νευρωνικού δικτύου

Για την κατασκευή του νευρωνικού δικτύου επιλέχθηκε να γίνει χρήση της βιβλιοθήκης TensorFlow καθώς πρόκειται για μια από τις ισχυρότερες βιβλιοθήκες για κατασκευή και εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων ενώ ταυτόχρονα είναι πολύ εύκολα να γίνει ενσωμάτωση των νευρωνικών δικτύων της σε άλλα λογισμικά. Κατ' επέκταση έγινε χρήση της βιβλιοθήκης Keras API για το Functional API το οποίο προσθέτει μεγαλύτερη ευελιξία στην κατασκευή νευρωνικών δικτύων, καθώς δίνει την δυνατότητα να γίνει κατασκευή νευρωνικών δικτύων με μη γραμμική τοπολογία επιπέδων, σε αντίθεση με το ακολουθητικό API (Sequential API).

Το νευρωνικό δίκτυο κατασκευάστηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να δέχεται τρεις αριθμούς και να δίνει στην έξοδο τρεις αριθμούς. Συγκεκριμένα το

δίκτυο απαρτίζεται από 8 επίπεδα, ένα επίπεδο εισόδου, ένα επίπεδο κανονικοποίησης, 3 πυκνά επίπεδα νευρώνων και 3 επίπεδα εξόδου.

Καθώς το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στην τιμή παραμόρφωσης E11 και λόγω της μεγάλης διαφοράς στην τάξη μεγέθους των 3 αποτελεσμάτων, πάρθηκε η απόφαση το νευρωνικό δίκτυο να μην έχει γραμμική αρχιτεκτονική και τα τρία πυκνά επίπεδα να μην συνδέονται μεταξύ τους αλλά το κάθε ένα από τις 3 εισόδους να δίνει μια τιμή εξόδου η οποία δίνεται στο ανάλογο επίπεδο εξόδου. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η παραμετροποίηση ξεχωριστά για κάθε μια έξοδο του νευρωνικού δικτύου και στην πράξη να μπορεί να υπάρχει καλύτερη διαχείριση των παραμέτρων του για κάθε ένα από τα τρία μεγέθη που καλείται να προβλέψει. Ως συνάρτηση ενεργοποίησης και για τα τρία πυκνά επίπεδα επιλέχθηκε μετά από δοκιμές η ReLU (Rectified Linear Unit), επιπλέον για τα τρία επίπεδα εξόδου αποφασίστηκε να μην οριστεί κάποια συνάρτηση ενεργοποίησης, καθώς δεν κρίθηκε αναγκαίο για τα συγκεκριμένο πρόβλημα.



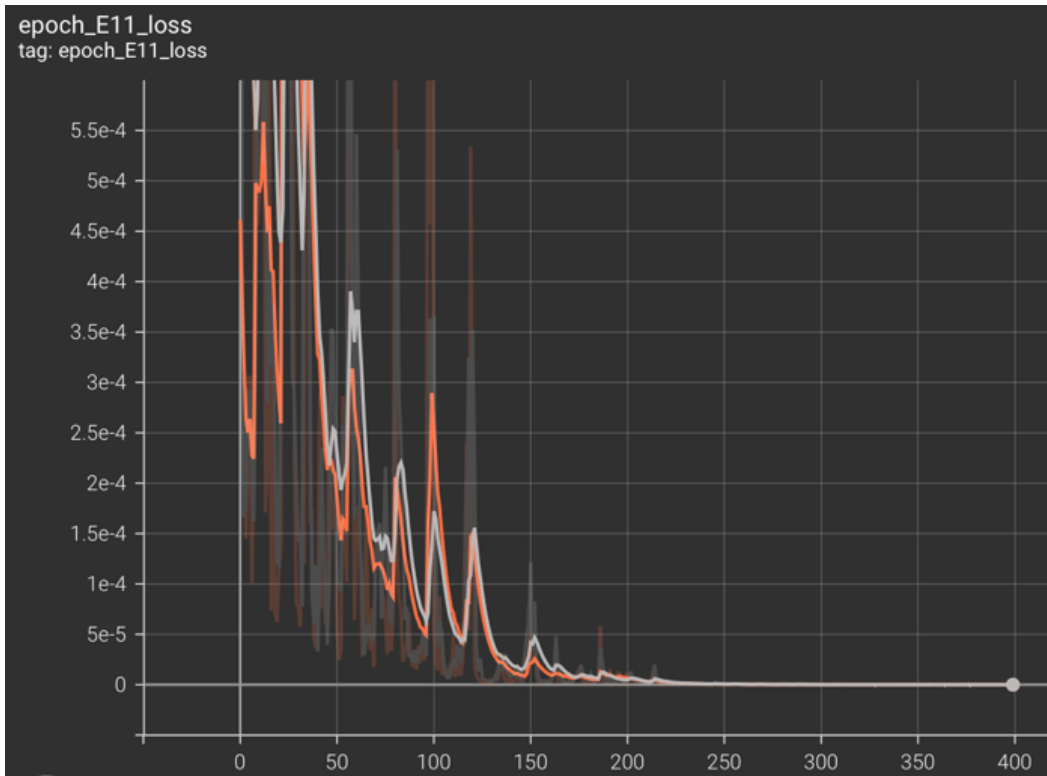
Σχήμα 3: Νευρωνικό δίκτυο

4.4 Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου με βάση το μοντέλο ABAQUS

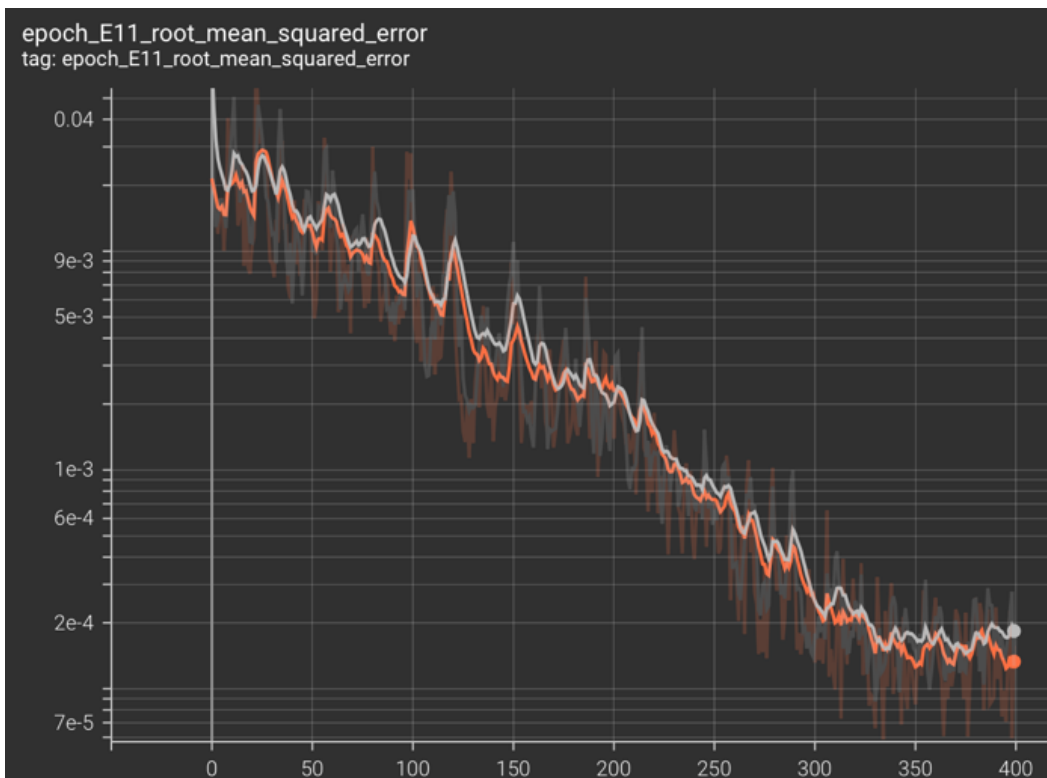
4.4.1 Μετασχηματισμός δεδομένων

Έγιναν προσπάθειες εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου με αλλαγές παραμέτρων με σκοπό τον εντοπισμό της βέλτιστης διάταξης. Μετά από

δοκιμές με τα αρχικά δεδομένα, κρίθηκε αναγκαία η μετατροπή τους σε μεγαλύτερη τάξη μεγέθους καθώς ήταν πολύ δύσκολο να γίνει σωστός υπολογισμός των σφαλμάτων και των απωλειών για τόσο μικρά νούμερα, να σημειωθεί ότι η απαιτούμενη ακρίβεια για τα δεδομένα για την παραμόρφωση E11 ήταν τάξης μεγέθους 0.0001. Τελικά, έγινε πολλαπλασιασμός των δεδομένων εξόδου με το 1000, έτσι ώστε να έρθουν σε μια πιο δόκιμη αριθμητική μορφή για αυτή την διαδικασία, αυτό όμως σημαίνει ότι το νευρωνικό δίκτυο θα δίνει προβλέψεις σε άλλη τάξη μεγέθους, οι οποίες πρέπει να διαιρούνται με 1000, έτσι ώστε να έρχονται πάλι στα επιθυμητά επίπεδα και να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα, ακόμα και όταν τα μετρητικά ήταν καλά για το E11 οι προβλέψεις δεν ανταποκρίνονταν στην πραγματικότητα. Για παράδειγμα, στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ικανοποιητική η διαδικασία της εκπαίδευσης. Με πορτοκαλί γραμμή συμβολίζονται τα αποτελέσματα του validation set και με άσπρο τα αποτελέσματα του training set. Οι γραμμές με έντονα χρώματα είναι μετά από smoothing ενώ οι αχνές είναι τα πραγματικά δεδομένα, έμφαση δίνεται όμως στα δεδομένα μετά από smoothing καθώς είναι πιο ευανάγνωστα και δίνουν καλή εικόνα για την κατάσταση της εκπαίδευσης. Παρόλα αυτά, οι προβλέψεις που έδινε το νευρωνικό δίκτυο δεν ανταποκρίνονταν στην πραγματικότητα.



Σχήμα 5: Διάγραμμα συνάρτησης απώλειας-εποχών για E11



Σχήμα 4: Διάγραμμα μετρητικών-εποχών για E11

4.4.2 Επιλογή συνάρτησης απωλειών και μετρητικής συνάρτησης

Επιπλέον για την σωστή και αποτελεσματική παρακολούθηση της εκπαίδευσης επιλέχθηκε να γίνει χρήση του μέσου σχετικού ποσοστιαίου σφάλματος ως μετρητικού με σκοπό την εύκολη κατανόηση του επιπέδου των σφαλμάτων κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης. Όσον αφορά την συνάρτηση απώλειας έγινε επιλογή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, που είναι μια πολύ συνηθισμένη και αποδοτική επιλογή για αριθμητικά δεδομένα. Σε γενικές γραμμές η συνάρτηση απωλειών πρέπει να είναι ευκολά υπολογίσιμη ενώ η συνάρτηση για τα μετρητικά πρέπει να δίνει στον χρήστη μια καλή εικόνα για την κατάσταση του δικτύου, ως εκ τούτου είναι σημαντικό η μετρητική συνάρτηση να δίνει σφάλμα σε κλίμακα που κατανοεί ευκολά ο χρήστης, άρα από την στιγμή που τα δεδομένα είναι πολλαπλασιασμένα με 1000 το μέσο σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα είναι η καλύτερη επιλογή καθώς από την φύση της η συνάρτηση αυτή απορροφάει την αριθμητική διαφορά.

4.4.3 Εκπαίδευση και βέλτιστες παράμετροι εκπαίδευσης

Πέρα από την αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου που είναι πολύ σημαντική για την σωστή εκπαίδευση του και την ικανότητα του να δώσει σωστές και ικανοποιητικές προβλέψεις, πολύ σημαντικό ρόλο διαθέτουν επίσης οι παράμετροι της εκπαίδευσης όπως ο αριθμός εποχών και το μέγεθος του 'πακέτου'(batch size) που θα χρησιμοποιείται σε κάθε εποχή. Γνωρίζοντας από τις προηγούμενες δοκιμές ότι το συγκεκριμένο νευρωνικό δίκτυο με τα συγκεκριμένα δεδομένα δεν απαιτεί πολύ χρόνο για την εκπαίδευση του, πάρθηκε η απόφαση η εύρεση των βέλτιστων αυτών παραμέτρων να γίνει με πολλές δοκιμές. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα python script, το οποίο εκπαίδευε το νευρωνικό δίκτυο κάθε φορά αλλάζοντας τις εξής παραμέτρους και αποθήκευε για κάθε εκπαίδευση χαρακτηριστικά δεδομένα για την τελική κατάσταση του δικτύου, όπως metrics για τα δεδομένα επικύρωσης και τα αποτελέσματα του της συνάρτησης απώλειας για τα τελευταία βήματα. Επιπλέον για κάθε εκπαίδευση έγινε αποθήκευση των callbacks για επισκόπηση με TensorBoard.

1. Αριθμός νευρώνων στα πυκνά επίπεδα
Δοκιμή για 10,50,100,150,200.
2. Αριθμός εποχών
Δοκιμή για 50, 200, 600, 800.
3. Αριθμός δειγμάτων (batch size)
Δοκιμή για 1, 10, 100.

Δηλαδή η διαδικασία της εκπαίδευσης εκτελέστηκε 60 φορές για διαφορετικές παραμέτρους. Επιπλέον, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου στόχος είναι η μέγιστη δυνατή ακρίβεια και πιστότητα των προβλέψεων κυρίως για το E11, εφόσον το εργαλείο κάνει χρήση μόνο της παραμόρφωσης του αγωγού για τον υπολογισμό της βέλτιστης χάραξης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων των προβλέψεων του δικτύου με της πραγματικές τιμές, ο έλεγχος γίνεται με βάση το test set το οποίο, αποτελείται από δεδομένα που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία της εκπαίδευσης. Τα ονόματα των δοκιμών αντιπροσωπεύουν τις ανάλογες παραμέτρους για τις οποίες γίνονται οι δοκιμές, δηλαδή: `_L_E_B`, όπου L=hidden layers, E=Epoch και B=Batch size. Τα σφάλματα για τα U1,U2 είναι υπολογισμένα ως root mean squared error ενώ τα σφάλματα για την παραμόρφωση E11 είναι υπολογισμένα σε mean absolute percentage error.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα δοκιμών

ID	U1 rmse	U2 rmse	E11 mape
_10_600_1	0.087013931	0.14712279	0.32172891
_150_800_1	0.015914797	0.020636	0.35626179
_100_800_1	0.017582954	0.01884318	0.42725945
_200_600_1	0.018885553	0.02838532	0.45585582
_10_800_1	0.081550438	0.10968179	0.5091902
_50_800_1	0.024266827	0.08217967	0.68185586
_100_600_1	0.023418064	0.05731539	0.76683503
_150_600_1	0.020447229	0.0172218	0.78655416
_200_800_1	0.013456656	0.01108839	1.17804146

ID	U1 rmse	U2 rmse	E11 mape
_150_800_10	0.060513447	0.07580441	1.24041522
_100_200_1	0.081092575	0.10226795	1.25596511
_150_600_10	0.090457634	0.11398174	1.30677545
_10_800_10	0.580932739	0.05228291	1.43792498
_200_200_1	0.068596382	0.08540788	1.53425908
_50_600_1	0.038593697	0.11159951	1.77469254
_50_200_1	0.083744202	0.12528563	1.9122107
_10_200_1	0.075096474	0.05932187	2.00234914
_100_50_1	0.095992828	0.06497209	2.0845592
_150_200_10	0.413780579	0.10656225	2.08674788
_100_600_10	0.120785988	0.13275232	2.26260877
_100_800_10	0.079637627	0.12121259	2.29836822
_10_600_10	0.709248474	0.0425699	2.37586331
_50_800_10	0.101681656	0.10729865	2.44561243
_50_600_10	0.139920609	0.13328604	2.4704864
_150_200_1	0.071035118	0.12319655	2.53329897
_200_600_10	0.076755035	0.07631573	2.69835067
_200_200_10	0.334521271	0.11987386	2.72935557
_200_800_10	0.046992233	0.06897864	2.77237821
_200_800_100	0.676660767	0.07589358	2.84300303
_100_200_10	0.592014526	0.07020074	2.90601611
_150_800_100	0.726672791	0.06088271	2.93289304
_150_50_1	0.081909996	0.09631575	3.06121445
_50_200_10	0.661229675	0.04036519	3.18193054
_50_800_100	0.847494507	0.05605223	3.30165839
_200_600_100	0.788164978	0.05334151	3.45575953
_150_600_100	0.818633362	0.05176317	3.4675262
_100_800_100	0.824854492	0.04902629	3.52185798
_10_200_10	0.908443665	0.06347253	3.60186625
_200_50_1	0.083329376	0.10796173	4.19087315
_50_600_100	0.890785095	0.06097424	4.29403973
_100_600_100	0.876603027	0.05442637	4.43660975
_10_50_1	0.808004883	0.0607877	4.47403193
_50_50_1	0.181709503	0.03426736	5.01470423
_200_50_10	0.883037842	0.05601635	5.7395668
_150_50_10	0.898649902	0.05947232	5.85412741
_10_800_100	0.936258789	0.06863322	7.3449893
_100_50_10	0.917187927	0.06374197	8.62805939
_50_50_10	0.924476929	0.0661822	10.4035921
_10_600_100	0.940090271	0.06962497	10.6506577

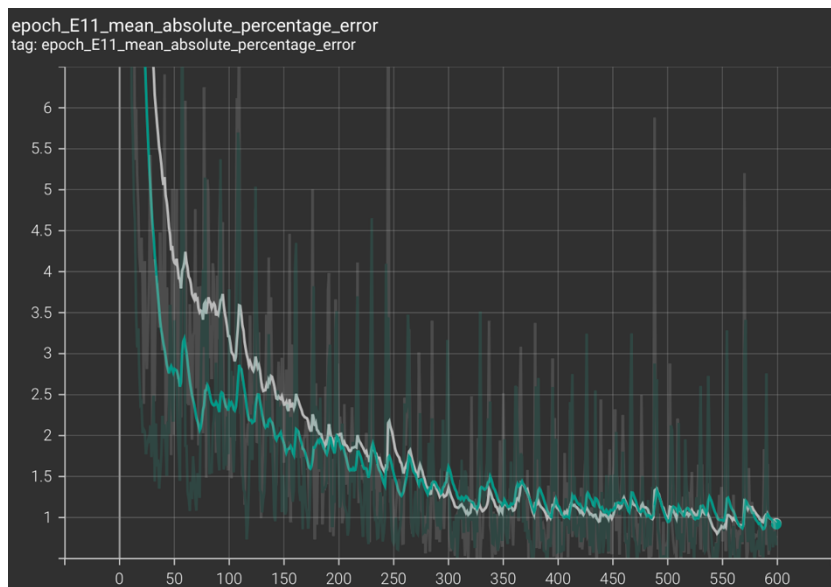
ID	U1 rmse	U2 rmse	E11 mape
_200_200_100	0.929296936	0.06686933	11.7687912
_150_200_100	0.932697388	0.06754366	11.9402637
_50_200_100	0.940118652	0.06939728	13.1305237
_100_200_100	0.938667236	0.06897173	14.8939714
_10_50_10	0.943041687	0.07049947	21.0158749
_200_50_100	0.944614929	0.07070142	26.1198273
_10_200_100	0.945001953	0.07107706	28.1295815
_150_50_100	0.944817261	0.07077892	32.4792099
_100_50_100	0.945288147	0.07100015	44.2570572
_10_50_100	0.946253601	0.07153062	60.9127312
_50_50_100	0.945213562	0.07107359	61.7455215

Μετά από την εκτέλεση του παραπάνω script έγινε τροποποίηση των δεδομένων με σκοπό την καλύτερη οργάνωση και διαχείριση τους. Μετά από επισκόπηση των δεδομένων και μερικές δοκιμές, αποφασίστηκε ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με τις εξής παραμέτρους:

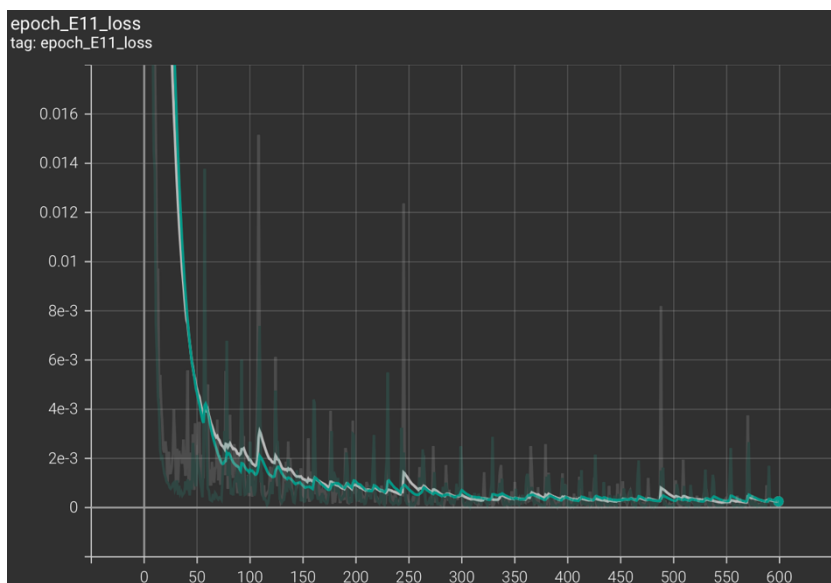
1. Αριθμός νευρώνων στα πυκνά επίπεδα: 200
2. Αριθμός εποχών: 600
3. Αριθμός δειγμάτων (batch size): 1

Σε αντίθεση με τα δεδομένα που φαίνεται να δείχνουν πως μια διάταξη τύπου 10_800_1 δίνει καλύτερες προβλέψεις, είναι συχνό φαινόμενο όταν οι νευρώνες του πυκνού επιπέδου είναι λίγοι σε αριθμό να παρουσιάζεται overfitting όπως και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Overfitting αποκαλείται η κατάσταση κατά την οποία το νευρωνικό δίκτυο είναι πολύ καλό στο να δίνει προβλέψεις για τα δεδομένα εκπαίδευσης του αλλά ταυτόχρονα χάνει την δυνατότητα να δίνει καλές προβλέψεις για δεδομένα μέσα στο εύρος των δεδομένων εκπαίδευσης αλλά εκτός αυτών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρόλο που για το test set υπολογίστηκε μέσο σφάλμα 0.3% στα δεδομένα εκπαίδευσης το νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζει 1% καλύτερη συμπεριφορά στο training set από ότι στο validation set ενώ για την διάταξη _200_600_1 η διαφορά αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0.1%-0.2% στις τελευταίες εποχές της εκπαίδευσης. Αυτό σε συνδυασμό με μέσο σφάλμα στο test set της μορφής 0.5% ήταν αρκετό για να κριθεί καλύτερη η διάταξη

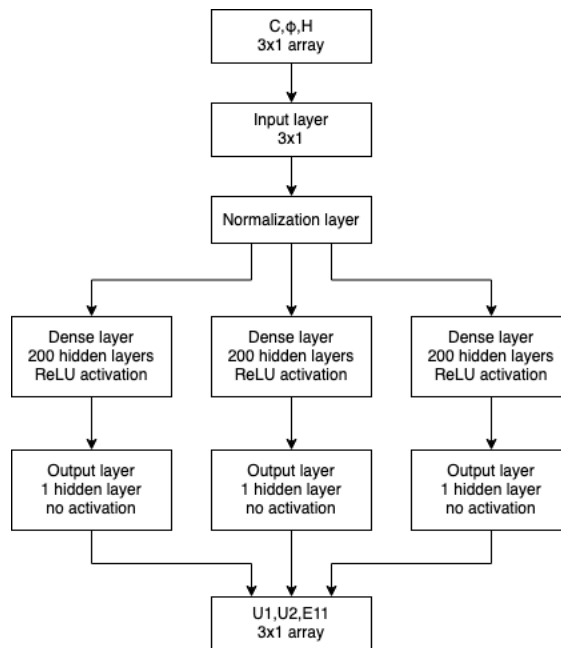
_200_600_1. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα κατά την εκπαίδευση των συναρτήσεων απωλειών και των μετρητικών, με γκρι φαίνονται τα αποτελέσματα για validation set και με πράσινο το training set, οι γραμμές με έντονα χρώματα είναι μετά από smoothing ενώ οι αχνές είναι τα πραγματικά δεδομένα, έμφαση δίνεται όμως στα δεδομένα μετά από smoothing καθώς είναι πιο ευανάγνωστα και δίνουν καλή εικόνα για την κατάσταση της εκπαίδευσης.



Σχήμα 6: Διάγραμμα σφάλμα προβλέψεων-εποχή σε Training και Testing datasets



Σχήμα 7: Διάγραμμα Απώλεια-εποχή σε Training και Testing datasets



Σχήμα 8: Αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου

4.4.4 Τελική εκπαίδευση και έλεγχος

Με τις παραπάνω παραμέτρους έγινε εκ νέου εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με πιο στενή επίβλεψη και με πιο άμεσο έλεγχο των αποτελεσμάτων μέσω των μετρητικών και των διαγραμμάτων που προσφέρει το TensorBoard. Επιπλέον, έγινε έλεγχος με βάση το validation set. Τα τελικά σφάλματα για την παραμόρφωση του αγωγού κυμαίνονται από 0.6%-1% σε training, test και validation sets.

4.5 Προετοιμασία δεδομένων εισόδου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κομμάτι της διπλωματικής για την λειτουργία του εργαλείου είναι απαραίτητο να του δοθούν συγκεκριμένα δεδομένα με συγκριμένη μορφή. Πιο συγκεκριμένα το υπολογιστικό εργαλείο δέχεται 8 αρχεία.

1. Αρχείο για πληροφορίες βαθυμετρίας (raster)

Το αρχείο αυτό είναι ένα γεωαναφερμένο αρχείο raster στο οποίο η τιμή κάθε pixel αντιπροσωπεύει το μέσο βάθος της περιοχής που αυτό καλύπτει. Για την κατασκευή αυτού του αρχείου έγινε χρήση

πολυγωνικών δεδομένων των οποίων έγινε ψηφιοποίηση για την παραγωγή ενός αρχικού αρχείου raster με βάση το οποίο δημιουργήθηκε το τελικό ψηφιακό μοντέλο βαθυμετρίας με την χρήση της μεθόδου `r.surf.contour` του GRASS GIS. Το τελικό αρχείο έχει χωρική ανάλυση 680*680 μέτρα αλλά το εργαλείο δεν θέτει περιορισμούς για την χωρική ανάλυση.

2. Αρχείο για πληροφορίες κλίσεων (raster)

Το αρχείο με τις κλίσεις παράχθηκε με βάση το ψηφιακό μοντέλο βαθυμετρίας χρησιμοποιώντας την μέθοδο `r.slope.aspect` του GRASS GIS. Το αρχείο αυτό περιέχει σε κάθε pixel την κλίση επί τις εκατό που αντιπροσωπεύει την περιοχή που αυτό καλύπτει. Διαθέτει τα ίδια χωρικά χαρακτηριστικά με το αρχείο της βαθυμετρίας καθώς αποτελεί στην ουσία ένα προϊόν αυτού.

3. Αρχείο με σημείο έναρξης χάραξης (vector)

Πρόκειται για ένα απλό αρχείο τύπου `shapefile` το οποίο περιέχει ένα μόνο σημείο από το οποίο θα ξεκινήσει η χάραξη. Το αρχείο είναι σε μορφή `shapefile`.

4. Αρχείο με σημείο τερματισμού χάραξης (vector)

Πρόκειται για ένα απλό αρχείο τύπου `shapefile` το οποίο περιέχει ένα σημείο στο οποίο θα λήξει η χάραξη. Δίνεται η δυνατότητα να δοθεί πάνω από ένα σημείο τερματισμού, στην περίπτωση αυτή, το εργαλείο τερματίζει στο σημείο για το οποίο η βέλτιστη χάραξη έχει μικρότερο συνολικό κόστος. Το αρχείο είναι σε μορφή `shapefile`.

5. Αρχείο με πληροφορίες για τα ρήγματα (vector)

Το αρχείο αυτό περιέχει σε μορφή γραμμών τα γνωστά ρήγματα της περιοχής μελέτης καθώς και διάφορα χρήσιμα χαρακτηριστικά τους σε μορφή `attributes`. Το αρχείο είναι σε μορφή `shapefile`.

6. Αρχείο με πληροφορίες για τα εδαφικά χαρακτηριστικά ανά σημείο (vector)

Στο αρχείο αυτό εμπεριέχονται σημεία με γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά, καθώς και τα εδαφικά χαρακτηριστικά αυτά σε μορφή attributes. Το αρχείο είναι σε μορφή shapefile είτε σε μορφή csv στο οποίο θα περιέχονται και οι συντεταγμένες των σημείων σε σύστημα αναφοράς WGS84.

(Ενδεικτική εικόνα)

7. Αρχείο με το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο (.h5)

Στο αρχείο αυτό εμπεριέχεται το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο και πρόκειται για αρχείο της μορφής HDF5 (.h5). Το αρχείο μπορεί να είναι και της μορφής TensorFlow SavedModel format.

8. Αρχείο με απροσπέλαστες περιοχές

4.6 Κατασκευή γραφικής διεπαφής χρήστη GUI

4.6.1 Γενικά για το GUI

Για την ευκολότερη χρήση του εργαλείου κατασκευάστηκε μια απλή διεπαφή χρήστη χρησιμοποιώντας το tk GUI toolkit με την βιβλιοθήκη Tkinter της python. Για τις ανάγκες της εργασίας κατασκευάστηκε ένα απλό GUI μεγέθους 550*250 pixel στο οποίο εμπεριέχονται κουμπιά (buttons) για τις ανάλογες διεργασίες του αλγορίθμου, (entries) για την εισαγωγή αριθμητικών παραμέτρων και ετικέτες (labels). Το GUI αποτελείται από ένα μόνο παράθυρο. Επιπλέον είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλα τα "εξαρτήματα" του GUI που είναι ορατά στον χρήστη ονομάζονται widgets.

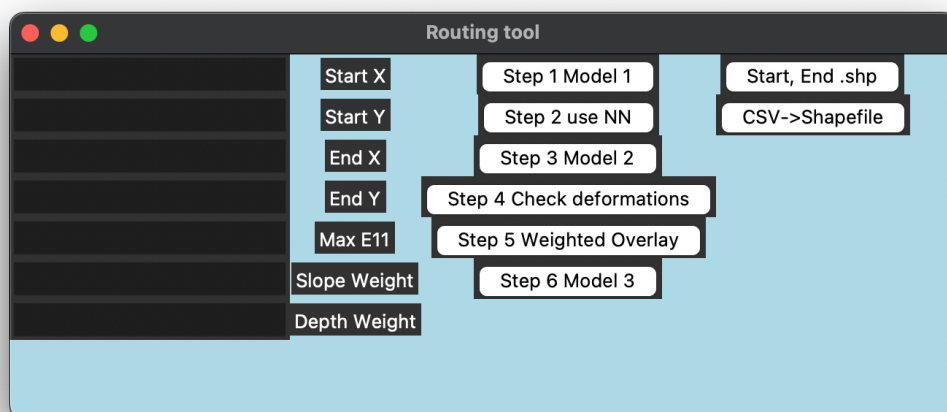
4.6.2 Grid

Για την τοποθέτηση των διάφορων widget έγινε χρήση ενός καμβά με βάση τον οποίο, μπορούν να τοποθετηθούν με συγκεκριμένο και οργανωμένο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα κάθε οντότητα τύπου widget διαθέτει ενσωματωμένη συνάρτηση (grid(row= , column =)) για την τοποθέτηση της στην διεπαφή με βάση τον καμβά. Για να κληθεί αυτή η συνάρτηση αρκεί να κληθεί μέσω της ανάλογης οντότητας και να δοθούν

ως παράμετροι οι γραμμή και η στήλη του κανάβου στις οποίες είναι επιθυμητό να τοποθετηθεί η οντότητα. Σε περίπτωση που κάποια οντότητα έχει τοποθετηθεί εκτός των υπόλοιπων και υπάρχουν κενά στον κανάβο τότε αυτόματα το toolkit τοποθετεί την οντότητα στην πιο κοντινή ελεύθερη θέση προς την κατεύθυνση της ορισμένης από τον προγραμματιστή θέσης.

4.6.3 Τελική διεπαφή

Για την σωστή λειτουργία του εργαλείου πρέπει ο χρήστης να έχει την δυνατότητα να επικοινωνήσει κάποιες παραμέτρους στο εργαλείο. Για την ακρίβεια ζωτικής σημασίας για την σωστή εκτέλεση του εργαλείου είναι να μπορεί ο χρήστης να δώσει την μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του αγωγού καθώς και τα βάρη για την εκτέλεση του Weighted overlay. Δευτερευόντως έγιναν τροποποιήσεις στο εργαλείο με σκοπό την αύξηση της ευελιξίας του εργαλείου, συγκεκριμένα είναι δυνατό ο χρήστης να δίνει στο εργαλείο κάθε φορά τις συντεταγμένες των σημείων προέλευσης και προορισμού της χάραξης και το εργαλείο να αναλαμβάνει την παραγωγή των αρχείων shapefile. Για να καλύψει τις ανάγκες αυτές η διεπαφή διαθέτει συνολικά 22 widgets τα οποία χωρίζονται στα εξής: 7 ετικέτες, 7 entries και 8 κουμπιά.

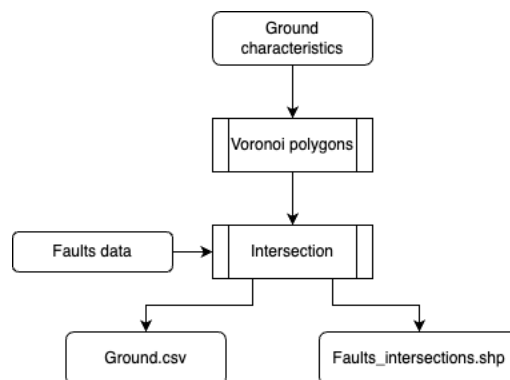


Εικόνα 7: Διεπαφή χρήστη εργαλείου

4.7 Μοντέλα QGIS

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης χάραξης χρειάζεται να γίνει χρήση εργαλείων ενσωματωμένων στο QGIS. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα κατασκευής εκτελέσιμων μοντέλων στο περιβάλλον του QGIS. Συγκεκριμένα έγινε κατασκευή 3 γραφικών μοντέλων που αναπαριστούν διαφορετικά κομμάτια του αλγόριθμου για τον υπολογισμό της βέλτιστης χάραξης.

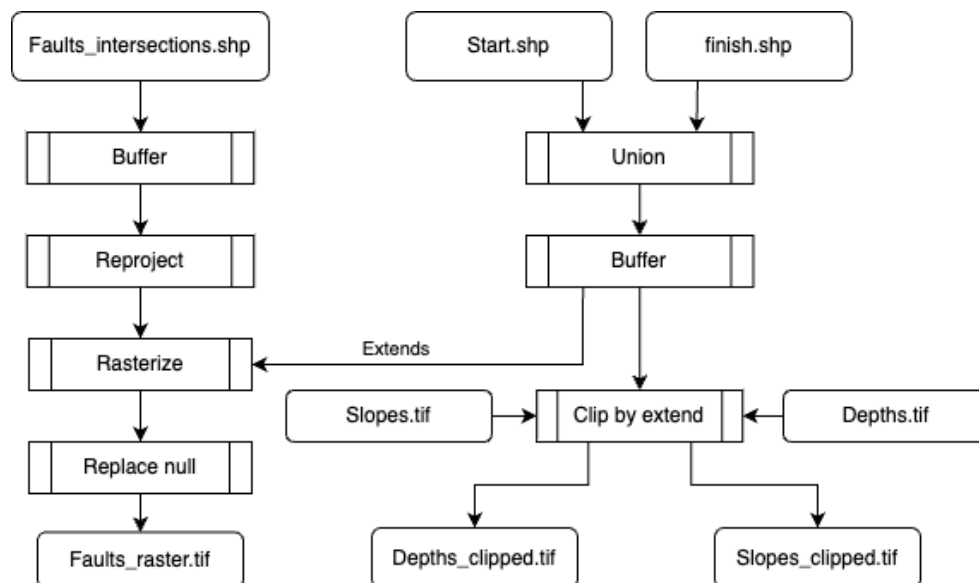
Το πρώτο μοντέλο έχει σκοπό την κατασκευή πολύγωνων επιρροής για κάθε σημείο με γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά, την εκτέλεση του εργαλείου intersection για τα πολύγωνα επιρροής και τα αρχείο των ρηγμάτων και την καταχώρηση των τιμών των γνωστών εδαφικών χαρακτηριστικών μαζί με ένα ID για κάθε σημείο σε ένα αρχείο csv. Το ID είναι μοναδικό για κάθε ένα σημείο και αυτό είναι πολύ σημαντικό για την σωστή χρήση του νευρωνικού δικτύου και την σωστή καταχώρηση των προβλέψεων του στο αρχείο shapefile που περιέχει τα ρήγματα και τα εδαφικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται δηλαδή όπως τα κλειδιά χρησιμοποιούνται στις σχεσιακές βάσεις δεδομένων.



Σχήμα 9: Διάγραμμα διεργασιών πρώτου μοντέλου QGIS

Το δεύτερο μοντέλο έχει στόχο την αρχική κατασκευή του cost raster καθώς και των ορισμό της περιοχής μελέτης ανάλογα με τα δεδομένα που δίνονται και εκτελείται μετά την καταχώριση των προβλέψεων του νευρωνικού δικτύου στο shapefile των ρηγμάτων. Πιο αναλυτικά το μοντέλο διαθέτει τρεις κύριους αλγόριθμους. Ο πρώτος αλγόριθμος

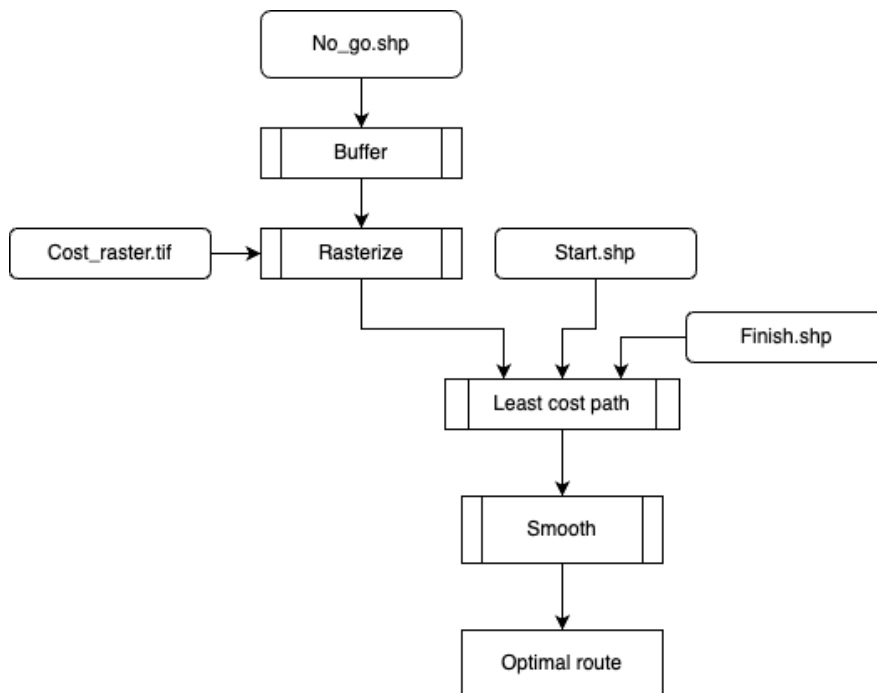
αναλαμβάνει τον ορισμό της περιοχής μελέτης δημιουργώντας αρχικά μια ένωση των επιπέδων που περιέχουν τα σημεία προέλευσης και προορισμού της χάραξης και έπειτα με την χρήση του εργαλείου buffer ορίζεται μια ζώνη γύρω από τα σημεία αρκετά μεγάλη της οποίας τα extends τελικά χρησιμοποιούνται σαν τα όρια της περιοχής μελέτης. Ο δεύτερος αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα όρια της περιοχής μελέτης που υπολόγισε ο πρώτος αλγόριθμος καθώς και το shapfile των ρηγμάτων για να κατασκευάσει ένα raster αρχείο στο οποίο εμπεριέχονται ψηφιοποιημένα τα ρήγματα υπό την μορφή υπολογισμένων παραμορφώσεων ανά pixel ενώ στα υπόλοιπα pixel καταχωρείται η τιμή 1. Αυτό το raster αποτελεί ουσιαστικά την αρχική βασική μορφή του cost raster πάνω στην οποία θα χτιστεί το τελικό cost raster. Ο τρίτος αλγόριθμος αναλαμβάνει την αποβολή άχρηστων πληροφοριών από το μοντέλο βαθυμετρίας και το raster των κλίσεων, αυτό επιτυγχάνεται με την αφαίρεση από τα δύο raster αρχεία των περιοχών εκτός της περιοχής μελέτης με την χρήση του εργαλείου clip raster by extend.



Σχήμα 10: Διάγραμμα διεργασιών δεύτερου μοντέλου QGIS

Το τρίτο μοντέλο δέχεται το cost raster αρχείο, ένα αρχείο το οποίο περιέχει απροσπέλαστες περιοχές καθώς και τα σημεία προέλευσης και προορισμού της χάραξης. Με αυτά τα δεδομένα ο αλγόριθμος του μοντέλου αναλαμβάνει την δημιουργία μιας ζώνης buffer γύρω από τις απροσπέλαστες περιοχές τις οποίες γράφει στο cost raster layer με πολύ υψηλό κόστος. Τέλος εκτελεί το εργαλείο least cost path δίνοντας του

τα σημεία προέλευσης προορισμού της χάραξης και το τελικό cost raster layer.



Σχήμα 11: Διάγραμμα διεργασιών τρίτου μοντέλου QGIS

4.8 Python scripts

4.8.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της εργασίας ο κώδικας του εργαλείου είναι γραμμένος σε python. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν τα python scripts και οι λειτουργίες τους. Γενικά για την λειτουργία του προγράμματος γράφτηκαν συνολικά 6 scripts, 2 από αυτά είναι έχουν σκοπό την εκτέλεση των 2 μεγαλύτερων μοντέλων του QGIS, 1 από αυτά είναι βοηθητικό και εξυπηρετεί την μετατροπή csv σε shp, 1 συγκρατεί τις διευθύνσεις και τα ονόματα των αναγκαίων αρχείων στο σύστημα αρχείων του υπολογιστή, τα 2 τελευταία αποτελούν τα πιο βασικά script του εργαλείου, το πρώτο διαχειρίζεται την διεπαφή χρήστη, την εκτέλεση των υπόλοιπων scripts καθώς και κάποια βοηθητικά εργαλεία, το δεύτερο διαχειρίζεται την χρήση του νευρωνικού δικτύου και την σωστή καταχώριση των προβλέψεων. Τα βασικά script για την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι τα παρακάτω:

1. CSV_to_shp.py

Το script αυτό αναλαμβάνει την μετατροπή ενός αρχείου CSV της μορφής:

```
C,F,H,id,X,Y
```

```
...
```

```
C,F,H,id,X,Y
```

Σε αρχείο shaperefile όπου οι συντεταγμένες των σημείων ορίζονται από τις στήλες X και Y του αρχείου csv και όπου όλες οι υπόλοιπες στήλες καταχωρούνται ως attributes για κάθε σημείο.

2. paths.py

Το script αυτό είναι κατασκευασμένο για να συγκρατεί τις διευθύνσεις και τα ονόματα όλων των χρησιμων αρχείων στο σύστημα αρχείων του υπολογιστή και έχει σκοπό την παραμετροποίηση του εργαλείου και την δυνατότητα της εκτέλεσης του σε πάνω από ένα υπολογιστικό σύστημα.

3. Prediction_maker.py

Η βασική λειτουργία αυτού του script είναι να διαβάσει τα εδαφικά χαρακτηριστικά από το csv που έφτιαξε το δεύτερο μοντέλο του QGIS και να χρησιμοποιήσει το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για να υπολογίσει τις ανάλογες προβλέψεις και να τις καταχωρήσει οργανωμένα στο shaperefile των ρηγμάτων. Πιο συγκεκριμένα το script αυτό αρχικά διαβάζει τα εδαφικά χαρακτηριστικά για κάθε σημείο μαζί με το διακριτικό τους 'κλειδί' (ID), στη συνέχεια, γίνεται η οργάνωση των δεδομένων σε DataFrame και μετά γίνεται εισαγωγή των εδαφικών χαρακτηριστικών σε πίνακα NumPy. Στη συνέχεια ο πίνακας δίνεται στο νευρωνικό δίκτυο με σκοπό την εξαγωγή προβλέψεων, οι οποίες αποθηκεύονται επίσης σε πίνακα NumPy. Τέλος, οι προβλέψεις οργανώνονται με τα ανάλογα κλειδιά τους και καταχωρούνται σαν attributes στο shaperefile των ρηγμάτων.

4. Interface.py

Το script αυτό αποτελεί τον πυρήνα του εργαλείου, μέσω αυτού καλούνται όλα τα υπόλοιπα scripts αλλά και εργαλεία, επιπλέον το

συγκεκριμένο script διαχειρίζεται την διεπαφή χρήστη και δέχεται όλα τα απαραίτητα από τον χρήστη δεδομένα. Αναλυτικά το script είναι υπεύθυνο για τις εξής λειτουργίες:

1. Διαχείριση GUI
2. Λήψη δεδομένων από χρήστη
3. Εκτέλεση των διάφορων κομματιών του αλγορίθμου όπως:
 1. Δημιουργία shapefile σημείων προέλευσης προορισμού της χάραξης
 2. Εκτέλεση διεργασιών με GDAL (calc και warper)
 3. Κανονικοποίηση αρχείων raster
 4. Εκτέλεση διαδικασίας Weighted Overlay

4.9 Λειτουργία εργαλείου

4.9.1 Προαπαιτούμενα για την χρήση του εργαλείου

Το εργαλείο είναι γραμμένο σε python 3 επομένως το πιο προφανές προαπαιτούμενο είναι η ύπαρξη ενός διερμηνέα python στο υπολογιστικό σύστημα, έχουν γίνει δοκιμές για την έκδοση python 3.9.12 και ως εκ τούτου η συγκεκριμένη έκδοση προτείνεται για την σωστή λειτουργία του εργαλείου αυτού. Επιπλέον, το εργαλείο κάνει χρήση ορισμένων βιβλιοθηκών για την εκτέλεση του, αυτές οι βιβλιοθήκες πρέπει να είναι εγκατεστημένες στο ανάλογο περιβάλλον της python με τον διερμηνέα του οποίου γίνεται η εκτέλεση του εργαλείου. Αυτές οι βιβλιοθήκες είναι οι εξής:

1. GDAL (κομμάτι του osgeo)
2. Pandas
3. Geopandas
4. TensorFlow
5. NumPy
6. Matplotlib

Το περιβάλλον rython για την ανάπτυξη του εργαλείου δημιουργήθηκε μέσω του διαχειριστή πακέτων και περιβαλλόντων rython Miniforge Conda σε λειτουργικό σύστημα Mac OS X και σε λειτουργικό σύστημα Fedora Linux. Παρόλο που η ανάπτυξη έχει γίνει εξ ολοκλήρου σε συστήματα UNIX έχουν γίνει δοκιμές σε υπολογιστικά συστήματα με λειτουργικό σύστημα windows 10.

Τέλος αναγκαίος παράγοντας για την λειτουργία του εργαλείου είναι η ύπαρξη μιας εγκατάστασης του QGIS έκδοσης ανώτερης ή ίσης της 3.22 η όποια διαθέτει την λειτουργία QGIS processing executor. Επιπλέον χρειάζεται η εγκατάσταση του plugin Least-Cost Path.

4.9.2 Βοηθητικές επιλογές

Το εργαλείο πέρα από τις κύριες λειτουργίες του και των βασικό αλγόριθμο του, διαθέτει δύο βοηθητικές λειτουργίες. Η πρώτη αφορά την δημιουργία των αρχείων με τα σημεία προέλευσης προορισμού της χάραξης και η δεύτερη αφορά την δημιουργία του αρχείου με τα σημεία για τα οποία είναι γνωστά τα εδαφικά χαρακτηριστικά. Για τα αρχεία με τα σημεία προέλευσης-προορισμού έχει ενσωματωθεί στο εργαλείο η δυνατότητα να δίνονται από τον χρήστη οι συντεταγμένες των σημείων σε WGS84 και με αυτές το εργαλείο κατασκευάζει μόνο του τα ανάλογα αρχεία shapfile. Για το αρχείο με τα σημεία που περιέχουν τα γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά υπάρχει ενσωματωμένο εργαλείο το οποίο μπορεί να δεχτεί αρχείο της μορφής csv με τα ανάλογα headers και να το μετατρέψει σε αρχείο shapfile μέσα στο οποίο περιέχοντα τα ανάλογα σημεία καθώς και τα γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά σε μορφή attribute. Τα δύο παραπάνω εργαλεία αποτελούν προαιρετικές βοηθητικές για τον χρήστη λειτουργίες.

4.9.3 Βασικός αλγόριθμος του εργαλείου

Για την σωστή εκτέλεση του αλγορίθμου απαιτούνται ορισμένα αρχεία εισόδου καθώς και ορισμένες παράμετροι τα οποία έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο προετοιμασία δεδομένων.

Ο αλγόριθμος του εργαλείου απαρτίζεται από τα εξής 6 βήματα:

1. Σε πρώτη φάση γίνεται υπολογισμός πολύγωνων επιρροής για κάθε σημείο με γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά, αυτό έχει στόχο την ανάθεση εδαφικών χαρακτηριστικών σε όλη την περιοχή μελέτης ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Σε δεύτερη φάση εκτελείται το εργαλείο `intersection` με δεδομένα εισόδου, τα πολύγωνα επιρροής και το `shapfile` με τα δεδομένα των ρηγμάτων, με αυτό τον τρόπο γίνεται εισαγωγή των δεδομένων των εδαφικών χαρακτηριστικών ως `attributes` στα κατάλληλα ρήγματα. Τέλος, γίνεται αποθήκευση των εδαφικών χαρακτηριστικών των ρηγμάτων μαζί με το ID τους σε ένα αρχείο `csv` με σκοπό την μετέπειτα χρήση του νευρωνικού δικτύου.
2. Σε αυτό το βήμα με χρήση του κώδικα στο αρχείο `prediction_maker.py` γίνεται άνοιγμα του αρχείου `csv` του προηγούμενου βήματος καθώς και, του εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου με σκοπό τον υπολογισμό προβλέψεων σχετικά με την παραμόρφωση του αγωγού σε κάθε πιθανή διασταύρωση του αγωγού με κάποιο ρήγμα στην περιοχή μελέτης. Αφού ληφθούν οι προβλέψεις γίνεται αποθήκευση τους στο `shapfile` των ρηγμάτων ως `attributes`, με χρήση του ID.

Να σημειωθεί ότι εφόσον οι παραπάνω διεργασίες δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη ανάγκη από υπολογιστική άποψη, ως περιοχή μελέτης μέχρι τώρα θεωρείται όλη η περιοχή για την οποία υπάρχουν δεδομένα εδαφικών χαρακτηριστικών.

3. Με βάση τα σημεία προέλευσης και προορισμού της χάραξης που έχουν δοθεί γίνεται ορισμός της περιοχής μελέτης και εκκαθάριση άχρηστων δεδομένων. Με την περιοχή μελέτης ορισμένη γίνεται η δημιουργία ενός βασικού cost raster αρχείου στο οποίο είναι χαραγμένα τα ρήγματα με χρήση του εργαλείου rasterize (overwrite with attribute), στο οποίο ως attribute δόθηκε η προβλεπόμενη παραμόρφωση αγωγού σε περίπτωση διασταύρωσης.
4. Με χρήση της GDAL και συγκεκριμένα του εργαλείου GDAL_calc.py γίνεται μια σύγκριση των τιμών pixel με την μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση, την οποία ορίζει κάθε φορά ο χρήστης, και σε περίπτωση που η τιμή του pixel είναι ίση ή μεγαλύτερη από αυτή τότε στο pixel δίνεται μια πολύ μεγάλη τιμή (10000), η οποία αντιπροσωπεύει το κόστος για την διαστάρωση του αγωγού με το pixel αυτό. Σε περίπτωση όμως που η αρχική τιμή του pixel δηλαδή η προβλεπόμενη παραμόρφωση είναι μικρότερη από την μέγιστη παραμόρφωση τότε δεν αλλάζει η τιμή του pixel.

Η εντολή με την οποία καλείται το εργαλείο gdal_calc.py για να κάνει την παραπάνω σύγκριση είναι η εξής:

```
gdal_calc.py --calc="(A>=E11)*10000 outfile=" +  
paths.raster_step_two + "-A "+paths.raster_step_one+" --  
A_band=1 --overwrite --type=Float32
```

όπου E11 είναι η τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης που έχει δώσει ο χρήστης μέσω του GUI.

5. Σε αυτό το βήμα γίνεται κανονικοποίηση των τιμών των pixel των αρχείων raster που περιέχουν τα βάθη και τις κλίσεις. Στη συνέχεια, γίνεται μετασχηματισμός των αρχείων raster με σκοπό να είναι συμβατά για την χρήση του εργαλείου gdal_calc.py. Για την εκτέλεση υπολογισμών με το εργαλείο gdal_calc.py είναι αναγκαίο τα αρχεία raster να έχουν ακριβώς ίδιες διαστάσεις, για

να επιτευχθεί αυτό γίνεται χρήση της συνάρτησης warp της βιβλιοθήκης GDAL το οποίο μετασχηματίζει και τα δύο αρχεία raster και τους δίνει τις διαστάσεις και την χωρική ανάλυση του αρχείου cost raster. Τέλος, γίνεται υπολογισμός του weighted overlay με τον εξής τύπο:

$$K_Βάθη * B_Βαθών + K_Κλίσεις * B_Κλίσεων + Cost_raster$$

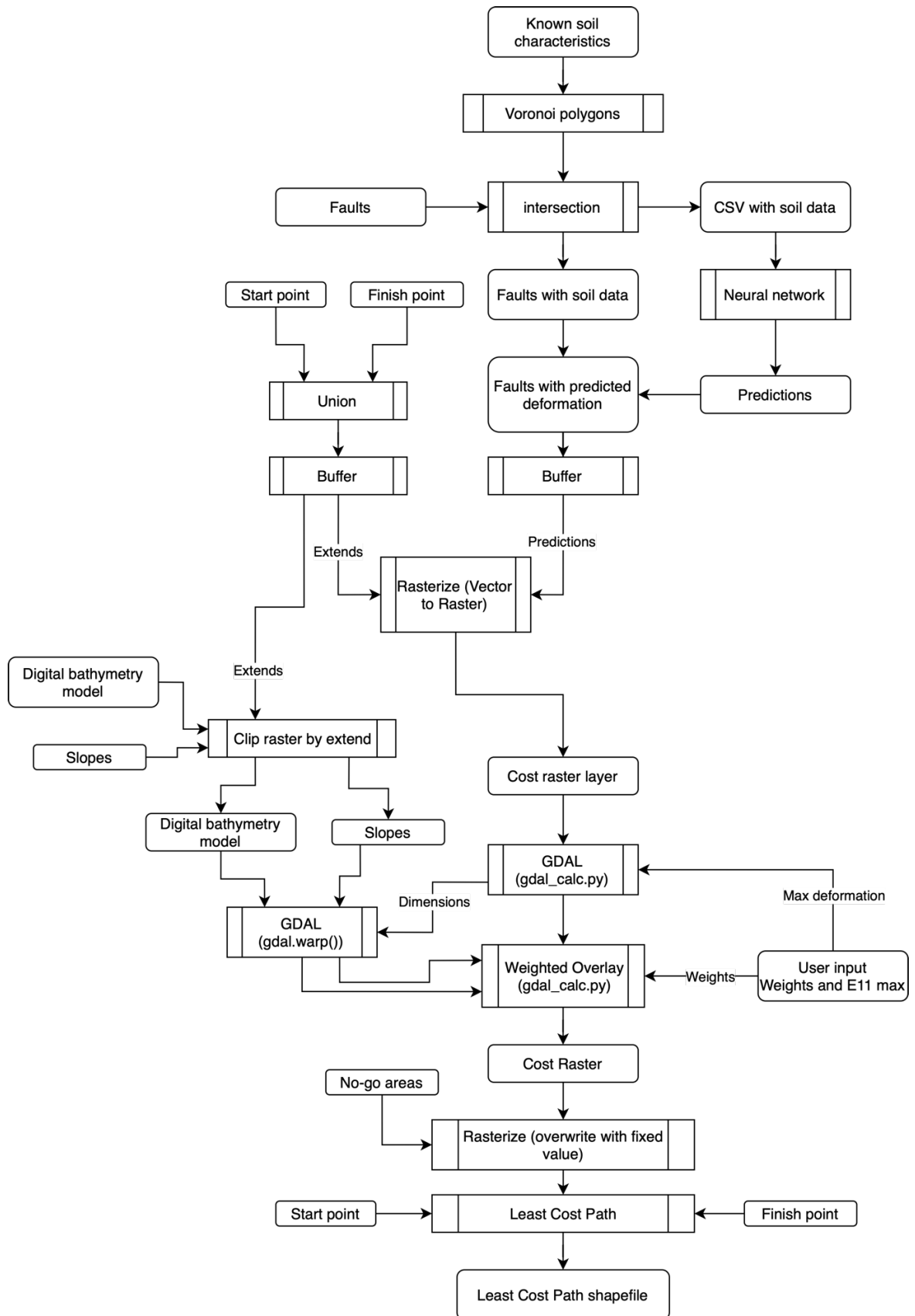
Όπου K_Βάθη είναι το αρχείο με τα κανονικοποιημένα βάθη, το K_Κλίσεις είναι το αρχείο με τις κανονικοποιημένες κλίσεις και τα B_Βαθών, B_Κλίσεων είναι τα ανάλογα βάρη.

Το αποτέλεσμα του weighted overlay αποθηκεύεται και αποτελεί το τελικό cost raster αρχείο.

6. Με βάση το τελικό μοντέλο του QGIS γίνεται μια τελευταία τροποποίηση στο cost raster, η οποία συνιστά την εγγραφή των απροσπέλαστων περιοχών στο cost raster αρχείο. Μετά την τελική αυτή τροποποίηση τα δεδομένα δίνονται στο Least Cost Path plugin του QGIS και αυτό δίνει το βέλτιστο μονοπάτι σε αρχείο shapefile. Τέλος, στο μονοπάτι αυτό γίνεται πέρασμα με έναν smoothing αλγόριθμο και το αποτέλεσμα του αλγόριθμου αυτού αποθηκεύεται ως η βέλτιστη τελική χάραξη.

Το εργαλείο δηλαδή έχει την δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη τα εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής, τα βάθη αλλά και τις κλίσεις και τέλος, τα γνωστά ρήγματα της περιοχής και μέσω των παραμέτρων που ορίζει κάθε φορά ο χρήστης μπορεί να δίνει την βέλτιστη χάραξη για τα δεδομένα που δόθηκαν.

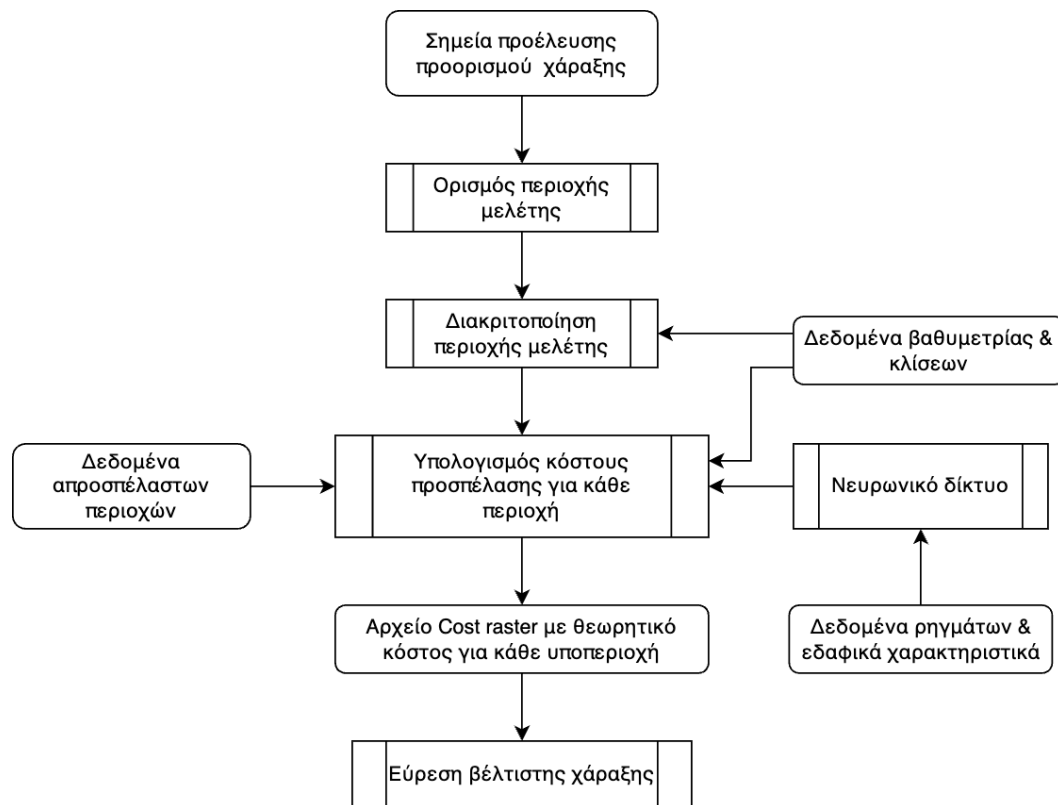
4.9.4 Αναλυτικό διάγραμμα ροής αλγορίθμου



Σχήμα 12: Αναλυτικό διάγραμμα ροής

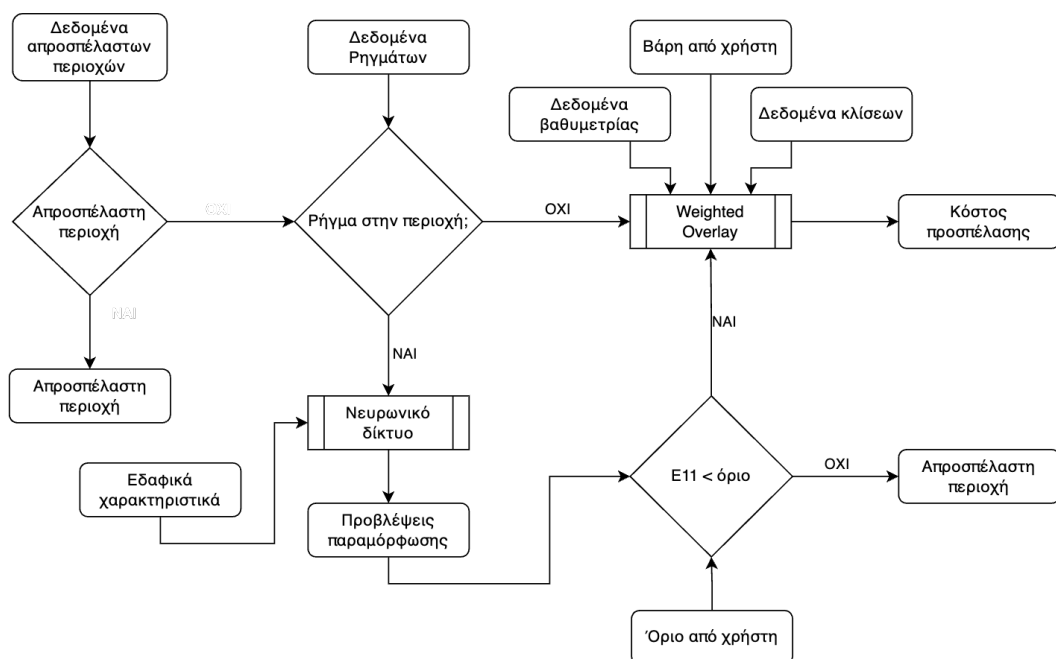
4.9.5 Εξήγηση λογικής αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος σε πρώτη φάση ορίζει την περιοχή μελέτης με βάση τα σημεία έναρξης και περάτωσης της χάραξης. Στην συνέχεια, γίνεται διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης σε μικρότερες περιοχές μικρότερων διαστάσεων, ανάλογα με την χωρική ανάλυση των δεδομένων που δίνονται από τον χρήστη. Η διακριτοποίηση γίνεται υπό την μορφή pixel σε αρχείο raster. Έπειτα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής και τις παραμέτρους που δίνει ο χρήστης, γίνεται υπολογισμός του θεωρητικού κόστους προσπέλασης της από τον αγωγό. Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει το μονοπάτι ελάχιστου κόστους με βάση το οποίο δίνει την τελική χάραξη.



Σχήμα 13: Απλό διάγραμμα ροής αλγορίθμου

Όσον αφορά τον υπολογισμό του κόστους, ο αλγόριθμος για κάθε περιοχή εξετάζει αρχικά το αν αυτή εντάσσεται σε απροσπέλαστη περιοχή. Στην συνέχεια, εξετάζει την ύπαρξη ρήγματος στην περιοχή και σε περίπτωση που υπάρχει ρήγμα στην περιοχή, τότε συμβουλευεται τον χρήστη και το νευρωνικό δίκτυο για το αν, η διασταύρωση με το ρήγμα είναι εφικτή και δεν θα προκαλέσει βλάβη στον αγωγό. Τέλος, εάν επιτρέπεται η προσπέλαση της περιοχής από τον αγωγό, γίνεται υπολογισμός του θεωρητικού κόστους σε περίπτωση προσπέλασής της. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 14: Διάγραμμα διαδικασίας υπολογισμού κόστους

5. Εφαρμογές

5.1 Εισαγωγή

Για την επίδειξη του εργαλείου παρουσιάζονται 3 σενάρια για την σύνδεση με υποθαλάσσιο αγωγό, της Κύπρου και της Κρήτης. Τα τρία σενάρια επιλέχθηκαν με τρόπο τέτοιο ώστε να αναδεικνύεται η δυνατότητα παραμετροποίησης του εργαλείου και τα διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με αυτήν.

5.2 Εφαρμογή Κρήτη - Κύπρος

Για την εφαρμογή αυτή αξιοποιείται στο έπακρο το εργαλείο καθώς υπάρχουν γνωστά ρήγματα στην περιοχή μελέτης. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι εφόσον δεν υπάρχουν επαρκεί γνωστά εδαφικά χαρακτηριστικά, έγινε για λόγους δοκιμών παραγωγή ψεύτικων δεδομένων τα οποία όμως, ανταποκρίνονται στη πραγματικότητα. Για τον υπολογισμό λοιπόν της χάραξης δόθηκαν στο εργαλείο τα παρακάτω δεδομένα:

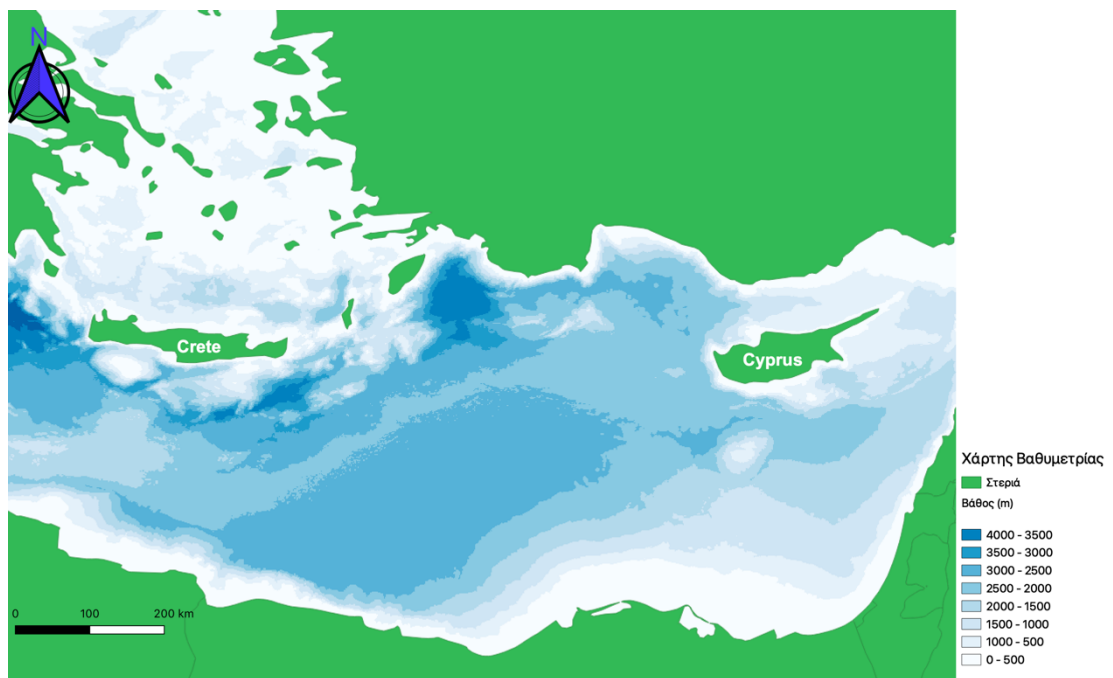
1. DBM
2. Slope raster
3. Faults shapefile
4. Soil data CSV
5. Trained Neural network
6. Start end points shapefiles

Στόχος του εργαλείου είναι η βέλτιστη χάραξη που συνδέει τα παρακάτω σημεία:

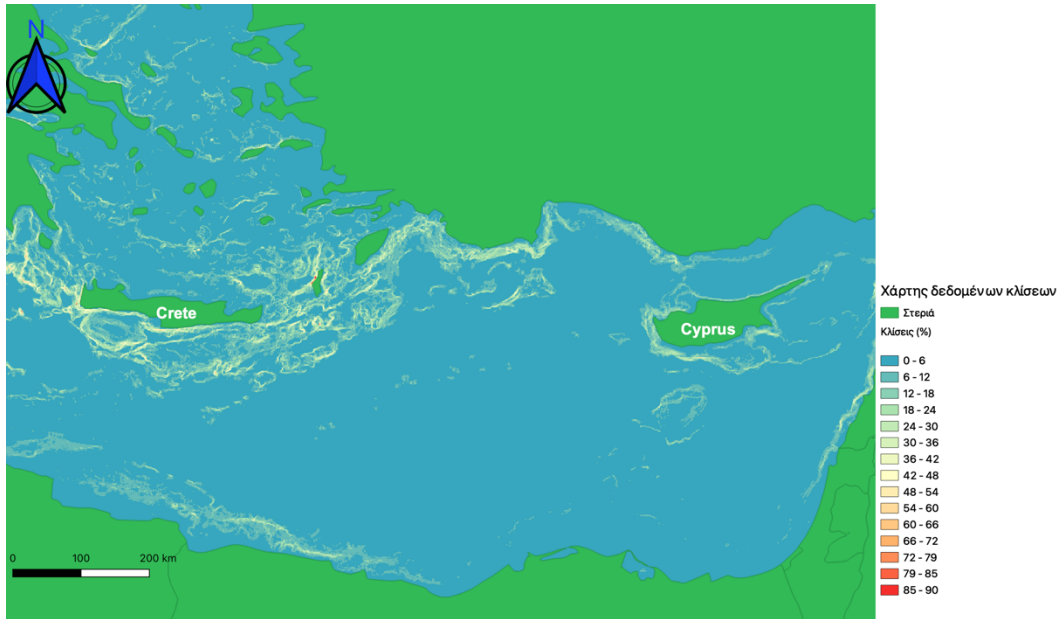


Εικόνα 8: Χάρτης σημείων προέλευσης - περάτωσης χάραξης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα που δόθηκαν στο εργαλείο:

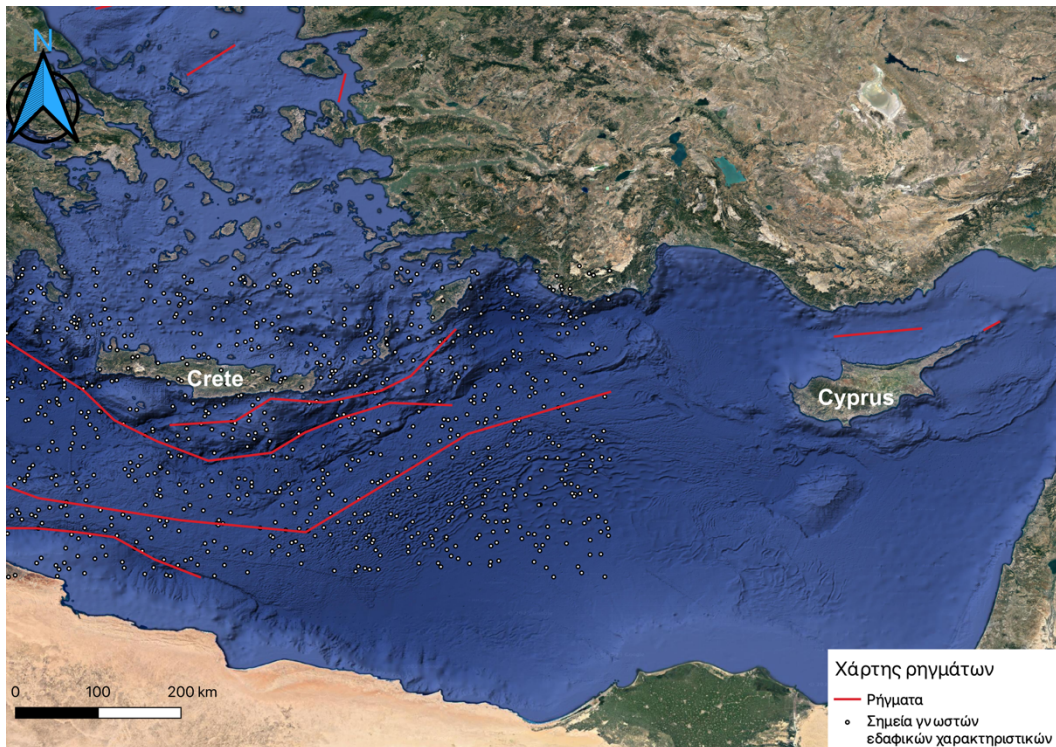


Εικόνα 9: Χάρτης βαθυμετρίας

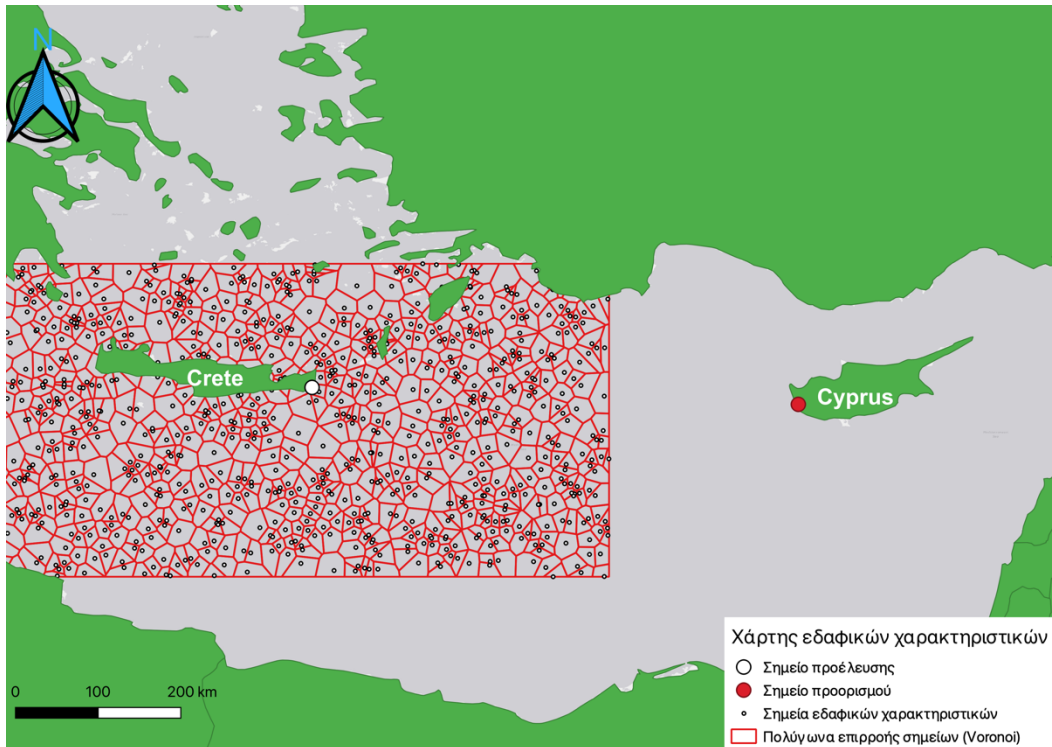


Εικόνα 10: Χάρτης κλίσεων

Τα δεδομένα για τα εδαφικά χαρακτηριστικά μετατράπηκαν σε αρχείο CSV, χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη μέθοδο του εργαλείου. Πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της χάραξης είναι ο υπολογισμός των πολυγώνων επιρροής του κάθε σημείου γνωστών εδαφικών χαρακτηριστικών.

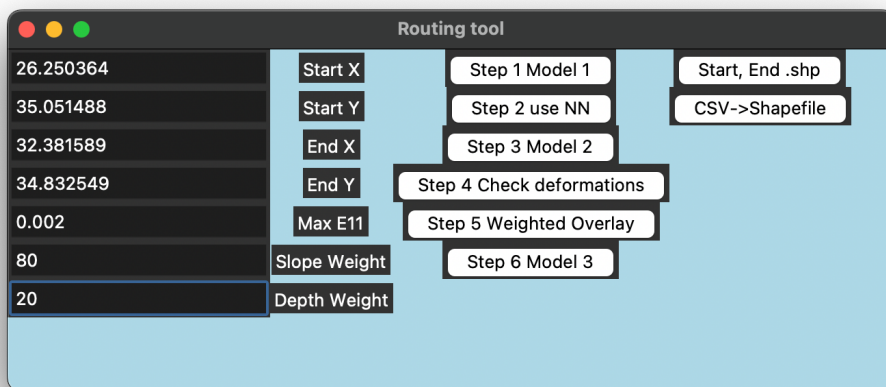


Εικόνα 11: Χάρτης ρηγμάτων και εδαφικών χαρακτηριστικών

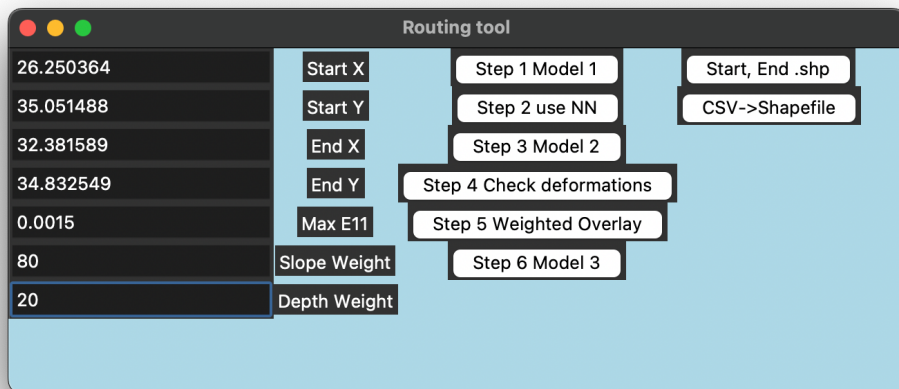


Εικόνα 12: Χάρτης σημείων εδαφικών χαρακτηριστικών και πολύγωνων επιρροής

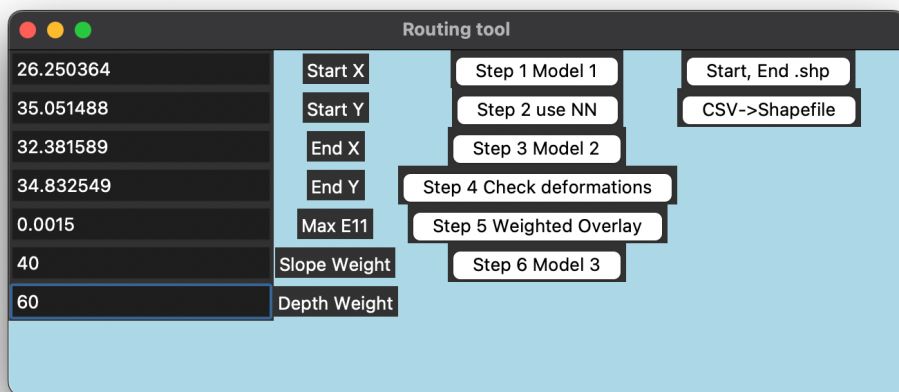
Για τα τρία διαφορετικά σενάρια παρουσιάζεται επίσης, η διεπαφή χρήστη πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου για το κάθε ένα από αυτά, και στην συνέχεια οι χαράξεις που παρέδωσε το υπολογιστικό εργαλείο.



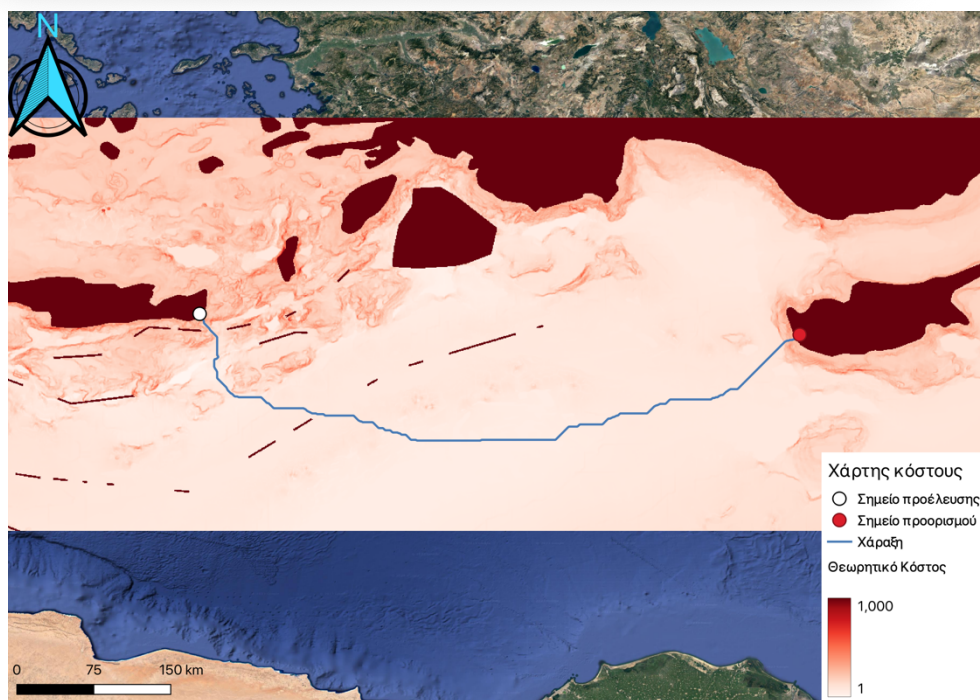
Εικόνα 13: GUI σενάριο 1



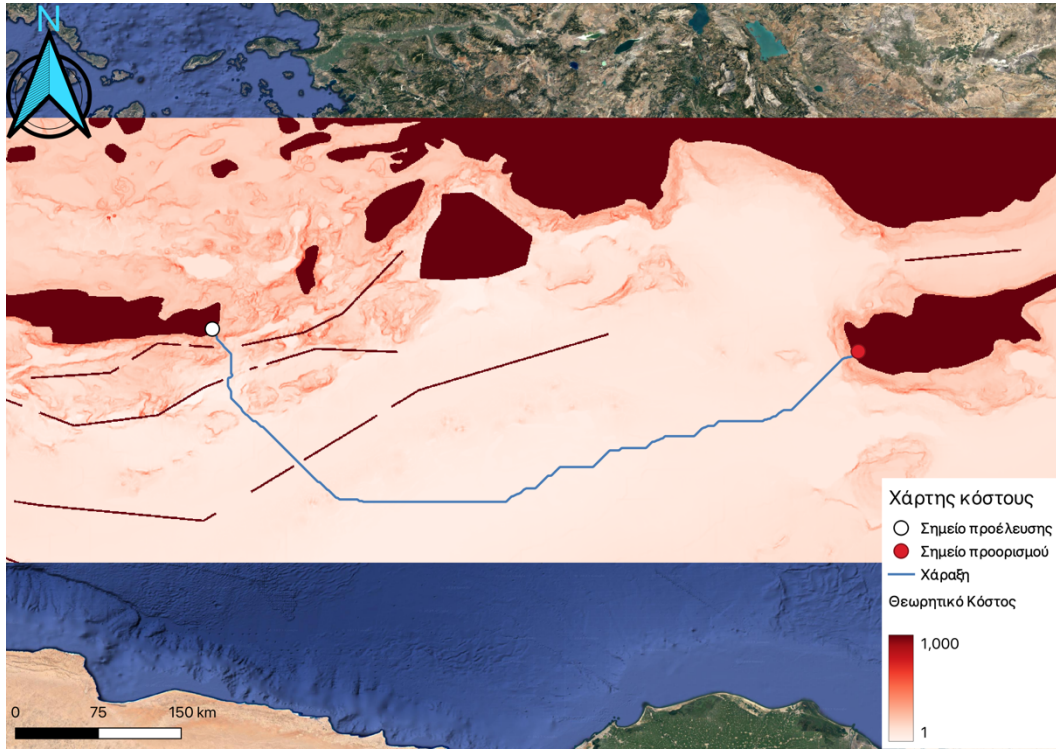
Εικόνα 14: GUI σενάριο 2



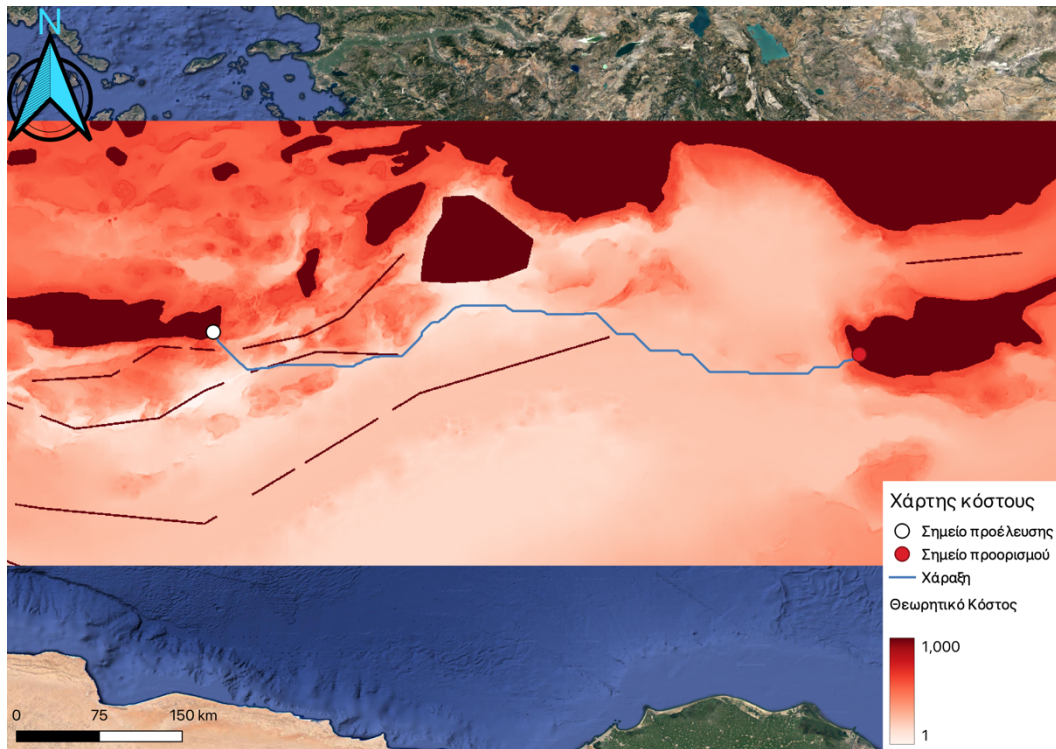
Εικόνα 15: GUI σενάριο 3



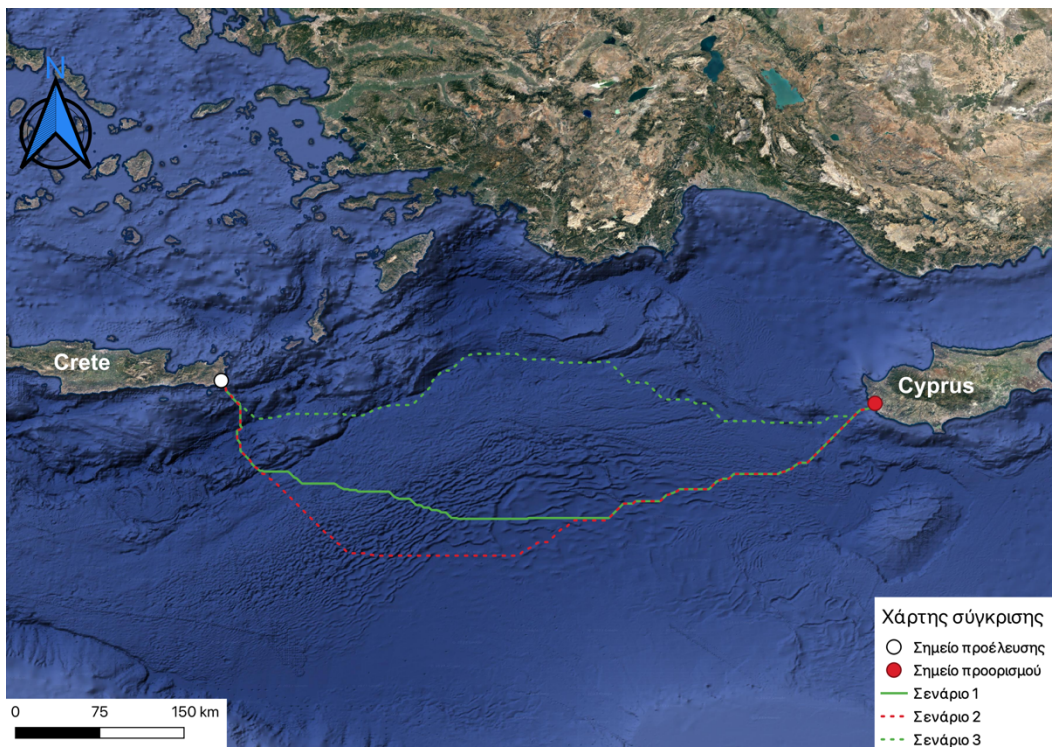
Εικόνα 16: Χάρτης κόστους και χάραξης, σενάριο 1



Εικόνα 17: Χάρτης κόστους και χάραξης, σενάριο 2



Εικόνα 18: Χάρτης κόστους και χάραξης, σενάριο 3



Εικόνα 19: Χάρτης σύγκρισης σεναρίων

Όπως φαίνεται στους χάρτες το υπολογιστικό εργαλείο έδωσε διαφορετικές χαράξεις για κάθε σενάριο παραμέτρων που του δόθηκε.

6. Γενικά συμπεράσματα & προτάσεις

- Η Μεσόγειος αποτελεί πρόκληση για τον σχεδιασμό υποθαλάσσιων έργων μεγάλου μήκους.
- Οι γεωκίνδυνοι και ιδιαίτερα τα ρήγματα έχουν καθοριστικό ρόλο στην μελέτη χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών.
- Το εργαλείο που αναπτύχθηκε αυτοματοποιεί σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία χάραξης.
- Το νευρωνικό δίκτυο αποδείχθηκε χρήσιμο ως συνδετικός κρίκος μεταξύ ABAQUS και QGIS.
- Το λογισμικό QGIS αποτελεί κρίσιμο κομμάτι του εργαλείου για την διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων.

- Το νευρωνικό δίκτυο έχοντας μικρό σφάλμα, (1%) δίνει προβλέψεις που ανταποκρίνονται πολύ καλά στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Όσων αφορά προτάσεις για μελλοντική έρευνα, μπορεί να προταθεί η προσθήκη άλλων γεωκινδύνων στο εργαλείο, όπως αυτός των κατολισθήσεων, η προσθήκη παραπάνω νευρωνικών δικτύων για να καλυφθούν προβλέψεις για ρήγματα πέραν των ανάστροφων με γωνία διάρρηξης 60 μοιρών. Επιπλέον, θα είχε πολύ ενδιαφέρον η δοκιμή του λογισμικού με πραγματικά δεδομένα. Τέλος ενδιαφέρον θα είχε η ανάπτυξη του εργαλείο με τρόπο τέτοιο, που να μην είναι αναγκαία η χρήση κάποιου λογισμικού GIS.

7.Βιβλιογραφία

- E.T. Richard Dean, 2010, Offshore geotechnical engineering
- Mark Randolph, Susan Gourvenec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering
- Aurelien Geron, 2022, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow, Concepts, Tools and Techniques to Build Intelligent Systems
- Michael J. O'Rourke & Jack X. Liu, 2012, Seismic Design Of Buried And Offshore Pipelines
- Κωνσταντίνος Μπούτικας, 2019, Χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων για το βέλτιστο σχεδιασμό υποθαλάσσιων ενεργειακών δικτύων έναντι γεωκινδύνων
- Νικόλαος Μακράκης, 2018, Ανάπτυξη και εφαρμογή υπολογιστικού εργαλείου για την βελτιστοποίηση της χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών και καλωδίων που υπόκεινται σε γεωκινδύνους
- Μαρία Παπαθωμά, 2021, Χρήση Τεχνητής νοημοσύνης για την βελτιστοποίηση της χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών που απειλούνται από γεωκινδύνους
- QGIS documentation
- TensorFlow documentation

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- <https://www.offshoreengineering.com>
- <https://www.researchgate.net>
- <https://www.eea.europa.eu>
- <https://blogs.agu.org/>
- <https://www.tensorflow.org/>
- <https://www.semanticscholar.org/>
- <https://www.gebco.net/>
- <https://link.springer.com/>
- <https://github.com/Gooong/LeastCostPath/>