



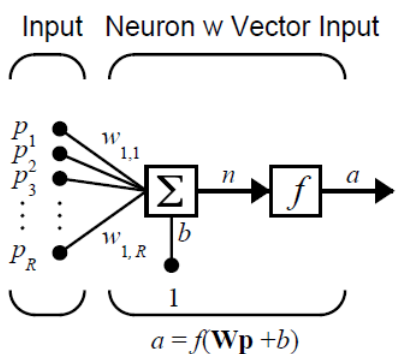
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης για τη Βελτιστοποίηση της Χάραξης Υποθαλάσσιων Αγωγών που απειλούνται από Γεωκινδύνους



ΠΑΠΑΘΩΜΑ ΜΑΡΙΑ

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

**Χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης για τη Βελτιστοποίηση
της Χάραξης Υποθαλάσσιων Αγωγών
που απειλούνται από Γεωκινδύνους**

Διπλωματική Εργασία

της

Παπαθωμά Μαρίας

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

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Καττής Μαρίνος
Αν. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

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

Τσομπανάκης Ιωάννης
Αν. Καθηγητής, Πολ. Κρήτης

Αθήνα, Μάρτιος 2021

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό αποδίδονται οι ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της εργασίας αυτής, τον κο Μαρίνο Καττή, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. καθώς επίσης και τον κο Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, Ε.ΔΙ.Π/Ε.Μ.Π, οι οποίοι προσφέροντάς μου τα απαραίτητα εφόδια μέσω των επιστημονικών γνώσεων τους, συνέβαλαν στην περάτωση της εργασίας αυτής.

Ιδιαίτερη μνεία θα ήθελα να γίνει στην πολύτιμη και διαρκή υποδειγματική καθοδήγηση από τον κο Ψαρρόπουλο, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση κάθε πιθανού προβλήματος.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Νικόλαο Μακράκη για τη συμβολή του και την άμεση ανταπόκρισή του για την επίλυση αποριών σχετικά με τα εφαρμοζόμενα υπολογιστικά εργαλεία. Ακόμη, ευχαριστώ τον Κωνσταντίνο Μπούτικα για την πολύτιμη βοήθεια του στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Python.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδονται στην οικογένεια μου για την αδιάλειπτη και ανιδιοτελή υποστήριξη και ενθάρρυνσή τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
1. Εισαγωγή	5
2. Υποθαλάσσιοι Αγωγοί και Γεωκίνδυνοι.....	11
2.1. Γενικά Στοιχεία Υποθαλάσσιων Αγωγών	11
2.2. Εγκατάσταση και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών	13
2.2.1. Εγκατάσταση Υποθαλάσσιων Αγωγών.....	13
2.2.2. Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών.....	22
2.3. Σημαντικοί Υποθαλάσσιοι Αγωγοί Παγκοσμίως.....	24
2.4. Υποθαλάσσιοι Αγωγοί στη Μεσόγειο Θάλασσα.....	30
2.5. Γεωκίνδυνοι Υποθαλάσσιων Αγωγών	34
2.5.1. Εισαγωγή.....	34
2.5.2. Οι Σημαντικότεροι Υπεράκτιοι Γεωκίνδυνοι.....	36
2.5.3. Ρήγματα.....	41
2.5.4. Ρήγματα στη Μεσόγειο Θάλασσα	46
3. Υπολογιστικά Εργαλεία	49
3.1. Εισαγωγή.....	49
3.2. Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	49
3.2.1. Γενικά Στοιχεία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.)	49
3.2.2. Αναπαράσταση της Γεωγραφικής Πληροφορίας.....	51
3.2.3. Περιγραφή του Λογισμικού ArcGIS 10.3.1	53
3.2.4. Χρήσιμα Εργαλεία για την Χάραξη Αγωγού στο ArcMap	57
3.3. Πρόγραμμα Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (ABAQUS).....	64
3.4. Νευρωνικά Δίκτυα.....	66
3.4.1. Μαθηματικό Μοντέλο Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	67

3.4.2.	Δομή και Αρχιτεκτονική Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	70
3.4.3.	Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	73
3.4.4.	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	80
4.	Πιθανές Χαράξεις ενός Υποθαλάσσιου Αγωγού μέσω του ArcMap	83
4.1.	Εισαγωγή.....	83
4.2.	Προκαταρκτικές χαράξεις με την αξιοποίηση δύο μεθόδων.....	84
4.2.1.	Προκαταρκτική Χάραξη με χρήση της Μεθοδολογίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) – Περιβαλλοντικοί, Οικονομικοί, Μηχανικοί Παράγοντες Επιρροής	84
4.2.2.	Προκαταρκτικές Χαράξεις με Κριτήριο την Αποφυγή Γεωκινδύνων	96
5.	Συνδυασμός της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και Έλεγχος Διασταύρωσης Αγωγού με Πιθανό Γεωκίνδυνο	101
5.1.	Εισαγωγή.....	101
5.2.	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων – Ανάπτυξη Κώδικα (Python).....	102
5.2.1.	Περιγραφή Προσομοιώματος της Ιζηματογενούς Στρώσης.....	102
5.2.2.	Περιγραφή Προσομοιώματος του Αγωγού	103
5.2.3.	Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Αγωγού και Εδαφικών Ελατηρίων	106
5.2.4.	Εφαρμογή Υπολογιστικού Εργαλείου – Αυτοματοποίηση διαδικασιών με χρήση Κώδικα (Python).....	112
5.3.	Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (T.N.Δ).....	119
5.4.	Έλεγχος Έγκρισης Διασταύρωσης Αγωγού με Γεωκίνδυνο	145
6.	Γενικά Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις	149
7.	Βιβλιογραφία	151
8.	Παράρτημα.....	155

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών που καταπονούνται από γεωκινδύνους, αξιοποιώντας επίσης την τεχνητή νοημοσύνη. Για την υλοποίηση της πραγματοποιήθηκαν αρχικά ορισμένες προκαταρκτικές χαράξεις αξιοποιώντας δύο μεθόδους. Για την πρώτη μέθοδο συλλέχθηκαν διάφοροι περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και μηχανικοί παράγοντες επιρροής της χάραξης, οι οποίοι τέθηκαν σε προτεραιότητα, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), για τον προσδιορισμό των συντελεστών βαρύτητας τους. Στη συνέχεια, στο περιβάλλον του GIS πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των βαρών του κάθε παράγοντα, ώστε να διαμορφωθεί η πρωταρχική χάραξη του υποθαλάσσιου αγωγού. Στη δεύτερη μέθοδο, πραγματοποιήθηκε η μελέτη θέτοντας ως παράγοντες επιρροής τους γεωκινδύνους αποκλειστικά. Ακολουθώντας μια διαφορετική διεργασία και τροποποιώντας τη σπουδαιότητα κάθε γεωκινδύνου, εκτελέστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις χαράξεων. Στην περίπτωση διασταύρωσης του αγωγού με τους προκείμενους γεωκινδύνους το επόμενο βήμα σχετίζεται με την ανάλυση δύο διαστάσεων προσομοιωμάτων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το πρώτο εξ αυτών σχετίζεται με την προσομοίωση της ιζηματογενούς στρώσης, η οποία για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εξετάζει τη διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος. Η ανάλυση του προσομοιώματος καταλήγει στην εξαγωγή των μετατοπίσεων της ιζηματογενούς στρώσης, οι οποίες επιβάλλονται στη συνέχεια στο προσομοίωμα του αγωγού. Συνεπώς, εξάγονται οι ζητούμενες παραμορφώσεις που υπόκεινται ο αγωγός κατόπιν διασταύρωσης του με τον γεωκίνδυνο. Η ελαχιστοποίηση του χρόνου για τη συγκεκριμένη διαδικασία οδήγησε στη διαμόρφωση τεσσάρων σεναρίων (scripts), στο περιβάλλον της Python. Πρόκειται για κώδικες σχετικούς με τα προσομοιώματα, συγκεκριμένα για την εισαγωγή δεδομένων σε αυτά, τη διασύνδεση των δύο καθώς επίσης και την αυτοματοποίηση της εξαγωγής των αποτελεσμάτων τους. Επιπρόσθετα, εξίσου σημαντικό παράγοντα για την περάτωση της εργασίας αποτέλεσε η κατασκευή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Τ.Ν.Δ.), στο λογισμικό MATLAB. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ανάλυσης των προσομοιωμάτων, στα οποία βασίστηκε η εκπαίδευση των Τ.Ν.Δ., δηλαδή σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς στρώσης (H, φ, c) αντιστοιχήθηκαν

οι μετατοπίσεις της για την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση (U_1, U_2) και οι παραμορφώσεις του αγωγού (e_{11}). Η εκπαίδευση των Τ.Ν.Δ. διεξήχθη με τρεις διαφορετικούς αλγόριθμους εκπαίδευσης, τον Bayesian Regularization (BR), τον Levenberg-Marquardt (LM) και τον Scaled Conjugate Gradient (SCG). Στόχος της κατασκευής τους είναι η ικανότητα πρόβλεψης δεδομένων που δεν ανήκουν στους συνδυασμούς των δεδομένων εισόδου αποδίδοντας το λιγότερο δυνατό σφάλμα. Τα αποτελέσματα τους απέδειξαν ότι ο αλγόριθμος BR είναι ο ικανότερος, ακόμη και σε θορυβώδη δεδομένα. Συνεπώς, το συμπέρασμα για τα Τ.Ν.Δ. είναι ότι παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα πρόβλεψης, αρκεί τα χαρακτηριστικά των προβλεπόμενων να ανήκουν εντός των ορίων των δεδομένων εκπαίδευσης τους. Το τελευταίο στάδιο της εργασίας αφορά τον έλεγχο του αγωγού για τη δυνατότητα του να διαπεράσει τους μελετώμενους γεωκινδύνους, σύμφωνα με τις παραμορφώσεις που υπόκεινται. Παρατηρήθηκε, λοιπόν, ότι όλες οι παραμορφώσεις για κάθε περίπτωση ιζηματογενούς στρώσης, ανήκουν κάτω από το επιτρεπόμενο ποσοστό της τάξεως του 0.5%, άρα οι χαράξεις υλοποιούνται χωρίς να υπάρχει άμεσα επικίνδυνη επιβάρυνση του αγωγού.

Abstract

Scope of the present thesis is the development of a computational tool in order to optimize the route of subsea pipelines against geohazards, using Artificial Intelligence. Initially, some preliminary routes were performed, using two methods. In the first method, were collected various environmental, economic and mechanical factors influencing the route, which were prioritized, according to the methodology of the Analytical Hierarchy (AHP), to determine their weighting factors. Then, in the ArcMap were introduced the weights of each factor, in order to form the primary route of the submarine pipeline. In the second method, the study was carried out, defining the geohazards exclusively as influencing factors. Following a different process and modifying the importance of each geohazard were performed three different route cases. In the case of intersection of the pipeline with the respective geohazards, the next step is related to the analysis of two two-dimensional simulations in the ABAQUS finite element program. The first of these is related to the simulation of the sedimentary layer, which for its specific characteristics examines the rupture of an inverse fault. The analysis of the simulation results in the extraction of the displacements of the sedimentary layer, which are then imposed on the pipeline simulation. Therefore, the required deformations are extracted that the pipeline is subjected to after its intersection with the geohazard. The minimization of time for this process led to the configuration of four scripts in the Python. These are codes related to the simulations, specifically for the input data in them, the interconnection of the two as well as the automation of the extraction of their results. In addition, an equally important factor for the completion of the work was the construction of Artificial Neural Networks (A.N.N) in MATLAB software. In particular, the results of the analysis of the simulations were utilized, on which the training of the A.N.N. was based, ie its specific displacements for the horizontal and vertical direction (U1, U2) corresponded to specific characteristics of the sedimentary layer) and deformations of pipeline (e11). The education of A.N.N was conducted with three different training algorithms, the Bayesian Regularization (BR), the Levenberg-Marquardt (LM) and the Scaled Conjugate Gradient (SCG). The purpose of their construction is the ability to predict data that does not belong to the combinations of input data with the least possible error. Their results showed that the BR algorithm is the most capable, even in noisy data. Therefore, the conclusion for the A.N.N. is that they are predictable if the characteristics of the predicted belong within the limits of their education data. Finally, the pipeline was checked for its ability to penetrate the studied geohazards, according to the deformations. It was observed, therefore, that all deformations for each

pipeline case belong below the permissible percentage of 0.5%, so the routing are implemented without any direct dangerous load on the pipeline.

1. Εισαγωγή

Με τις ενεργειακές απαιτήσεις παγκοσμίως να σημειώνουν σημαντικές αυξήσεις τον τελευταίο αιώνα διαπιστώθηκε ότι η μόνη μορφή ενέργειας που μπορούσε να τις ικανοποιήσει άμεσα ήταν η καύση υδρογονανθράκων . Για το λόγο αυτό η παραγωγή πετρελαίου και πιο πρόσφατα, φυσικού αερίου έχει αυξηθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες. Για τη μεταφορά τους χρησιμοποιούνται υποθαλάσσιοι αγωγοί οι οποίοι λόγω των φορτίων πίεσης που δέχονται σε αυτά τα βάθη πρέπει να χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή. Καταπόνηση των αγωγών προκαλείται κυρίως από τις μεγάλες εξωτερικές πιέσεις από το νερό αλλά και από εξωγενείς δυνάμεις, όπως για παράδειγμα ο σεισμός, ενώ καταπονούνται επίσης σημαντικά και από τη διαδικασία εγκατάστασής τους στα μεγάλα αυτά βάθη. Ο συνδυασμός όλων αυτών των φορτίων δημιουργεί ένα σύνθετο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους που πρέπει να αναλυθεί για να είναι δυνατός ο σωστός και ασφαλής σχεδιασμός των αγωγών.

Συνεπώς, η παρούσα εργασία αναφέρεται στη βελτιστοποίηση χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών οι οποίοι υπόκεινται σε γεωκινδύνους, ορίζοντας ως περιοχή μελέτης τη λεκάνη της Μεσογείου θάλασσας, συγκεκριμένα με αρχή την Κύπρο και πέρας την Κρήτη . Σύμφωνα με μελέτη διαπιστώθηκε ότι η Μεσόγειος θάλασσα χαρακτηρίζεται από πληθώρα φαινομένων που είναι δυνατό να απειλήσουν την ακεραιότητα ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Ωστόσο, μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στην εκδήλωση του σεισμού και συγκεκριμένα στα ρήγματα που λαμβάνουν χώρα στη συγκεκριμένη περιοχή. Στην πορεία έγινε εύκολα αντιληπτό ότι σε περίπτωση διασταύρωσης του προκείμενου αγωγού με κάποια μορφή γεωλογικής ασυνέχειας, είναι δυνατή η δημιουργία παραμορφώσεων του.

Για το λόγο αυτό, αρχικά διαμορφώθηκαν ορισμένες προκαταρκτικές χαράξεις με τη βοήθεια λογισμικού των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π), συγκεκριμένα του ArcMap. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω δύο μεθοδολογιών. Κατά την πρώτη μεθοδολογία συλλέχθηκαν δεδομένα που αφορούν περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και μηχανικούς παράγοντες, οι οποίοι στη συνέχεια τέθηκαν σε προτεραιότητα βασιζόμενοι στην Αναλυτική Ιεράρχηση (ΑΗΡ). Επιπροσθέτως, με κατάλληλους υπολογισμούς προσδιορίστηκαν τα βάρη επιρροής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά, τα οποία αποτέλεσαν σημαντικά δεδομένα για τη διαμόρφωση της τελικής χάραξης του αγωγού. Στη δεύτερη μεθοδολογία

πραγματεύεται η βελτιστοποίηση της χάραξης με χρήση αποκλειστικά των γεωκινδύνων που παρευρίσκονται στη μελετώμενη περιοχή. Αναπτύσσοντας, λοιπόν, μια διαφορετική επεξεργασία δεδομένων και τροποποιώντας τη σπουδαιότητα του κάθε γεωκινδύνου, διαμορφώθηκαν τρεις περιπτώσεις προκαταρκτικών χαράξεων.

Στο επόμενο στάδιο, για τις περιπτώσεις διασταύρωσης του υποθαλάσσιου αγωγού με τους γεωκινδύνους, θεωρήθηκε κρίσιμη η ανάλυση δύο δισδιάστατων προσομοιωμάτων εντός του περιβάλλοντος του ABAQUS. Η πρώτη ανάλυση σχετίζεται με το προσομοίωμα της ιζηματογενούς στρώσης, το οποίο εξετάζει τη διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος για διαφορετικά χαρακτηριστικά της στρώσης. Εισάγοντας τα χαρακτηριστικά της και συγκεκριμένα το πάχος της, τη γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή του εδαφικού υλικού, διαμορφώθηκε το προσομοίωμα του ρήγματος, όπου με την εκτέλεση του στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων οδηγείται στην εξαγωγή των μετατοπίσεων της ιζηματογενούς στρώσης κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στοχεύοντας στην εξοικονόμηση χρόνου διαμορφώθηκε ένας κώδικας δημιουργίας των προσομοιωμάτων του ρήγματος για κάθε περίπτωση χαρακτηριστικών και ένας κώδικας για την εξαγωγή των μετατοπίσεων, στο περιβάλλον της Python. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τα εξαγόμενα αποτελέσματα και μέσω ενός ακόμη κώδικα Python, υλοποιήθηκε η διασύνδεση μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων, με σκοπό τη δημιουργία του τελικού προσομοιώματος του αγωγού. Η εκτέλεση του προσομοιώματος συνέβαλε στην εξαγωγή του τελικού επιθυμητού αποτελέσματος, τις παραμορφώσεις που υπόκεινται ο αγωγός κατόπιν καταπόνησης του από τους γεωκινδύνους, η οποία ολοκληρώθηκε με τη βοήθεια εξίσου ενός κώδικα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

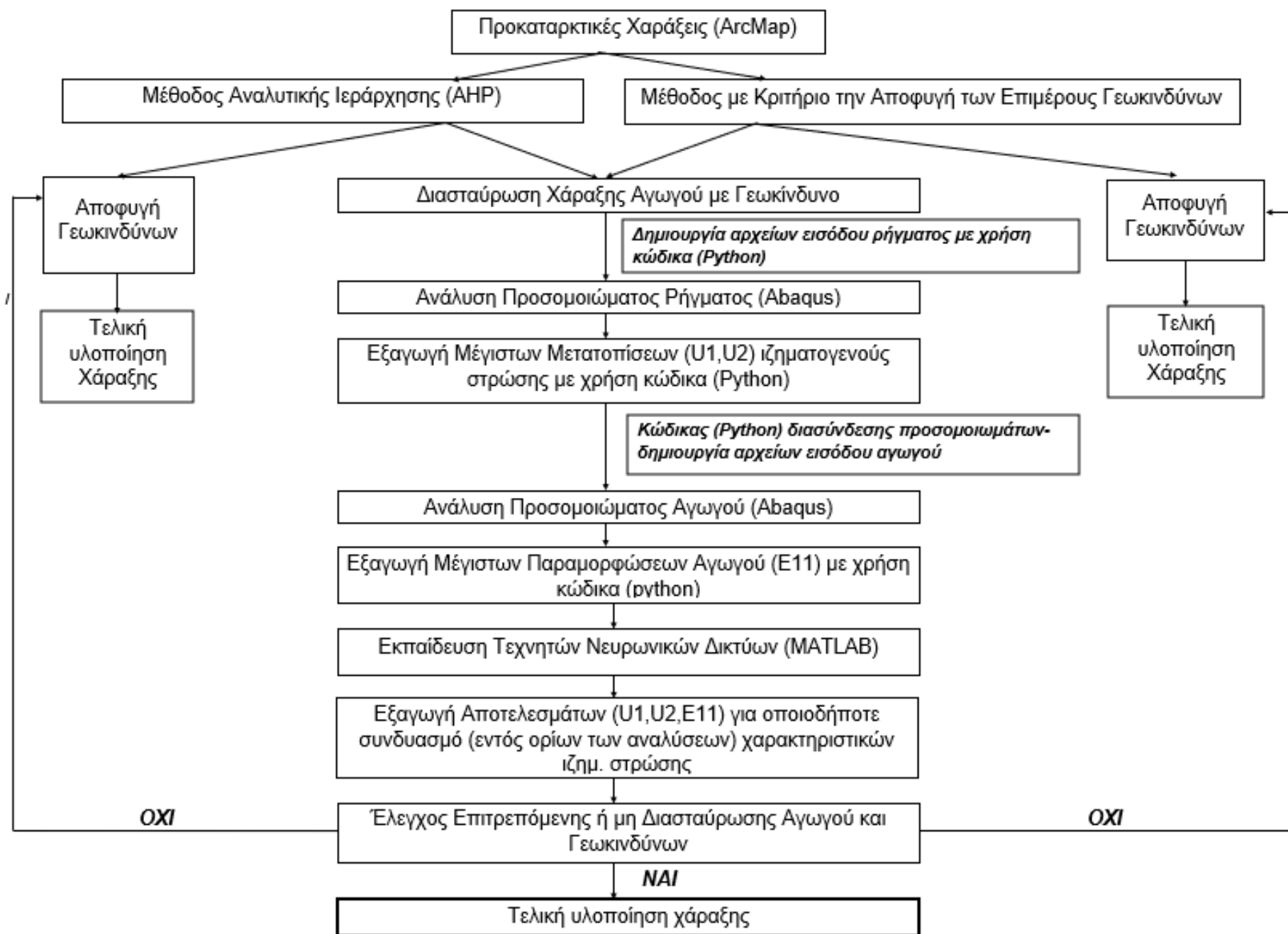
Με το πέρας των αναλύσεων, έγινε μετέπειτα η προσπάθεια εύρεσης μιας μεθόδου με την οποία αξιοποιώντας τα παραπάνω, να παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να εξάγει τις μετατοπίσεις και τις παραμορφώσεις για νέα δεδομένα ιζηματογενούς στρώσης, χωρίς να είναι αναγκαίο να προηγηθεί η προαναφέρουσα διαδικασία ανάλυσης των προσομοιωμάτων. Κατάλληλη μέθοδος θεωρήθηκε η κατασκευή και συνεπώς η εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε εντός του λογισμικού MATLAB και ως δεδομένα εισόδου θεωρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς στρώσης, τα οποία σύμφωνα με τις προηγούμενες αναλύσεις ανέρχονται στις 109 περιπτώσεις, ενώ ως δεδομένα στόχου

τέθηκαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα των μετατοπίσεων της ιζηματογενούς στρώσης και των παραμορφώσεων του αγωγού. Η εκπαίδευση περατώθηκε αξιοποιώντας τρεις αλγόριθμους εκπαίδευσης τον Bayesian Regularization (BR), τον Levenberg-Marquardt (LM) και τον Scaled Conjugate Gradient (SCG). Επίσης, στην ολοκλήρωση εκπαίδευσης συνέβαλαν οι διάφορες δοκιμές της αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου, μέσω της τροποποίησης των κρυφών επιπέδων του καθώς και οι αλλαγές των ποσοστών που αφορούν τα δείγματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου. Συνεπώς, ελέγχθηκε η ικανότητα των εκπαιδευμένων νευρωνικών δικτύων στην πρόβλεψη τυχαίων δεδομένων που ανήκουν εντός των ορίων των πρωταρχικών 109 αναλύσεων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, προέκυψε ότι συγκρίνοντας όλες τις δοκιμές, τα βέλτιστα αποτελέσματα με το λιγότερο δυνατό σφάλμα εντοπίζονται με χρήση του αλγόριθμου BR, 150 κρυφών επιπέδων και των προκαθορισμένων από το λογισμικό ποσοστών για τα δείγματα αντίστοιχα (70/15/15). Στο τελικό στάδιο η εξαγωγή αποτελεσμάτων για δοκιμές δεδομένων που ανήκουν εκτός των ορίων των αναλύσεων, διαπιστώθηκε η αδυναμία πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου για τα δεδομένα αυτά.

Η ολοκλήρωση της εργασίας πραγματοποιήθηκε με τον έλεγχο της διασταύρωσης του αγωγού με τους γεωκινδύνους, ώστε να διαπιστωθεί αν οι παραμορφώσεις του αγωγού ανήκουν κάτω του επιτρεπόμενου ορίου της τάξεως του 0.5%. Τελικώς, πρόκειται για επιτρεπόμενες παραμορφώσεις, συνεπώς η υλοποίηση των χαράξεων ολοκληρώθηκε χωρίς να υπάρχει άμεσα μεγάλη επιβάρυνση στον αγωγό όπως διαπιστώθηκε.

Τέλος, σημαντικό να αναφερθεί ότι τα κεφάλαια που διαμορφώθηκαν για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας είναι συνολικά πέντε. Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο διερευνώνται βασικές έννοιες για την εγκατάσταση και το σχεδιασμό των υποθαλάσσιων αγωγών, καθώς και η ύπαρξη αυτών παγκοσμίως και ειδικότερα στη Μεσόγειο θάλασσα. Ακόμη, στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται λεπτομερώς οι σημαντικότεροι υπεράκτιοι γεωκίνδυνοι, δίνοντας έμφαση σε θεωρητικές έννοιες των ρηγμάτων καθώς επίσης και όσων συναντώνται στη Μεσόγειο Θάλασσα. Το τρίτο κεφάλαιο σχετίζεται με την ανάλυση των υπολογιστικών εργαλείων. Συγκεκριμένα, διευκρινίστηκε η λειτουργία του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), εμβαθύνοντας στο λογισμικό ArcMap και των αντίστοιχων εργαλείων που αξιοποιήθηκαν εντός αυτού για τη μελέτη.

Τέλος, αναλύθηκε λεπτομερώς η έννοια και ο τρόπος αξιοποίησης των Νευρωνικών Δικτύων. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η δημιουργία των προκαταρκτικών χαράξεων στο λογισμικό ArcMap με χρήση δύο διαφορετικών μεθοδολογιών. Στο πέμπτο κεφάλαιο διαδραματίζεται στο πρώτο σκέλος η υπολογιστική διαδικασία και η μεθοδολογία ανάλυσης προσομοιωμάτων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, στο δεύτερο σκέλος παρουσιάζεται η διαδικασία εκπαίδευσης των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων στο περιβάλλον του MATLAB και στο τρίτο σκέλος του κεφαλαίου υλοποιείται ο έλεγχος έγκρισης της επιτρεπόμενης ή μη διασταύρωσης του αγωγού με τους γεωκινδύνους. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα διάγραμμα ροής με τη σειρά των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα ροής περιγραφής διαδικασίας της μελέτης

2. Υποθαλάσσιοι Αγωγοί και Γεωκίνδυνοι

2.1. Γενικά Στοιχεία Υποθαλάσσιων Αγωγών

Την τελευταία δεκαετία οι υπεράκτιοι αγωγοί έχουν εξελιχθεί σημαντικά στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς αποτελούν κύριο μέρος κάθε σχετικού υπεράκτιου έργου. Η ανυπέρβλητη ζήτηση του πετρελαίου από τον άνθρωπο ενέτεινε την αναζήτηση πετρελαίου στις υπεράκτιες περιοχές του κόσμου από το 1897, όταν ξεκίνησε η υπεράκτια εξερεύνηση και παραγωγή πετρελαίου στο Summerland της Καλιφόρνια. Ο πρώτος υποθαλάσσιος αγωγός δημιουργήθηκε στο Summerland, νοτιοανατολικά της Santa Barbara. Από τότε οι υποθαλάσσιοι αγωγοί αποτελούν ένα αποτελεσματικό μέσο μεταφοράς ρευστών, δηλαδή, πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού.

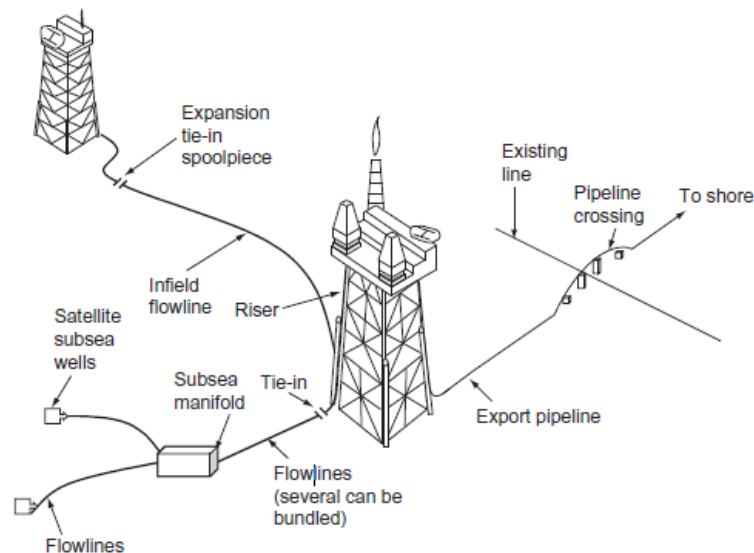
Ο πρώτος εμπορικός υπεράκτιος αγωγός κατασκευάστηκε από τους Brown & Root το 1954 στον Κόλπο του Μεξικού. Επρόκειτο για αγωγό φυσικού αερίου 10 ιντσών με επικάλυψη από σκυρόδεμα, μήκους 16 χιλιομέτρων και τοποθετήθηκε σε βάθος 4 έως 10 μέτρων. Η ταχύτητα τοποθέτησης του ήταν περίπου 800 μέτρα την ημέρα και το πλήρωμα εργαζόταν μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αργότερα οι Brown και Root έκαναν προσαρμογές όπως η κατασκευή ράμπας για να επιτρέψουν στον αγωγό να πλησιάσει πιο απαλά τον πυθμένα του ωκεανού.

Πιο συγκεκριμένα, ένας υποθαλάσσιος αγωγός, γνωστός επίσης με τις αγγλικές ορολογίες submarine, marine, subsea, offshore pipeline, είναι ένας αγωγός που τοποθετείται στην επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας ή κάτω από αυτή μέσα σε μια τάφρο. Η κύρια χρήση των αγωγών αυτών είναι η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου όπως προαναφέρθηκε, ωστόσο εξίσου σημαντικοί είναι και για τη μεταφορά νερού. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- 1) **Αγωγοί εντός πεδίου:** μεταφέρουν το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το νερό από το σημείο εξόρυξης, στο πεδίο συλλογής, επεξεργασίας και της μετέπειτα μεταφοράς
- 2) **Αγωγοί εξαγωγής:** συμβάλλουν στη μεταφορά του μεταποιημένου πετρελαίου ή φυσικού αερίου στην ξηρά. Εάν ο αγωγός μεταφέρει μείγμα πετρελαίου και

φυσικού αερίου τότε ο αγωγός είναι πολλαπλών φάσεων ενώ αν μεταφέρει μόνο πετρέλαιο ή φυσικό αέριο θεωρείται μονοφασικός αγωγός

3) Αγωγοί μεταφοράς: μεταφέρουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο μεταξύ δύο χερσαίων σημείων και δεν έχουν απαραίτητα σχέση με το πεδίο λειτουργίας



Εικόνα 2.1: Χρήσεις υποθαλάσσιων αγωγών (Guo et al., 2014)

Όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υποθαλάσσιων αγωγών, αρχικά η διάμετρος τους κυμαίνεται από 3 ίντσες (76 mm) για αγωγούς αερίου και έως 72 ίντσες (1.800 mm) για αγωγούς υψηλής χωρητικότητας. Επίσης, το πάχος τοιχώματος τους κυμαίνεται από 10 mm (0,39 in) έως 75 mm (3,0 in) και συνήθως είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής, 350-500 MPa (50.000-70.000 psi), έχοντας τη δυνατότητα συγκόλλησης που αποτελεί ένα από τα κύρια κριτήρια επιλογής. Ο σωλήνας τους σχεδιάζεται για υγρά σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Η δομή είναι συχνά προστατευμένη με διάφορες επικαλύψεις όπως ασφάλτου ή εποξικού υλικού, με σκοπό την αποφυγή εξωτερικής διάβρωσης. Επιπλέον προστασία από την τριβή και κατ' επέκταση της διάβρωσης παρέχει το περίβλημα από σκυρόδεμα ή fiberglass, το οποίο είναι αρκετά χρήσιμο και για την αντιστάθμιση της αρνητικής άνωσης του αγωγού κατά τη μεταφορά ουσιών χαμηλότερης πυκνότητας. Τέλος, τα εσωτερικά τοιχώματα του αγωγού δεν είναι επικαλυμμένα ώστε να υπάρχει διευκόλυνση στη ροή του πετρελαίου. Κατά τη μεταφορά όμως θαλασσινού νερού ή διαβρωτικών ουσιών, υπάρχει επικάλυψη με εποξικό υλικό, πολυουρεθάνη ή πολυαιθυλένιο ή ακόμα και με

τσιμέντο. Στη βιομηχανία πετρελαίου, όπου οι διαρροές δεν είναι επιτρεπτές και οι αγωγοί υπόκεινται σε εσωτερικές πιέσεις της τάξης των 10 MPa (1500 psi), τα τμήματα ενώνονται με συγκολλήσεις πλήρους διείσδυσης.

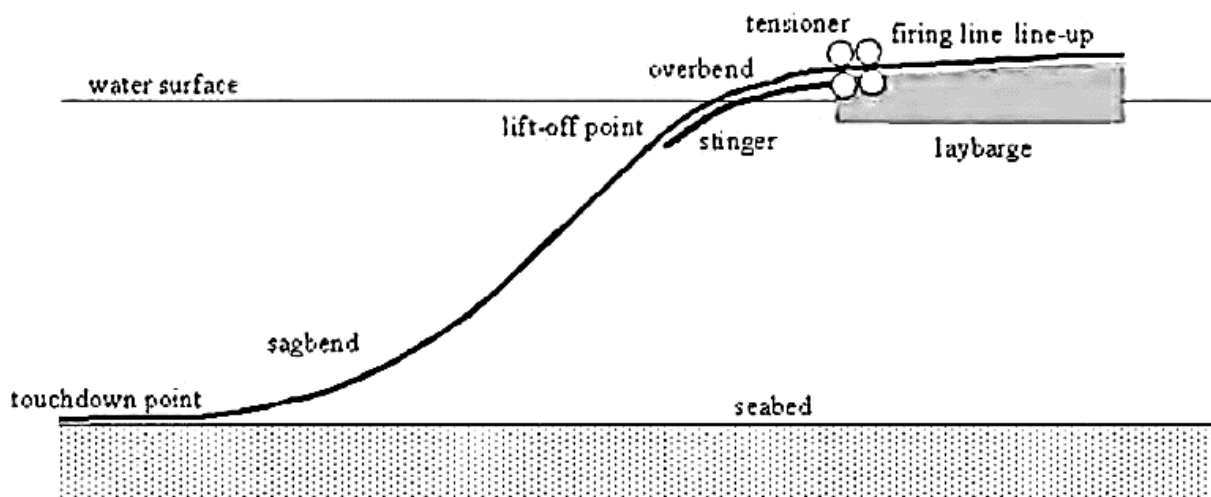
2.2. Εγκατάσταση και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών

2.2.1. Εγκατάσταση Υποθαλάσσιων Αγωγών

Η εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, η οποία εφαρμόζεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς αστοχίες στη διαδικασία αυτή μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ιδιαίτερη δυσκολία υπάρχει κατά την εγκατάσταση αγωγών σε μεγάλα βάθη νερού. Οι πιο κοινές μέθοδοι εγκατάστασης αγωγών είναι η S-lay, η J-lay και η Reel lay. Επίσης, μία ακόμα μέθοδος είναι η ρυμούλκηση (tow), η οποία χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση αγωγών από βάθη ρηχών υδάτων έως βάθη βαθέων υδάτων ανάλογα τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Παρακάτω παρουσιάζονται εκτενέστερα οι μέθοδοι εγκατάστασης.

Η μέθοδος S-lay αποτελεί την παλαιότερη και τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη συμβατική μέθοδο για την εγκατάσταση υπεράκτιων αγωγών σε ρηχά ύδατα. Η ονομασία της προέχεται από το σχήμα της γραμμής των σωλήνων που αναπαριστούν το γράμμα S. Στην παρακάτω εικόνα 2 παρουσιάζεται η τυπική διαμόρφωση της. Κατά την εγκατάσταση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή, η γραμμή σωλήνων χαλαρώνει από την πρύμνη ενός σκάφους εγκατάστασης αγωγού (S-lay installation barge) καθώς το σκάφος κινείται προς τα εμπρός. Ο σωλήνας κατεβάζεται χρησιμοποιώντας εντατήρες. Η σωλήνωση μεταφέρεται στη θάλασσα μέχρι να φτάσει στον πυθμένα της που ονομάζεται «Touchdown point». Κάθε σύνδεσμος της γραμμής σωλήνων συγκολλάται στο δοχείο εγκατάστασης και χαλαρώνει από το σκάφος. Η σωλήνωση συγκολλάται οριζόντια σε μια γραμμή πυρκαγιάς. Ανάλογα με τη χωρητικότητα του σκάφους, η ταχύτητα τοποθέτησης του σωλήνα μπορεί να είναι 6-8 km ανά ημέρα. Αυτή η μέθοδος απαιτεί υψηλή διαμήκη ένταση προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική κάμψη στο σημείο αφής (sag-bend) και στο σημείο αναχώρησης (over bend). Ένα stinger -μια δομή στο πίσω μέρος του πλοίου που υποστηρίζει τη θαλάσσια συμβολοσειρά σωλήνα για τον έλεγχο της ακτίνας κάμψης- που βρίσκεται στην

πρύμνη, του οποίου το μήκος μπορεί να φτάσει τα 300 ft (πόδια) , βοηθά στην στήριξη του αγωγού όταν μεταφέρεται στη θάλασσα.



Εικόνα 2.2:Τυπική διαμόρφωση μεθόδου S-lay (Palmer et al.,2008)

Όσον αφορά στα σκάφη (S-lay barge/vessels) που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση μπορούν να ταξινομηθούν ως πρώτης, δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς. Συγκεκριμένα, τα σκάφη πρώτης γενιάς χρησιμοποιούνται για πολύ ρηχά νερά, βάλτους και εσωτερικά ύδατα. Της δεύτερης γενιάς είναι αντίστοιχα σκάφη για ρηχά ύδατα με πρόσδεση από 4 έως 14 σημεία, τα οποία αξιοποιούνται για τη φύλαξη του σταθμού. Τρίτης γενιάς σκάφη χρησιμοποιούν άγκυρες για αποθήκευση των σταθμών. Το πρώτο σκάφος αυτής της γενιάς ήταν το Viking Piper που κατασκευάστηκε το 1975 και χρησιμοποιήθηκε ως φορηγίδα στη Βόρεια Θάλασσα για μικρό χρονικό διάστημα. Τέλος, τα σκάφη τέταρτης γενιάς χρησιμοποιούν συστήματα DP για τη φύλαξη σταθμών και χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση αγωγών βαθέων υδάτων. Παρακάτω, στην εικόνα 3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σκάφους της μεθόδου S-lay.

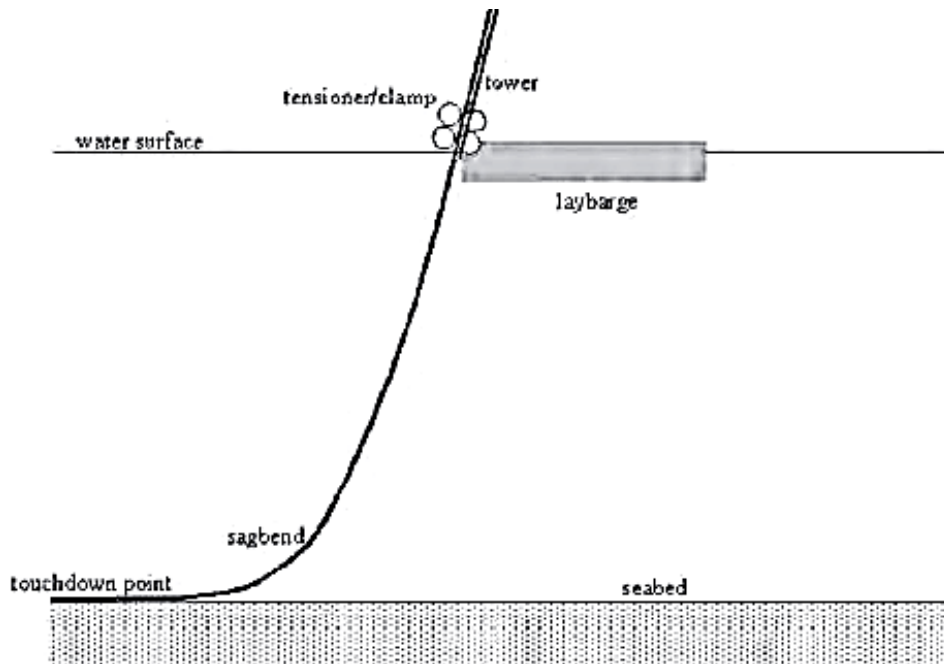
Λόγω του υψηλού ρυθμού παραγωγής και της δυνατότητας τοποθέτησης σωλήνων με επικάλυψη από σκυρόδεμα, η μέθοδος S-lay είναι εξαιρετικά κατάλληλη για εγκατάσταση σωλήνων σε ρηχά και ενδιάμεσα βάθη υδάτων. Τα μεγαλύτερα βάθη

είναι εξίσου δυνατά, αλλά απαιτούν πολύ μακρύ stinger, μετατρέποντας τη διαδικασία S-lay σε μια λιγότερο πρακτική και αποτελεσματική λύση.



Εικόνα 2.3: Σκάφος μεθόδου S-lay (Palmer et al.,2008)

Στη συνέχεια, η μέθοδος **J-lay** εγκατάστασης αγωγού, εφευρέθηκε με σκοπό να συμβαδίζει με την ανακάλυψη πεδίων πετρελαίου και φυσικού αερίου βαθέων υδάτων. Σύμφωνα, με τη μέθοδο αυτή τα μήκη του σωλήνα συγκολλούνται σε σχεδόν κάθετη ή κατακόρυφη ράμπα και χαμηλώνονται στον πυθμένα, γεγονός που δικαιολογεί την ονομασία της εφόσον αναπαριστά το γράμμα J. Η διαμόρφωση της J-lay μεθόδου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 4. Σε αυτήν τη διαμόρφωση, ο αγωγός από την επιφάνεια προς τον βυθό είναι μια κάμψη μεγάλης ακτίνας με αποτέλεσμα να έχει χαμηλότερες τάσεις από ένα σύστημα S-lay στο ίδιο βάθος νερού. Δεν υπάρχει μεγάλη κάμψη και ένα μεγάλο stinger το οποίο θεωρείται απαραίτητο στη μέθοδο S-lay για την υποστήριξη του σωλήνα σε βαθιά ύδατα, στη συγκεκριμένη περίπτωση εξαλείφεται. Επίσης, ο αγωγός κάμπτεται μόνο μία φορά κατά την εγκατάσταση (στο βυθό), κάτι που είναι πλεονεκτικό για την εγκατάσταση αγωγών που είναι “ευαίσθητοι”. Αντίστοιχα, απαιτούνται μικρότερες οριζόντιες δυνάμεις για τη διατήρηση αυτής της διαμόρφωσης, συγκριτικά με την προηγούμενη.



Εικόνα 2.4: Τυπική διαμόρφωση μεθόδου J-lay (Palmer et al.,2008)

Η διαδικασία αυτή είναι εφικτή στα σκάφη σχήματος πλοίου DP και στα σκάφη φορτωτήρων με πύργο J-lay. Οι μεγάλοι πύργοι J-lay έχουν εγκατασταθεί στα μεγαλύτερα βαρέα σκάφη ανύψωσης του κόσμου, συγκεκριμένα στο Saipem S7000 και στο Heerema's Balder καθώς και μικρότεροι πύργοι σε άλλα σκάφη, όπως το Stolt's Polaris και το McDermott's DB 50 και το Technip's Deep Blue.



Εικόνα 2.5: Σκάφος Heerema's Balder με πύργο J-lay (Guo et al.,2014)



Εικόνα 2.6: Σκάφος Saipem S7000 με πύργο J-lay (Guo et al.,2014)

Κανονικά, η διαδικασία J-lay είναι πιο χρονοβόρα από την S-lay, αλλά δεδομένου ότι οι μεγάλοι πύργοι J-lay είναι ικανοί να χειρίζονται προκατασκευασμένες τετράπλευρες αρθρώσεις (160 πόδια μήκος), η ταχύτητα των σωληνώσεων αυξάνεται.

Τέλος, χρησιμοποιείται συνήθως υδάτινα βάθη μεγαλύτερα από 500 πόδια. Αυτά τα βάθη είναι συνήθως πολύ μεγάλα για να λειτουργούν τα αγκυροβολημένα σκάφη επειδή οι απαιτούμενες τάσεις και οι τάσεις κάμψης σωλήνων είναι πολύ μεγάλες. Επιπρόσθετα, η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο κατάλληλη για ρηχά νερά καθώς αυτό απαιτεί απότομη γωνία αναχώρησης.

Η επόμενη **μέθοδος** είναι η **Reel lay**, κατά την οποία εγκαθίστανται υπεράκτιοι αγωγοί στον ωκεανό από ένα γιγαντιαίο κύλινδρο τοποθετημένο σε υπεράκτιο σκάφος. Η διαφοροποίηση της μεθόδου αυτής είναι ότι δε συνδέει κάθε σύνδεσμο αγωγού σε υπεράκτια θέση όπως οι προαναφερόμενες διαδικασίες (S-lay και J-lay), αντίθετα ο αγωγός είναι προ-συναρμολογημένος σε ένα καρούλι που είναι τοποθετημένο στο κατάστρωμα της φορηγίδας. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ταχύτερη επειδή η πλειοψηφία της συγκόλλησης και οι επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται στην ξηρά προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος εγκατάστασης. Μόλις τοποθετηθούν όλοι οι σωλήνες στον κύλινδρο, η φορηγίδα είτε επιστρέφει στην ακτή ενός άλλου τροχού ή ανυψώνει έναν νέο κύλινδρο από ένα σκάφος εφοδιασμού, η απόφαση αυτή εξαρτάται από το κάθε σκάφος. Άλλο ένα όφελος της διαδικασίας είναι η ελάττωση του κόστους εφόσον η

ακτινογραφία, η επίστρωση διάβρωσης και οι δοκιμές πραγματοποιούνται στην ξηρά, όπου το κόστος εργασίας είναι χαμηλότερο συγκριτικά με τις υπεράκτιες εργασίες.

Επιπρόσθετα, σημαντικό να αναφερθεί ότι οι τροχοί μπορούν να εγκατασταθούν οριζόντια ή κάθετα. Οι οριζόντιες φορηγίδες τροχών μπορούν να κάνουν εγκατάσταση σε ρηχά έως ενδιάμεσα υδάτινα βάθη με τη μέθοδο S-lay. Η διατήρηση του σταθμού των σκαφών με οριζόντιους τροχούς μπορεί να γίνει με άγκυρες ή DP. Ωστόσο, οι κάθετες φορηγίδες τροχών μπορούν να εκτελέσουν εγκατάσταση αγωγών από ενδιάμεσα έως βαθιά υδάτινα βάθη με τη μέθοδο J-lay και S-lay και η διατήρηση του σταθμού είναι πάντα με DP. Επιπλέον, διευκρινίζεται ότι σε βαθιά ύδατα αξιοποιείται η μέθοδος J-lay.

Τέλος, όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σωλήνα που μπορεί να αξιοποιηθεί από τη μέθοδο αυτή, είναι σωλήνες διαμέτρου έως 16". Επίσης, τονίζεται ότι δεν είναι δυνατή η χρήση μεγάλου σωλήνα επειδή το μέγεθος τον καθιστά λιγότερο εύκαμπτο με αποτέλεσμα να μην τυλίγεται με ευκολία στον κύλινδρο.



Εικόνα 2.7: Οριζόντια φορηγίδα με τροχούς (Reel-lay) σε διαμόρφωση S-lay (Guo et al.,2014)

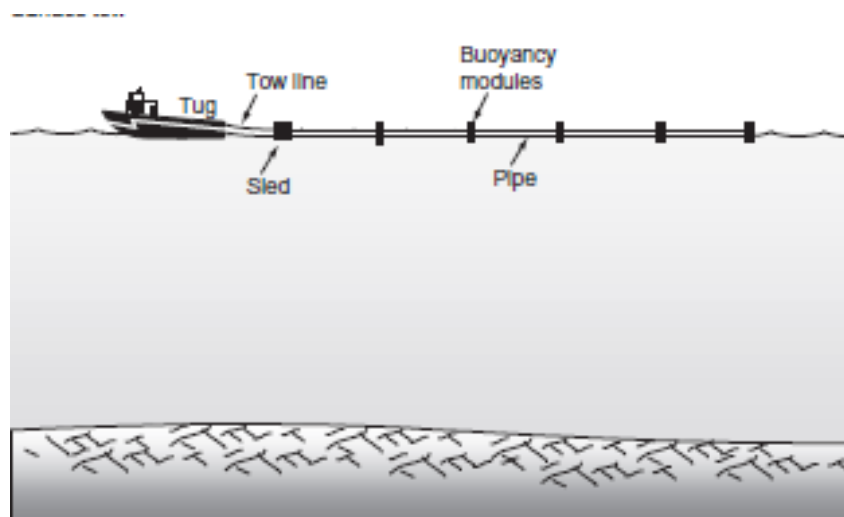


Εικόνα 2.8: Κάθετη φορηγίδα με τροχούς (Reel-lay) σε διαμόρφωση J-lay (Guo et al.,2014)

Τελευταία **μέθοδος** εγκατάστασης υποθαλάσσιων αγωγών είναι η **ρυμούλκηση (tow)**, η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για ομαδοποιημένους αγωγούς, δηλαδή πολλοί αγωγοί διαφορετικών λειτουργιών συσκευάζονται μέσα σε έναν μεγάλο σωλήνα μεταφοράς. Η μέθοδος αυτή παρατηρείται κυρίως στις εγκαταστάσεις που αφορούν αγωγούς σε εσωτερικές λίμνες, σε μεγάλους ποταμούς και υπεράκτια. Λεπτομερώς, ο αγωγός κατασκευάζεται σε χερσαία τοποθεσία και κατόπιν ρυμουλκείται σε μια τοποθεσία υπεράκτια όπου συνδέεται κάθε άκρο του σε προεγκατεστημένες εγκαταστάσεις. Όταν βρεθεί στην τελική του θέση, τα ανωστικά σώματα αφαιρούνται ή γεμίζονται με νερό και ο αγωγός βυθίζεται μέσα στο νερό, μέχρι να βρεθεί στον πυθμένα. Η τεχνική εγκατάσταση του επιτρέπει στον συγκολλημένο αγωγό να συγκολληθεί, να ελεγχθεί και να δοκιμαστεί στην ξηρά πριν από την εγκατάσταση, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η οποιαδήποτε αστοχία.

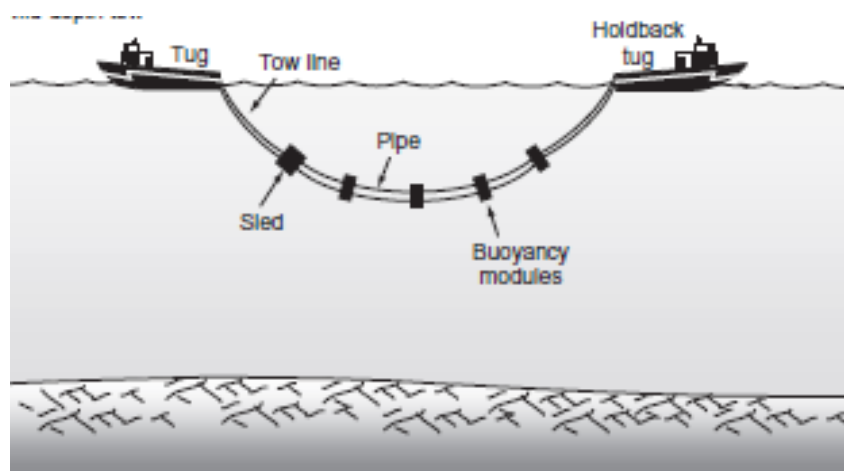
Η εγκατάσταση του αγωγού μέσω ρυμούλκησης πραγματοποιείται με τέσσερις τρόπους. Πρώτος τρόπος είναι η **επιφανειακή ρυμούλκηση (Surface Tow)**, κατά την οποία οι μονάδες πλευστότητας εγκαθίστανται σε σχεδιασμένα διαστήματα έτσι ώστε ο αγωγός να αιωρείται και η κορυφή του σωλήνα να σπάει την επιφάνεια. Χρησιμοποιούνται δύο ρυμουλκά για τη ρυμούλκηση του αγωγού, το ένα εξ αυτών χρησιμοποιείται για να τραβήξει και το άλλο για να συγκρατήσει, επομένως επιτυγχάνεται ελεγχόμενη μεταφορά του αγωγού. Εφόσον ο αγωγός ρυμουλκηθεί στην επιθυμητή θέση, στη συνέχεια πλημμυρίζει με μια συγκεκριμένη διαδικασία προκειμένου να κατεβεί με ασφάλεια στον πυθμένα. Αυτή η τεχνική είναι ευάλωτη σε επιδείνωση του καιρού.

Ισχυρές καιρικές συνθήκες μπορεί να καταστρέψουν τον αγωγό ενώ μεταφέρεται. Επιπλέον, σε ισχυρή τρέχουσα κατάσταση, είναι εξαιρετικά δύσκολο να τοποθετηθεί με ακρίβεια ο αγωγός.



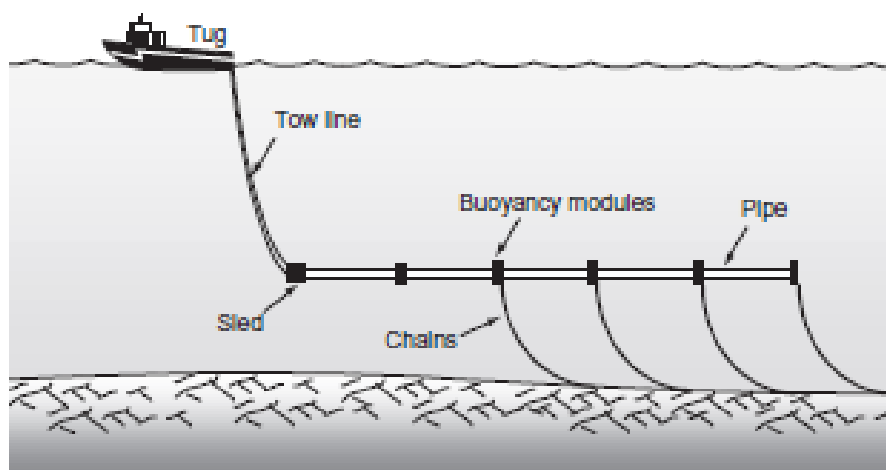
Εικόνα 2.9: Επιφανειακή ρυμούλκηση (Surface Tow) (Guo et al.,2014)

Δεύτερος τρόπος είναι η **ρυμούλκηση μέσου βάθους (Mid-depth Tow)**, με την τεχνική αυτή ολόκληρο το μήκος του αγωγού διατηρείται σε σημαντικό ύψος πάνω από τον πυθμένα κατά τη διάρκεια της ρυμούλκησης. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτούνται διακριτές πλευστότητες, αλυσίδες και μεγάλη τάση που εφαρμόζεται στον αγωγό. Αυτή η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για πολύ μεγάλους αγωγούς (μεγαλύτερα από 3 μίλια).



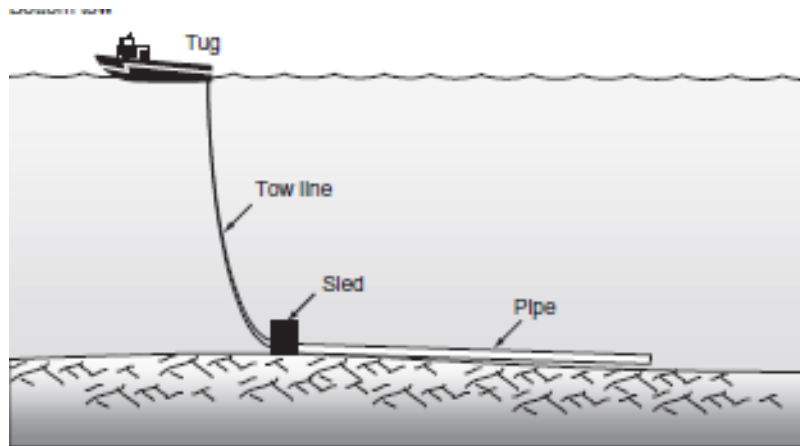
Εικόνα 2.10: Ρυμούλκηση μέσου βάθους (Mid-depth Tow) (Guo et al.,2014)

Τρίτο τρόπο αποτελεί η μέθοδος **ρυμούλκησης πάνω από τον πυθμένα (Off-Bottom Tow)**, σύμφωνα με αυτή ο βυθισμένος αγωγός είναι πλευστός και επιπλέει πάνω από τον βυθό σε ένα προκαθορισμένο ύψος περίπου 1-2 μέτρα κατά τη ρυμούλκηση. Ο αγωγός συγκρατείται από αλυσίδες οι οποίες κρέμονται από αυτόν και σύρονται στον πυθμένα της θάλασσας. Ο κίνδυνος ζημιάς των σωλήνων λόγω τριβής εξαλείφεται επειδή ο αγωγός δεν έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα της θάλασσας.



Εικόνα 2.11: Ρυμούλκηση πάνω από τον πυθμένα (Off-bottom Tow) (Guo et al.,2014)

Τέταρτος και τελευταίος τρόπος **ρυμούλκησης** είναι αυτός **πάνω στον πυθμένα (Bottom Tow)**, όπου ο αγωγός ακουμπά στον βυθό της θάλασσας. Για τη μέθοδο αυτή απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή διότι υπάρχει πιθανότητα η κατάσταση της θάλασσας να μην είναι καλή για το πλοίο ρυμούλκησης, επομένως στην περίπτωση αυτή ο αγωγός παραμένει στον πυθμένα και ανακτάται αργότερα όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες. Επιπλέον, αντιμετωπίζονται δυσκολίες εφόσον ο αγωγός αγγίζει το βυθό συνεχώς, συνεπώς η εξωτερική προστασία του μπορεί να καταστραφεί σε κάποιο βαθμό. Επομένως, μπορούν να εγκατασταθούν μονάδες πλευστότητας προκειμένου να μειωθεί το βυθισμένο βάρος και η δύναμη τριβής που ενεργεί στο σώμα του αγωγού.



Εικόνα 2.12: Ρυμούλκηση πάνω στον πυθμένα (Bottom Tow) (Guo et al.,2014)

2.2.2. Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών

Ο σχεδιασμός των υποθαλάσσιων αγωγών πραγματοποιείται συνήθως σε τρία στάδια: εννοιολογική μηχανική ανάλυση (σύλληψη αντικειμένου), προκαταρκτική μηχανική ανάλυση και λεπτομερής μηχανική ανάλυση. Ο αντικειμενικός στόχος αυτών των σταδίων σχεδίασης εξαρτάται από τον τελικό χρήστη και από το μέγεθος του εγχειρήματος. Κατά το στάδιο της σύλληψης του αντικειμένου αντιμετωπίζονται θέματα τεχνικής σκοπιμότητας και περιορισμοί στο σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος. Εξαλείφονται οι μη βιώσιμες επιλογές και παρουσιάζονται όλες οι πιθανές δυσκολίες κατά τον σχεδιασμό. Το αποτέλεσμα της εννοιολογικής μηχανικής ανάλυσης δίνει ακόμα τη δυνατότητα εκτίμησης του βασικού κόστους και του προγράμματος υλοποίησης καθώς επίσης και την αναγνώριση πιθανών αλληλεπιδράσεων με άλλα συστήματα, που έχουν προγραμματιστεί ή έχουν ήδη υλοποιηθεί. Η αξία του συγκεκριμένου σταδίου βασίζεται στην αποκάλυψη δυνητικών δυσκολιών και στην αναγνώριση των αντικειμένων, για τα οποία θα απαιτηθεί μεγαλύτερη προσπάθεια κατά τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών. Η προκαταρκτική μηχανική ανάλυση ορίζει το μέγεθος του αγωγού και παρέχει λεπτομέρειες σχεδιασμού επαρκείς για την παραγγελία του, οι οποίες σχετίζονται με την επιλογή υλικού, το πάχος τοιχώματός του καθώς επίσης επιδιώκεται η τήρηση των κανονισμών για την εγκατάσταση και λειτουργία του αγωγού. Επίσης, στόχος της προκαταρκτικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του χρόνου και της ποσότητας του υλικού που θα απαιτηθεί για την κατασκευή του αγωγού. Στο στάδιο της λεπτομερής μηχανικής ανάλυσης διαμορφώνεται η σχεδίαση σε τέτοιο βαθμό ώστε τα

τεχνικά δεδομένα, οι απαραίτητες προμήθειες και οι συμφωνίες κατασκευής να μπορούν να προσδιοριστούν με αρκετές λεπτομέρειες. Στόχοι της ανάλυσης αυτής, είναι η βελτιστοποίηση της διαδρομής που θα ακολουθήσει ο αγωγός, η επιλογή του πάχους του τοιχώματος και του προστατευτικού περιτυλίγματος, η επιβεβαίωση της επάρκειας της σχεδίασης και η εφαρμογή πρόσθετων σχεδιαστικών εργαλείων, όπως έχει οριστεί κατά την προκαταρκτική σχεδίαση, η ανάπτυξη των κατασκευαστικών σχεδίων με επαρκείς λεπτομέρειες, για τον επιδιωκόμενο στόχο, η προετοιμασία λεπτομερών σχεδίων ευθυγράμμισης του αγωγού στον πυθμένα, με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας της τοπογραφίας του, η προετοιμασία προδιαγραφών για τα υλικά, το κόστος και τις δραστηριότητες κατασκευής και μεταφοράς του αγωγού στον τόπο λειτουργίας του.

Συνεπώς, ο πλήρης σχεδιασμός του αγωγού περιλαμβάνει το μέγεθος του αγωγού (εσωτερική διάμετρος και πάχος τοιχώματος), την επιλογή ποιότητας του υλικού με βάση αναλύσεις που αφορούν τάσεις, υδροδυναμική σταθερότητα, θερμομόνωση, διάβρωση και σταθερότητα αγωγού καθώς και προδιαγραφές ανύψωσης.

Τα προαναφερθέντα στοιχεία αφορούν την πρακτική προσέγγιση για το σχεδιασμό του αγωγού. Ωστόσο, σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις στη θαλάσσια τεχνολογία χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλυσης και σχεδίασης αξιοποιώντας σύγχρονα υλικά και τους αναθεωρημένους κώδικες σχεδίασης. Η νέα σχεδιαστική προσέγγιση ονομάζεται Σχεδίαση Μέσω Ανάλυσης κατά την οποία χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι όπως η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων με σκοπό την προσομοίωση της γενικής συμπεριφοράς του αγωγού (στατικής και δυναμικής), καθώς επίσης και της τοπικής αντοχής του. Το πλεονέκτημα της χρήσης αναπτυγμένων μεθόδων μηχανικής ανάλυσης είναι η μείωση της πιθανότητας συντηρητικών σχεδιάσεων, μέσα από τον ακριβέστερο προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιδράσεων και των καταστάσεων φόρτισης της κατασκευής. Τα στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ανάλυσης είναι αρχικά η εφαρμογή της πρωταρχικής σχεδίασης σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες και τους ισχύοντες κώδικες, ο υπολογισμός της γενικής δυναμικής συμπεριφοράς μέσω της μοντελοποίησης του συστήματος, οι προσομοιώσεις της δυναμικής συμπεριφοράς με εφαρμογή των μέγιστων αναμενόμενων φορτίσεων, η αναγνώριση και εύρεση των δυνητικά προβληματικών περιοχών, ο έλεγχος των αστοχιών, η ανάπτυξη μεθόδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους και τη διατήρηση του απαιτούμενου επιπέδου ασφαλείας, η εφαρμογή

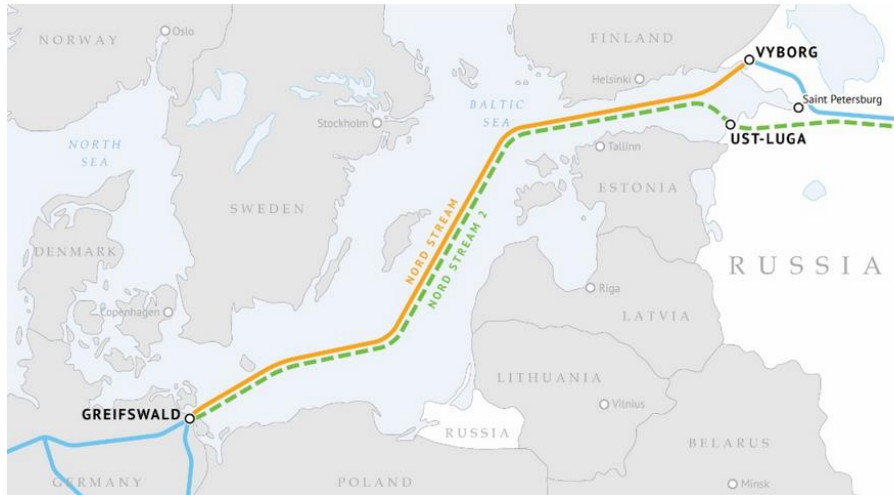
επαναληπτικών κύκλων βελτιστοποίησης της σχεδίασης και τέλος η παροχή υποστήριξης για τη συντήρηση και λειτουργία των αγωγών.

2.3. Σημαντικοί Υποθαλάσσιοι Αγωγοί Παγκοσμίως

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι δέκα σημαντικότεροι και μεγαλύτεροι υποθαλάσσιοι αγωγοί στον κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, ο μεγαλύτερος αγωγός είναι ο **Nord Stream**, ο οποίος αποτελεί ένα σύστημα διπλού αγωγού διαμέτρου 48 ιντσών, διανύοντας 1222 χιλιόμετρα. Ξεκινάει από τη Ρωσία και καταλήγει στη Γερμανία. Περιλαμβάνει δύο γραμμές που εκτελούνται από το Vyborg προς το Lubmin κοντά στο Greifswald σχηματίζοντας το αρχικό Nord Stream και δύο γραμμές υπό κατασκευή από το Ust-Luga στο Lubmin που ονομάζεται Nord Stream 2. Ο Nord Stream έχει συνολική ετήσια χωρητικότητα 55 δισεκατομμυρίων κυβικά μέτρα φυσικού αερίου και η προσθήκη του Nord Stream 2 αναμένεται να διπλασιάσει την χωρητικότητα σε συνολικά 110 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Από το Greifswald, το αέριο διοχετεύεται στο γερμανικό δίκτυο και σε άλλες ευρωπαϊκές αγορές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των Κάτω Χωρών, της Δανίας, της Γαλλίας και του Ηνωμένου Βασιλείου. Η πρώτη γραμμή του Nord Stream τέθηκε τον Μάιο του 2011 και εγκαινιάστηκε στις 8 Νοεμβρίου 2011.

Επόμενος σημαντικός αγωγός θεωρείται ο **Langeled**, ο οποίος πριν την ολοκλήρωση του Nord Stream, κατατασσόταν στην πρώτη θέση των υποθαλάσσιων αγωγών καθώς διένυε συγκριτικά το μεγαλύτερο μήκος διαδρομής. Ο αγωγός αυτός φυσικού αερίου διασχίζει 1166 χιλιόμετρα μέσω της Βόρειας Θάλασσας από τον τερματικό σταθμό Nyhamna της Νορβηγίας μέσω της πλατφόρμας Sleipner Riser στη Βόρεια Θάλασσα έως τον τερματικό σταθμό αερίου Easington στην Αγγλία. Συγκεκριμένα, ο αγωγός μεταφέρει φυσικό αέριο από τον τερματικό σταθμό αερίου Ormen Lange στο Ηνωμένο Βασίλειο, αλλά μέσω του συνδέσμου στο Sleipner Riser παρέχει επίσης την ευκαιρία να στείλει αέριο μέσω του υπάρχοντος δικτύου της Gassco στην ηπειρωτική Ευρώπη. Το βόρειο σκέλος του με διάμετρο 42 ιντσών έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει 80 εκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ανά ημέρα από το Nyhamna στο πεδίο Sleipner East και τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο του 2007. Το νότιο σκέλος του με διάμετρο 44 ιντσών, διαθέτει χωρητικότητα 70 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ανά ημέρα

για να μεταφερθεί το φυσικό αέριο από το κέντρο Sleipner East στο Easington και τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 2006.



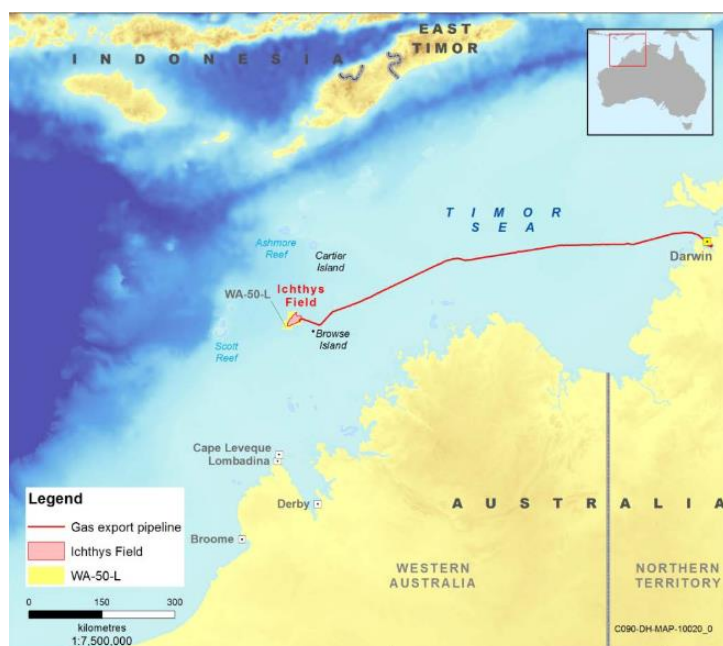
Εικόνα 2.13 : Χάρτης απεικόνισης του αγωγού Nord Stream 1 και του υπο-κατασκευής Nord Stream 2 (Πηγή: www.gazprom.com)



Εικόνα 2.14: Χάρτης απεικόνισης του υποθαλάσσιου αγωγού Langeled (Solberg et al., 2007)

Τρίτος αγωγός κατά σειρά παγκοσμίως είναι ο **Ichthys**, έχει μήκος 889 χιλιομέτρων και αναπτύσσεται στη θάλασσα Τίμορ (Timor Sea). Αξιοποιείται για τη μεταφορά

φυσικού αερίου από το πεδίο αερίου Ichthys που βρίσκεται στη λεκάνη Browse σε μια χερσαία εγκατάσταση επεξεργασίας Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) στο Blaydin Point, Darwin. Γενικά, απέχει 220 χιλιόμετρα υπεράκτια της Δυτικής Αυστραλίας και 820 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά του Darwin. Καλύπτει μια έκταση περίπου 800 τετραγωνικών χιλιομέτρων σε νερό με μέσο όρο βάθης περίπου 250 μέτρα. Η διαμετρός του είναι 42 ίντσες και παράγει 8,9 εκατομμύρια τόνους υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) και 1,65 εκατομμύρια τόνους υγραερίου (LPG) ετησίως, μαζί με πάνω από 100.000 βαρέλια συμπυκνώματος την ημέρα. Είναι ένα από τα λίγα ενεργειακά έργα παγκοσμίως που ενσωματώνει ολόκληρη την αλυσίδα ανάπτυξης και παραγωγής: υποθαλάσσια, υπεράκτια, αγωγούς και χερσαία. Το αέριο και το συμπύκνωμα από το Ichthys Field εξάγονται σε χερσαίες εγκαταστάσεις για επεξεργασία κοντά στο Darwin μέσω του αγωγού. Τα περισσότερα συμπύκνωματα αποστέλλονται απευθείας σε παγκόσμιες αγορές από μια πλωτή εγκατάσταση παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης που είναι αγκυροβολημένη μόνιμα κοντά στο Ichthys Field στη λεκάνη αναζήτησης.



Εικόνα 2.15: Ο χάρτης απεικόνισης του υποθαλάσσιου αγωγού Ichthys
(Πηγή: info.nopsema.gov.au/offshore_projects)

Στη συνέχεια, ο αγωγός φυσικού αερίου **Franpipe** έχει μήκος 840 χιλιόμετρα και συνδέει την πλατφόρμα ανύψωσης Draupner E στη Βόρεια Θάλασσα με τον τερματικό σταθμό παραλαβής στο Port Ouest στο Dunkirk της Γαλλίας. Το αέριο που μεταφέρεται στη Γαλλία προέρχεται κυρίως από τις περιοχές φυσικού αερίου Sleipner East και Troll Vest. Ο συγκεκριμένος αγωγός εγκαινιάστηκε επίσημα τον Οκτώβρη του 1998. Η διάμετρος του είναι 42 ίντσες και η χωρητικότητά του είναι 19,6 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως.

Πέμπτος αγωγός κατά σειρά είναι ο **Zeepipe-I**, ο οποίος αποτελεί ένα σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου που συνδέει την πλατφόρμα Sleipner στη Βόρεια Θάλασσα με τον τερματικό σταθμό υποδοχής Zeebrugge στις βελγικές ακτές, καλύπτοντας απόσταση 814 χιλιομέτρων. Ο αγωγός έχει διάμετρο 40 ίντσες και η χωρητικότητά του είναι 15 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως. Τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο του 1993, όπου εκείνη την περίοδο της κατασκευής του, ήταν ο μεγαλύτερος υπεράκτιος αγωγός στον κόσμο. Το δεύτερο τμήμα του Zeepipe I αποτελείται από έναν αγωγό διαμέτρου 30 ιντσών από το Draupner S στο Sleipner και συνδέει το Zeepipe με το Statpipe. Ο Zeepipe II A, που λειτουργεί από το 1996, έχει μήκος 303 χιλιόμετρα και διάμετρο 40 ιντσών, ξεκινάει από το εργοστάσιο επεξεργασίας φυσικού αερίου Kollsnes στη Νορβηγία και καταλήγει στο Sleipner Riser. Η χωρητικότητά του Zeepipe II A είναι 26,3 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως. Ο Zeepipe IIB που λειτουργεί από το 1997, εκτείνεται από το Kollsnes έως το Draupner E με διάμετρο 40 ιντσών, μήκος 299 χιλιομέτρων και χωρητικότητα περίπου 25,9 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως.

Ένας ακόμη σημαντικός υποθαλάσσιος αγωγός είναι ο **Yacheng 13-1** ο οποίος διασχίζει 780 χιλιόμετρα από το πεδίο φυσικού αερίου Yacheng που βρίσκεται 100 χιλιόμετρα νότια του νησιού Hainan, στη Θάλασσα της νότιας Κίνας, σε μια χερσαία εγκατάσταση στο Black Point κοντά στο Χονγκ Κονγκ, όπου το αέριο θα υποβληθεί σε επεξεργασία, θα μετρηθεί και θα παραδοθεί. Επίσης, ο υποθαλάσσιος αγωγός διαμέτρου 28 ιντσών παρέχει φυσικό αέριο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Castle Peak Company στο Χονγκ Κονγκ. Στην αρχή ο αγωγός αυτός σχεδιάστηκε ως χερσαίος αγωγός και αργότερα έγινε ο μακρύτερος υποθαλάσσιος αγωγός της Ασίας και τέθηκε σε λειτουργία το 1994.

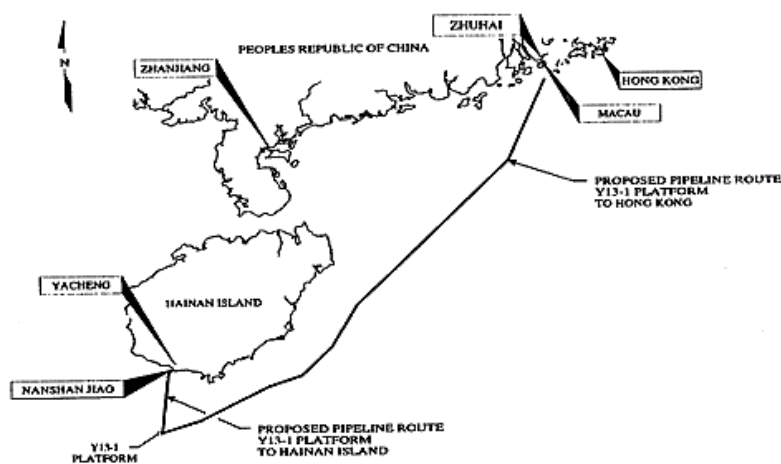


Figure 1

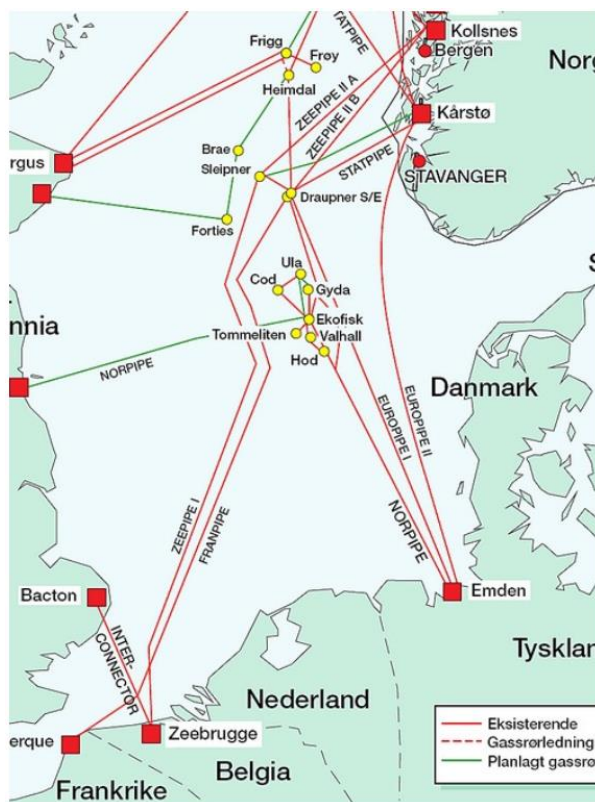
Εικόνα 2.16: Χάρτης απεικόνισης του υποθαλάσσιου αγωγού Yacheng 13-1 (Miao Yuan Fei et al., 1995)

Στη Βόρεια Θάλασσα υπάρχει επίσης ο έβδομος κατά σειρά αγωγός, ο οποίος ονομάζεται **Asgard**, βρίσκεται βόρεια του Stavanger και διασχίζει 707 χιλιόμετρα στη Βόρεια Θάλασσα. Είναι διαμέτρου 42 ιντσών και μεταφέρει 11 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως. Ο αγωγός χωρίζεται σε τρία πεδία. Το Asgard A αντιστοιχεί στο σκάφος παραγωγής πετρελαίου και τέθηκε σε λειτουργία το 1999. Η Asgard B είναι η είναι μια ημι-υποβρύχια πλατφόρμα επεξεργασίας αερίου και συμπυκνωμάτων, η οποία κυκλοφόρησε το 2000 και το Asgard C είναι ένα δοχείο αποθήκευσης συμπυκνωμάτων.

Ο επόμενος υποθαλάσσιος αγωγός είναι ο **Europipe-II**, ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία το 1999 και ξεκινά από το εργοστάσιο επεξεργασίας Karsto. Διαρκεί περίπου 13 χιλιόμετρα στην ξηρά από το Karsto έως το Vestre Bokn. Από εκεί, ο υπεράκτιος αγωγός 642 χιλιομέτρων διέρχεται από νορβηγικούς, δανικούς και γερμανικούς τομείς της Βόρειας Θάλασσας. Το γερμανικό χερσαίο τμήμα έχει μήκος 15 χιλιόμετρα. Στο Dornum το αέριο τροφοδοτείται στον αγωγό φυσικού αερίου Netra (Norddeutsche Erdgas Transversale), ο οποίος οδηγεί στο Salzwedel στην ανατολική Γερμανία. Η διάμετρος του αγωγού είναι 42 ίντσες και η χωρητικότητα είναι 24 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως.

Ένας ακόμη αγωγός είναι ο **Europipe I** ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία το 1995 και είναι μήκους 670 χιλιομέτρων (Βόρεια Θάλασσα προς Ηπειρωτική Ευρώπη). Ο αγωγός

συνδέει την πλατφόρμα ανύψωσης Draupner E στη Βόρεια Θάλασσα προς έναν τερματικό σταθμό λήψης στο Dornum της Γερμανίας. Στο Draupner E, συνδέεται με τους αγωγούς Zeeripe και Statpipe / Norpipe. Από το Dornum, διασχίζει μήκος 48 χιλιομέτρων ώστε να φτάσει στο σταθμό μέτρησης στο Emden (στις γερμανικές ακτές). Η διάμετρος του αγωγού είναι 40 ίντσες και η χωρητικότητά του είναι 18 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως. Το έργο Europipe-I περιλαμβάνει επίσης την κατασκευή μιας υπόγειας σήραγγας μήκους 2,53 χιλιομέτρων κοντά στη γερμανική ακτή, ενός τερματικού σταθμού παραλαβής στο Dornum και του σταθμού μέτρησης Europipe (EMS) στο Emden.



Εικόνα 2.17: Ο χάρτης απεικόνισης των υποθαλάσσιων αγωγών Franpipe, Zeeripe, Europipe (Πηγή: www.norskolje.museum.no/en)

Τέλος, σημαντικό να αναφερθεί ένας ακόμη αγωγός ο **Trans Adriatic Pipeline (TAP)** δηλαδή ο Διαδριατικός ή Αδριατικός αγωγός, ο οποίος αξιοποιείται με σκοπό τη μεταφορά φυσικού αερίου. Συγκεκριμένα, ο Διαδριατικός Αγωγός Φυσικού Αερίου (TAP) ξεκινά από τους Κήπους στα ελληνοτουρκικά σύνορα, όπου έχει συνδεθεί με τον Trans Anatolian Pipeline (TANAP) ή αλλιώς αγωγός φυσικού αερίου της Ανατολίας.

Διασχίζει τη Βόρεια Ελλάδα, κατευθυνόμενος δυτικά προς την Ιεροπηγή Καστοριάς και τα ελληνοαλβανικά σύνορα. Περνώντας από την Αλβανία και την Αδριατική θάλασσα, ο αγωγός εξέρχεται στη στεριά στη Νότια Ιταλία, όπου συνδέεται με το ιταλικό δίκτυο διανομής φυσικού αερίου. Η όδευση του TAP μπορεί να διευκολύνει την προμήθεια φυσικού αερίου σε αρκετές χώρες της Νοτιοανατολικής Ευρώπης, και η προσγειάωση του αγωγού στις ακτές της Ιταλίας παρέχει πολλαπλές δυνατότητες για περαιτέρω μεταφορά αερίου της Κασπίας στις ευρύτερες ευρωπαϊκές αγορές. Επιπλέον, πρόκειται για αγωγό συνολικού μήκους 878 χλμ, εκ των οποίων τα 773 χλμ αντιστοιχούν στο χερσαίο τμήμα του, ενώ τα υπόλοιπα 105 χλμ βρίσκονται υποθαλάσσια. Οι πρώτοι σωληναγωγοί στην Αλβανία παραδόθηκαν τον Απρίλιο του 2016, ενώ πρόσφατα το 2020 ολοκληρώθηκε το υποθαλάσσιο τμήμα του αγωγού. Ακόμη, η διάμετρος του υποθαλάσσιου τμήματος του ανέρχεται στις 36 ίντσες και η χωρητικότητα του στα 20 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα αερίου ετησίως.



Εικόνα 2.18: Χάρτης απεικόνισης του Διαδριατικού (ή Αδριατικού) Αγωγού φυσικού αερίου (TAP)
(Πηγή: www.tap-ag.com)

2.4. Υποθαλάσσιοι Αγωγοί στη Μεσόγειο Θάλασσα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι ήδη υπάρχοντες υποθαλάσσιοι αγωγοί της περιοχής μελέτης της παρούσας εργασίας δηλαδή της Μεσογείου θάλασσας καθώς επίσης και ορισμένοι υπό κατασκευή. Πρόκειται για αγωγούς μεταφοράς φυσικού

αερίου από την Αλγερία και τη Λιβύη στην Ιταλία και την Ισπανία και μέσω αυτών στην Υπόλοιπη Ευρώπη.

Αρχικά, από τους πιο γνωστούς αγωγούς της Μεσογείου Θάλασσας είναι ο **Trans-Mediterranean** (TransMed), που από το 2000 πήρε το όνομα του από τον Enrico Mattei. Η πρώτη φάση του αγωγού αυτού κατασκευάστηκε από το 1978 έως το 1983 και η δεύτερη από το 1991 έως το 1994. Στη συνέχεια, το Φεβρουάριο του 2010 ολοκληρώθηκε ένα νέο τμήμα 549 χιλιομέτρων. Πρόκειται για έναν αγωγό φυσικού αερίου που ξεκινάει από την Αλγερία διασχίζει την Τυνησία, κατευθύνεται προς τη Σικελία και από εκεί προς την ηπειρωτική Ιταλία. Συγκεκριμένα, ξεκινά από το πεδίο φυσικού αερίου Hassi R'mel της Αλγερίας και διασχίζει 550 χιλιόμετρα μέχρι τα σύνορα της Τυνησίας. Στην Τυνησία διανύει 370 χιλιόμετρα προς την El Haouaria στην περιοχή Cap Bon και κατόπιν διασχίζει το κανάλι της Σικελίας 155 χιλιομέτρων. Με αφετηρία το Mazara del Vallo στη Σικελία συνεχίζει 340 χιλιόμετρα, 15 χιλιόμετρα πέρα από το στενό της Μεσσήνας και 1055 χιλιόμετρα εξακολουθεί να πορεύεται μέχρι την κοιλάδα του ποταμού Πάδου (Po Valley) στο βόρειο τμήμα της Ιταλίας, στις εγκαταστάσεις της εταιρίας Po Valley Energy, αυστραλιανών συμφερόντων. Όσον αφορά τη χωρητικότητα του αγωγού κυμαίνεται στα 30,2 έως 33,5 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως.

Επόμενος αγωγός είναι ο **Maghreb–Europe Gas Pipeline (MEG)** γνωστός και ως αγωγός Pedro Duran Farell. Η ιδέα για τον αγωγό αυτόν ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 ωστόσο τέθηκε σε λειτουργία το 1996, με σκοπό τη σύνδεση του πεδίου Hassi R'mel στην Αλγερία μέσω του Μαρόκου με την Κόρδοβα στην Ανδαλουσία της Ισπανίας, όπου συνδέεται με τα ισπανικά και πορτογαλικά δίκτυα αερίου. Προμηθεύει κυρίως την Ισπανία, την Πορτογαλία καθώς και το Μαρόκο με φυσικό αέριο. Το μήκος του υπεράκτιου τμήματος που διασχίζει τα στενά του Γιβραλτάρ είναι 45 χιλιόμετρα ενώ το συνολικό μήκος του αγωγού ανέρχεται στα 1620 χιλιόμετρα. Η αρχική χωρητικότητα του αγωγού ήταν 8,6 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως, το οποίο αργότερα επεκτάθηκε στα 12 δισ. κυβικά μέτρα.

Στη συνέχεια, ένας ακόμη αγωγός και συγκεκριμένα υποθαλάσσιος αγωγός φυσικού αερίου είναι ο **Greenstream** ο οποίος με αφετηρία τη δυτική Λιβύη κατευθύνεται προς το νησί της Σικελίας στην Ιταλία. Η ιδέα του έργου αυτού ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 ωστόσο η κατασκευή του ξεκίνησε το 2003 και κατάφερε να ολοκληρωθεί το 2004. Το μήκος του ανέρχεται στα 540 χιλιόμετρα συνολικά και εκτείνεται από τη Mellitah στη

Λιβύη έως τη Gela, στη Σικελία της Ιταλίας. Βρίσκεται σε βάθος νερού άνω των 1.100 μέτρων (3.600 πόδια). Και η διάμετρος του είναι 32 ίντσες (810 mm). Η αρχική χωρητικότητα του κυμαίνεται στα 8 δισ. κυβικά μέτρα (bcm) φυσικού αερίου ετησίως, η οποία στη συνέχεια αυξήθηκε στα 11 δισ. κυβικά μέτρα.

Με σκοπό τη διασύνδεση και τη μεταφορά φυσικού αερίου μεταξύ της Αλγερίας και της Ισπανίας δημιουργήθηκε τη δεκαετία του 1970 η ιδέα για την κατασκευή του αγωγού **Medgaz**. Ωστόσο, η κατασκευή του ξεκίνησε το 2008 και εγκαινιάστηκε επισήμως το 2011. Πιο συγκεκριμένα, σε χερσαίο επίπεδο ο αγωγός ξεκινάει από το πεδίο εξόρυξης φυσικού αερίου Hassi R'mel στην Αλγερία και εκτείνεται μέχρι το λιμάνι Beni Saf. Στη συνέχεια, ξεκινάει από την ευρωπαϊκή ήπειρο και συγκεκριμένα από την Αλμερία με σκοπό να συνδεθεί με τον υπάρχοντα αγωγό Almería-Albacete, το τμήμα αυτό του αγωγού παραμένει χερσαίο. Το υποθαλάσσιο τμήμα του αγωγού ξεκινά από το Beni Saf και καταλήγει στην παραλία Perdigal στην ακτή της Αλμερίας της Ισπανίας. Το μήκος της Αλγερινής χερσαίας περιοχής είναι 547 χιλιόμετρα, ενώ το υπεράκτιο τμήμα είναι 210 χιλιόμετρα. Όσον αφορά στην αρχική χωρητικότητα του κυμαίνεται στα 8 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως, ωστόσο είναι δυνατό να αυξηθεί.

Εξίσου σημαντικός αγωγός που λαμβάνει χώρα στη Μεσόγειο Θάλασσα είναι ο **GALSI**. Πρόκειται για έναν υπό κατασκευή αγωγό φυσικού αερίου ο οποίος θα ξεκινάει από την Αλγερία και θα καταλήγει στη βόρεια Ιταλία διαμέσου της Σαρδηνίας. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός είναι να ξεκινάει από το πεδίο εξόρυξης φυσικού αερίου Hassi R'mel στην Αλγερία και διασχίζοντας μήκος 640 χιλιομέτρων θα οδηγείται στο Koudiet Draouche στην ακτή της Μεσογείου. Στη συνέχεια, το υπεράκτιο τμήμα 285 χιλιομέτρων θα τοποθετηθεί μεταξύ Koudiet Draouche και Porto Botte στη Σαρδηνία, όπου κατόπιν από το νότο έως την Όλμπια διασχίζει περίπου 300 χιλιόμετρα. Ακόμη, το επόμενο υπεράκτιο τμήμα μεταξύ της Σαρδηνίας και της ηπειρωτικής Ιταλίας ανέρχεται στα 280 χιλιόμετρα μήκος με σκοπό να συνδεθεί με το υπάρχον ιταλικό δίκτυο φυσικού αερίου στην Τοσκάνη. Η διάμετρος του αγωγού θα κυμαίνεται μεταξύ 22 και 48 ίντσες, έχοντας ως χωρητικότητα 8 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως.

Τέλος, ο αγωγός **Trans-Saharan (NIGAL)** είναι ένας προγραμματισμένος αγωγός φυσικού αερίου από τη Νιγηρία προς την Αλγερία. Πιο συγκεκριμένα, ο αγωγός αυτός θα ξεκινάει από την περιοχή Warri της Νιγηρίας και θα διασχίσει βόρεια μέσω του Νίγηρα φτάνοντας έως το Hassi R'Mel στην Αλγερία. Στο Hassi R'Mel, ο αγωγός θα

συνδεθεί με τους υπάρχοντες αγωγούς Trans-Mediterranean, Maghreb – Europe, Medgaz και Galsi. Το μήκος του αγωγού υπολογίζεται ότι θα ανέρχεται στα 4.128 χιλιόμετρα συνολικά, εκ των οποίων τα 1037 χιλιόμετρα θα ανήκουν στο τμήμα που θα κατασκευαστεί στη Νιγηρία, τα 841 χιλιόμετρα στο Νίγηρα, και τα 2310 χιλιόμετρα στην Αλγερία. Η ετήσια χωρητικότητα του αγωγού θα ανέρχεται στα 30 δισ. κυβικά μέτρα φυσικού αερίου και η διάμετρος του υπολογίζεται μεταξύ 48 έως 56 ίντσες.



Εικόνα 2.19: Χάρτης των κυριότερων αγωγών στη Μεσόγειο Θάλασσα (Πηγή: wikipedia)

2.5. Γεωκίνδυνοι Υποθαλάσσιων Αγωγών

2.5.1. Εισαγωγή

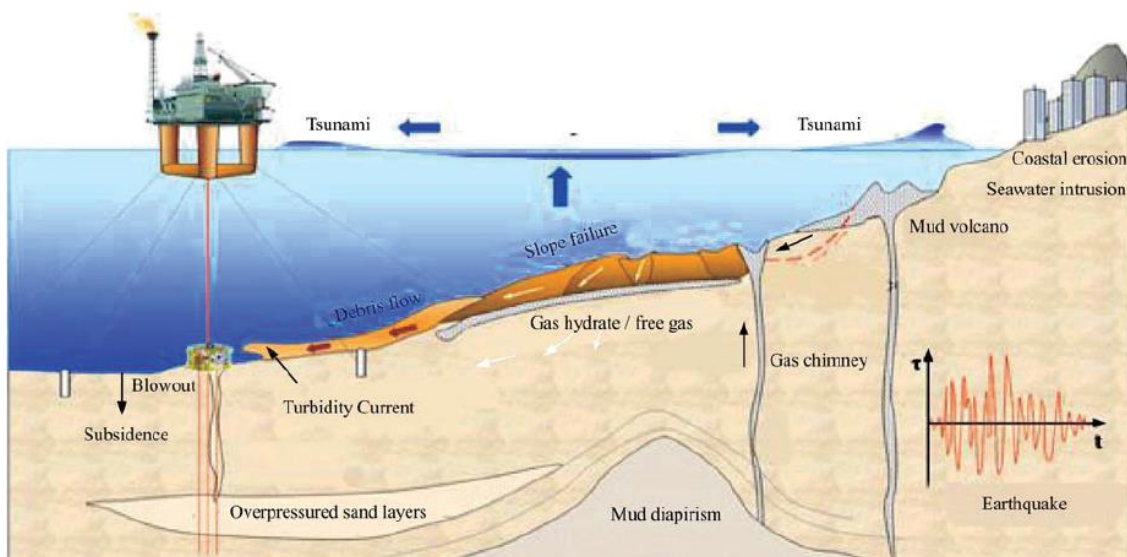
Οι γεωκίνδυνοι στη θάλασσα ορίζονται ως γεωλογικές και υδροδυναμικές καταστάσεις ή διαδικασίες που μπορούν να προκαλέσουν κινήσεις ιζημάτων, μετακινήσεις πετρωμάτων και κινήσεις υγρών ή αερίων κατά τη διάρκεια ξαφνικών επεισοδιακών γεγονότων ή λόγω αργών προοδευτικών παραμορφώσεων. Πολυάριθμοι γεωκίνδυνοι σχετίζονται με τη μηχανική του θαλάσσιου πυθμένα και οι συνέπειές τους παρατηρούνται εντονότερα σε μεγάλα βάθη. Γενικά, υπάρχουν δύο κατηγορίες γεωκινδύνων, τα ακαριαία γεγονότα και τα μακροχρόνια φαινόμενα. Τα ακαριαία γεγονότα είναι σπάνια και επεισοδιακού χαρακτήρα όπως για παράδειγμα είναι οι σεισμοί, υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, τυρβώδεις ροές και αποβολή αερίων. Τα μακροχρόνια φαινόμενα είναι συνθήκες που περιλαμβάνουν αργές διαδικασίες προοδευτικού χαρακτήρα, όπως για παράδειγμα ο ερπυσμός του πυθμένα. Η πιθανότητα εμφάνισης ενός γεωκινδύνου εξαρτάται από τη σοβαρότητα του γεγονότος, την τοποθεσία με βάση την υποδομή της και τη συχνότητα εμφάνισής του.

Οι γεωκίνδυνοι διακρίνονται σε φυσικούς και ανθρωπογενείς. Οι φυσικοί γεωκίνδυνοι χαρακτηρίζονται από την ένταση και τη χρονική κατανομή, δηλαδή τη συχνότητα εκδήλωσής τους, είναι δυνατό να υπάρχει συσχετισμός μεταξύ τους ή να προκληθούν λόγω άλλων γεωκινδύνων. Οι ανθρωπογενείς γεωκίνδυνοι προκύπτουν από ανθρωπινες δραστηριότητες και από τον τρόπο που αυτές επηρεάζουν το περιβάλλον. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές προκαλούν επιτάχυνση ή μεταβολή των φυσικών γεωλογικών συστημάτων. Το χαρακτηριστικό των ανθρωπογενών γεωκινδύνων είναι ότι πρόκειται για βραδείας εξέλιξης φαινόμενα και συνήθως ελεγχόμενα, με αποτέλεσμα τον περιορισμό, την εξάλειψη ή τελικώς την αποφυγή τους.

Όταν ένα σύστημα αγωγών διασχίζει διάφορες περιοχές γεωκινδύνων τότε οι πιθανές ζημιές αυτών είναι αρκετές, όπως αστάθεια της κλίσης κατά τη διέλευση των σκαφών, υγροποίηση του εδάφους, κίνηση ρηγμάτων και κατά συνέπεια επιβάλλουν επικίνδυνα γεωτεχνικά φορτία στα υποθαλάσσια συστήματα αγωγών. Σε ορισμένες ακραίες καταστάσεις, τα φορτία που οφείλονται σε αυτούς τους κινδύνους μπορεί να είναι τόσο

μεγάλα που το υποθαλάσσιο σύστημα αγωγών αποδίδει και υποφέρει από πλαστική παραμόρφωση.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από μια ανασκόπηση πολλών σεισμικών γεγονότων δείχνει ότι, για τους θαμμένους χαλύβδινους αγωγούς, η άμεση επίδραση των σεισμικών επίγειων κυμάτων στην ακεραιότητα των μακρών, ευθέων αγωγών δεν είναι σημαντική. Για τους άκαμπτους αγωγούς, τόσο τα σεισμικά κύματα όσο και η μόνιμη παραμόρφωση του εδάφους μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές, ανάλογα με τη γεωμετρία του αγωγού και τις συνδεδεμένες δομές. Επομένως, η επίδραση των σεισμικών κυμάτων δεν αναμένεται γενικά να προκαλέσει ρήξη ή αποτυχία λυγισμού στους θαμμένους αγωγούς. Παρ' όλα αυτά, τα σεισμικά κύματα μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στα συστήματα αγωγών που δεν έχουν θρυμματιστεί, ειδικά στην περιοχή διασύνδεσης, όπως στο τμήμα μετάβασης του αγωγού από το θαμμένο στο μη θρυμματισμένο και στο καρούλι σύνδεσης του αγωγού στην επόμενη δομή. Τέλος, πολλοί υποθαλάσσιοι αγωγοί συχνά θάβονται για σταθερότητα και μηχανική προστασία στην περιοχή ρηχών νερών αλλιώς τοποθετούνται στο βυθό.

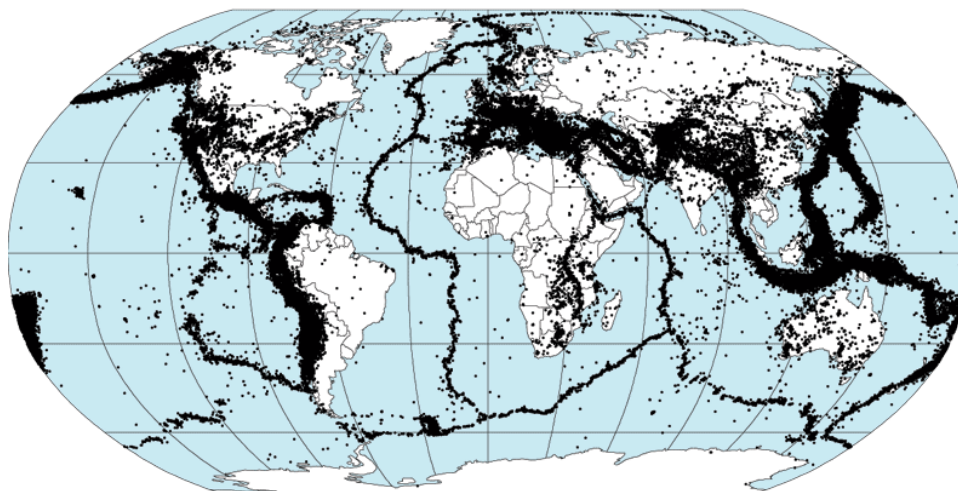


Εικόνα 2.20: Είδη Γεωκινδύνων Υποθαλάσσιων Αγωγών (Yonggang et al., 2016)

2.5.2. Οι Σημαντικότεροι Υπεράκτιοι Γεωκίνδυνοι

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται μερικοί από τους σημαντικότερους γεωκινδύνους και συγκεκριμένα οι σεισμοί, τα ηφαίστεια και οι κατολισθήσεις.

Αρχικά, ένα σημαντικό γεωκίνδυνο για τους υποθαλάσσιους αγωγούς αποτελεί ο **σεισμός** ή αλλιώς σεισμική δόνηση. Σεισμός είναι η «εκτόνωση» της τάσης δηλαδή της πίεσης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός ρήγματος. Συνέπεια του εν λόγω φαινομένου είναι να ξεπερνιούνται τα όρια αντοχής του εδάφους με αποτέλεσμα τη θραύση του, με ταυτόχρονο σχηματισμό ρηγμάτων. Η συχνότητα του φαινομένου αυξάνεται διαμήκους των ορίων των τεκτονικών πλακών, ωστόσο δεν αποκλείεται η εμφάνισή τους οπουδήποτε αλλού. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται συνήθως απροειδοποίητα χωρίς δυνατότητα αποτροπής και επιβάλλει με δυναμικό τρόπο κίνηση του εδάφους. Οι σεισμοί, παρά τη μικρή τους διάρκεια, μπορούν να προκαλέσουν ανυπολόγιστες ζημιές σε κάθε είδους κατασκευή που θα υποβληθεί στη σεισμική καταπόνηση, καθώς και τεράστιες απώλειες ζώων. Επίσης, υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης άλλων φυσικών κινδύνων υψηλής επικινδυνότητας (π.χ. τσουνάμι). Όσον αφορά στην επίδραση του φαινομένου σε έναν αγωγό, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μπορεί να μην υπάρξει αστοχία στον αγωγό από τη δόνηση του σεισμού αλλά να προέλθει από την επιβαλλόμενη παραμόρφωση του εδάφους.



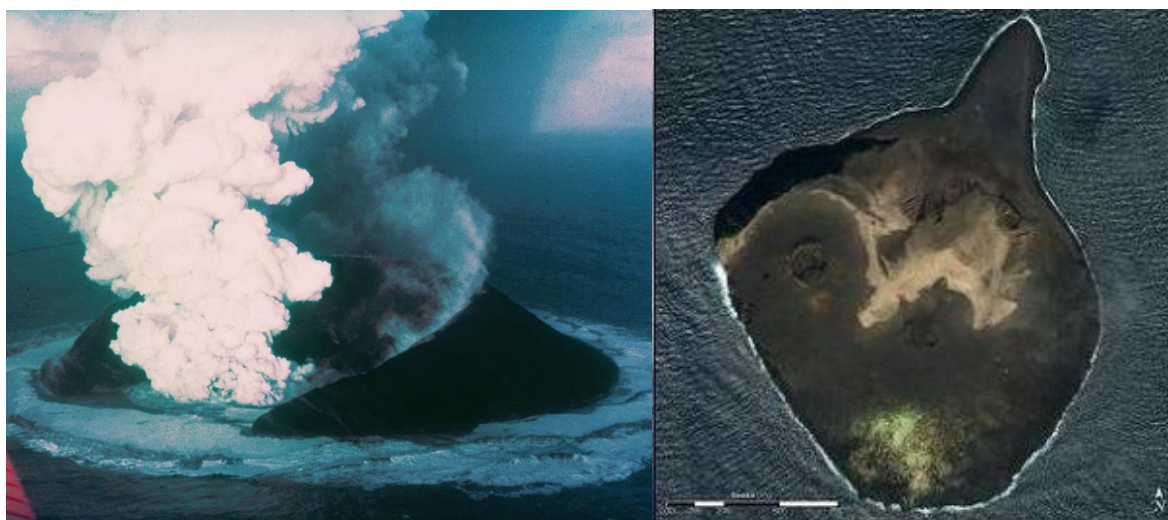
Εικόνα 2.21: Παγκόσμιος Χάρτης της Σεισμικής Δραστηριότητας (Πηγή: wikipedia)

Επίσης, ως προς το σεισμό τα χαρακτηριστικά με τα οποία εξετάζεται η επίδρασή του στον υποθαλάσσιο αγωγό είναι η απόσταση του επικέντρου του από τον αγωγό, η διάρκειά του και η ένταση του κραδασμού (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ή ταχύτητα). Η τελική ένταση που εφαρμόζεται στην κατασκευή εξαρτάται από την τοπογραφία, τις τοπικές εδαφικές συνθήκες καθώς επίσης εξίσου σημαντική είναι η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Το σεισμικό κύμα πιθανό να υποστεί εδαφική ενίσχυση κατά τη διαδρομή του από το επίκεντρο προς τον αγωγό. Αυτό εξαρτάται από τα υποκείμενα εδαφικά στρώματα (πάχος, είδος, πυκνότητα στρώσεων). Άλλος παράγοντας, που συχνά αγνοείται, είναι η επιρροή της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους – αγωγού λόγω του σεισμικού κύματος. Σε ακραίες καταστάσεις μπορεί να υπάρξει λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης, αποκόλληση του περιβάλλοντος εδάφους από την περίμετρο του αγωγού και μη ύπαρξη συνεργασίας. Επιπρόσθετα, σε άλλα τμήματα του αγωγού μπορεί να αναπτυχθούν διατμητικές δυνάμεις εγκάρσιως και κατά μήκος του αγωγού.

Όσον αφορά τον αγωγό επιτείνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν ο αγωγός αγκυρώνεται στον πυθμένα τότε εισάγεται μια ισχυρή ανομοιογένεια στην απόκριση του σε σεισμό. Έτσι, προκύπτουν τοπικές αυξήσεις των τάσεων κατά μια έως δύο τάξεις μεγέθους σε ορισμένα σημεία. Είναι προτιμότερο λοιπόν, να επιχώνεται και να θωρακίζεται με ογκόλιθους σε όλο το μήκος του για πιο ομαλή απόκρισή του σε σεισμό. Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι το βάθος θεμελίωσης του αγωγού εφόσον υπάρχει κίνδυνος για μικρά βάθη θεμελίωσης, ο αγωγός μετά τις παραμορφώσεις να απομακρυνθεί από το έδαφος και έτσι να μην υπάρχει καμία συνεργασία μεταξύ πυθμένα και αγωγού. Στη διάμετρο και το πάχος του αγωγού πρέπει να δίνεται έμφαση και γενικά να προτιμώνται μέσου ή μεγάλου πάχους αγωγοί. Όσο αυξάνουμε τη διάμετρο σε έναν αγωγό τόσο αυξάνεται και η ακτίνα καμπυλότητας του λόγω της σχετικής μετακίνησης του εδάφους εκατέρωθεν του ρήγματος. Αυτή η αύξηση συμβαίνει μέχρι μια κρίσιμη τιμή διαμέτρου και μετά έχουμε μείωση της ακτίνας καμπυλότητας. Επιπλέον, το υλικό της κατασκευής των υποθαλάσσιων αγωγών αποτελεί σημαντικό στοιχείο, διότι όσο καλύτερο υλικό τόσο μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας θα μπορεί να αποκτήσει το κομμάτι του αγωγού που βρίσκεται κοντά στο ρήγμα. Τέλος, ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει είναι η γωνία τριβής μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους εντός του ορύγματος. Όσο αυξάνεται η γωνία τριβής αγωγού-εδάφους τόσο αυξάνονται και οι τάσεις που δέχεται ο αγωγός σε περίπτωση σεισμικού κύματος.

Ο επόμενος γεωκίνδυνος που αξίζει να αναφερθεί είναι τα **ηφαίστεια** τα οποία είναι ανοίγματα στην επιφάνεια της γης μέσω των οποίων εξέρχονται μάγμα, αέρια και άλλα υλικά. Τα ηφαίστεια βρίσκονται κυρίως στα όρια των τεκτονικών πλακών, αλλά και σε περιοχές που ονομάζονται "θερμές κηλίδες", που αποτελούν θέσεις κάτω από το γήινο φλοιό όπου τον συναντούν ρεύματα θερμού υλικού από το μανδύα. Μερικά ηφαίστεια εκρήγνυνται βίαια, ενώ άλλα με πιο αργό ρυθμό. Τα εκρηκτικού τύπου ηφαίστεια μπορεί να δημιουργήσουν πολλές απειλές όπως π.χ. απελευθέρωση τοξικών αερίων, πυροκλαστικών ροών (ροών που περιέχουν κομμάτια πετρωμάτων και στάχτη καθώς και μεγάλη σε όγκο ποσότητα στάχτης).

Σχετικά με τα υποθαλάσσια ηφαίστεια, ο στερεός φλοιός της Γης έχει μικρότερο πάχος κάτω από τις θάλασσες και τους ωκεανούς. Τα ρήγματα επίσης που δημιουργούνται στο φλοιό είναι δυνατό να σχηματιστούν στους πυθμένες των θαλασσών και των ωκεανών και υπολογίζεται ότι είναι περισσότερα από τα ρήγματα της ξηράς. Οι εκρήξεις καθώς και η δράση των ηφαιστειών αυτών είναι σχετικά δύσκολο να μελετηθούν, αλλά πολλές φορές γίνεται αντιληπτή. Συνήθως όταν ο κρατήρας ενός υποβρύχιου ηφαιστείου βρίσκεται σε βάθος 200-300 μέτρα, παρατηρούνται στην επιφάνεια του νερού "κυπαρισσοειδείς" πίδακες και σχηματίζονται μικρά και μεγάλα επιφανειακά κύματα (μέχρι 300-400 μέτρα ύψος), που λέγονται τσουνάμι. Επιπλέον, οι εκρήξεις τους μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία ολόκληρων νησιών, σκοπέλων και ύφαλων από τη λάβα τους.



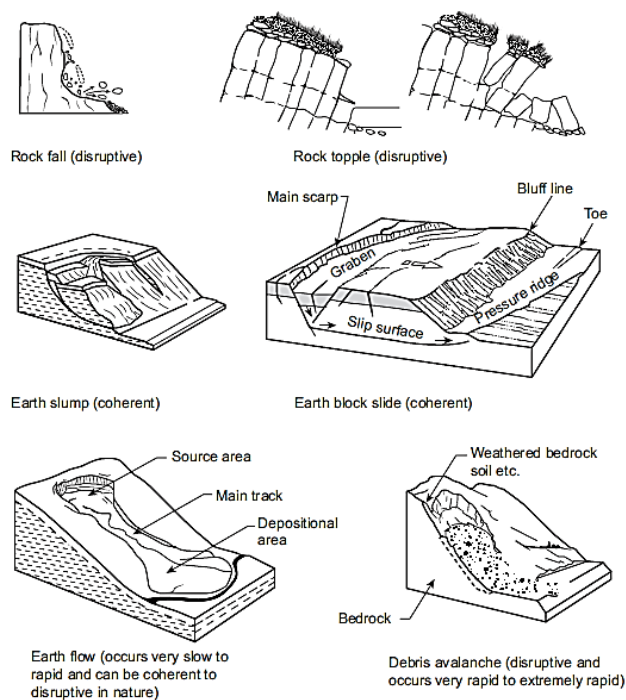
Εικόνα 2.22: Έκρηξη υποθαλάσσιου ηφαιστείου και δημιουργία του νησιού Σούρτσει (Ισλανδία) (Πηγή: wikipedia)

Ένα ηφαίστειο χαρακτηρίζεται ως ενεργό αν έχει καταγραφεί κάποια δραστηριότητά του κατά τη διάρκεια των ιστορικών χρόνων. Αντίθετα, αν έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη κάποιου ηφαιστείου, αλλά δεν υπάρχει καμία καταγραφή δραστηριότητάς του στους ιστορικούς χρόνους, το ηφαίστειο χαρακτηρίζεται ως σβησμένο ή νεκρό. Το γεγονός ότι ένα ηφαίστειο καταγράφεται ως σβησμένο, δε σημαίνει ότι στο μέλλον δεν μπορεί να μεταπέσει στην κατηγορία των ενεργών. Είναι, επίσης, δυνατό να δημιουργηθεί ηφαίστειο σε περιοχή που πριν δεν υπήρχε. Επιπλέον, οι σεισμοί που γίνονται στην περιοχή ενός σβησμένου ηφαιστείου, μπορεί να είναι προμήνυμα ότι το ηφαίστειο θα ξαναγίνει ενεργό.

Τέλος, είναι γεγονός ότι τα ηφαίστεια είναι γνωστά για τις ισχυρές τους εκρήξεις, οι οποίες προκαλούν πολλές φορές σεισμούς, και θεωρούνται ως ένα φοβερό, επικίνδυνο και βλαβερό φυσικό φαινόμενο. Πράγματι, οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν συχνά πρόβλημα και μπορεί να έχουν τρομερές επιπτώσεις τόσο σε ανθρώπινες ζωές και στην οικονομία όσο και στο περιβάλλον και κατ' επέκταση δημιουργούνται αρκετά προβλήματα στο υπό μελέτη θέμα, στους υποθαλάσσιους αγωγούς.

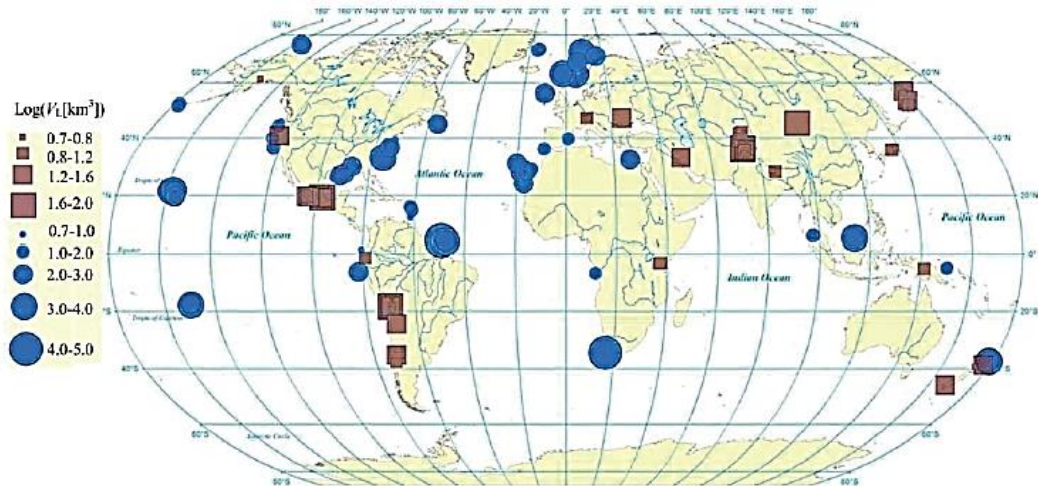
Εξίσου σημαντικό γεωκίνδυνο αποτελεί η **κατολίσθηση** που ορίζεται η μετακίνηση μαζών εδάφους, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε χερσαίες και υποθαλάσσιες. Οι χερσαίες κατολισθήσεις μπορούν να είναι αποτέλεσμα τόσο σεισμικών δονήσεων οι οποίες αυξάνουν τις πλευρικές δυνάμεις, όσο και αυξημένης παρουσίας νερού που μειώνει την αντίσταση των εδαφών σε κινήσεις κατωφέρειας. Αντίστοιχα, οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις μπορούν να είναι αποτέλεσμα τόσο σεισμικών δονήσεων όσο και θαλάσσιων κυμάτων.

Οι κατολισθήσεις προκαλούνται κυρίως από έντονη ανατάραξη του εδάφους κατά τη διάρκεια σεισμών, οι οποίες περιλαμβάνουν πτώσεις και ανατροπή βράχων, καθίζηση εδάφους, βραχονησίδες, ροές γείωσης και χιονοστιβάδες εδάφους. Οι περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται αντίστοιχα στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.23: Τύποι κατολισθήσεων (Qiang and Yong Bai, 2014)

Το μεγάλο μέγεθος (πλάτος και μήκος που κυμαίνεται από αρκετές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα) των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων καθώς επίσης και η δύσκολα προβλέψιμη εικόνα της κατολίσθησης που οφείλεται στη μεγάλη πολυπλοκότητα της προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης, καθώς και στην τυχαία φύση των συμβάντων ενεργοποίησης καθιστούν το φαινόμενο αρκετά επικίνδυνο για τα υπο μελέτη έργα αγωγών. Οι πιο κοινές επιπτώσεις που προκαλούνται επομένως σε έναν αγωγό από το εν λόγω φαινόμενο σχετίζονται με εδαφικές παραμορφώσεις και μερικές από αυτές μπορεί να είναι πλευρική μετατόπιση, καθίζηση και ανύψωση αγωγού, σημαντική πλαστική παραμόρφωση του υλικού των τοιχωμάτων του, απώλεια στήριξης, δηλαδή απώλεια των εδαφικών στηριγμάτων σε περίπτωση που μια κατολίσθηση απομακρύνει εδαφικό υλικό σε σημαντικό μήκος της τάφρου του αγωγού, αύξηση του στατικού φορτίου στον αγωγό, δηλαδή ο αγωγός θάβεται κάτω από τα φερτά υλικά της κατολίσθησης και τέλος η προσωρινή αύξηση του δυναμικού φορτίου πάνω στον αγωγό όπως για παράδειγμα καταπόνηση από καταπτώσεις βράχων.



Εικόνα 2.24: Παγκόσμια κατανομή χερσαίων και υποθαλάσσιων κατολισθήσεων (Yonggang et al., 2016)

2.5.3. Ρήγματα

Στην παρούσα εργασία από τους προαναφερθέντες γεωκινδύνους θα διερευνηθεί εκτενέστερα η συμπεριφορά των υποθαλάσσιων αγωγών που διέρχονται από ρήγματα (faults). Επομένως, στην ενότητα αυτή αναλύεται λεπτομερώς η έννοια των ρηγμάτων. Αναλυτικά, ρήγμα ονομάζεται στη γεωλογία η διακοπή της συνέχειας μιας ομάδας στρωμάτων πετρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης, η οποία συμβαίνει κατά επίπεδη επιφάνεια σε μεγάλη έκταση και εκατέρωθεν της οποίας πραγματοποιείται ή πραγματοποιήθηκε στο παρελθόν σχετική κίνηση των στρωμάτων. Τα ρήγματα δημιουργούνται από τις ενεργές τάσεις σε μια περιοχή, από το σύνολο ουσιαστικά των δυνάμεων που επιδρούν στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής αυτής με την ευρύτερη έννοια. Πιο συγκεκριμένα, οι τάσεις αυτές οφείλονται σε γεωτεκτονικά αίτια, δηλαδή στις σημαντικές και εκτεταμένες κινήσεις και στις παραμορφώσεις του φλοιού της Γης. Υπάρχουν όμως ειδικές περιπτώσεις δομών που εμφανίζονται σε ρήγματα, οι οποίες δε συνδέονται με εκτεταμένη τεκτονική δραστηριότητα. Τέτοιες είναι τα συνιζηματογενή, τα βαρυτικά και άλλα ατεκτονικά ρήγματα, τα οποία οφείλονται καθαρά σε τοπικά αίτια κατανομής της πυκνότητας, της πλαστιμότητας και του βάρους μέσα σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

Τα δύο τμήματα εκατέρωθεν του επιπέδου του ρήγματος ονομάζονται τεμάχια ή μπλοκ ή σκέλη του ρήγματος. Η επιφάνεια που προκύπτει από τις σχετικές μετακινήσεις των δύο σκελών ονομάζεται κάτοπτρο του ρήγματος. Το κάτοπτρο δεν είναι πάντα ορατό,

είτε γιατί έχει διαβρωθεί από την τελευταία ολίσθηση των τεμαχών, είτε διότι είναι ενδεχομένως καλυμμένο με κάποιο υπερκείμενο ίζημα, είτε γιατί το ρήγμα δεν έχει επιφανειακή εμφάνιση. Στην περίπτωση που είναι ορατό και δεν έχει υποστεί έντονη διάβρωση παρατηρούνται σχεδόν πάντα οι γραμμές ολίσθησης, οι οποίες αποτυπώνουν την κίνηση των τεμαχών. Επιπλέον, η κίνηση του ρήματος προκαλεί μετάπτωση, δηλαδή άνοδο ή κάθοδο του ενός τεμάχους ως προς το άλλο. Η σχετική υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο σκελών ονομάζεται άλμα του ρήματος.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα του ρήματος είναι επίσης η έκτασή του. Ορισμένες φορές το ρήγμα μπορεί να καταλαμβάνει τεράστια έκταση, όπως το ρήγμα του Άγιου Ανδρέα, που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, το οποίο βρίσκεται στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και εκτείνεται σε μήκος περίπου 1.300 χιλιομέτρων φθάνοντας μέχρι την επιφάνεια. Δεν είναι όμως απαραίτητο ένα ρήγμα να φθάνει μέχρι την επιφάνεια της Γης.



Εικόνα 2.25: Ρήγμα Άγιου Ανδρέα (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) (Πηγή: www.britannica.com)

Επιπρόσθετα, τα τεμάχια ενός ρήγματος ονοματίζονται με βάση τη θέση τους σε σχέση με την επιφάνεια αυτού. Το τμήμα που υπερκείμενο της κεκλιμένης επιφάνειας του ρήγματος καλείται άνω τμήμα ενώ το υποκείμενο αυτής κάτω τμήμα. Συνεπώς, ανάλογα με τον τρόπο της σχετικής κίνησης των τμημάτων ενός ρήγματος αυτό χαρακτηρίζεται ως:

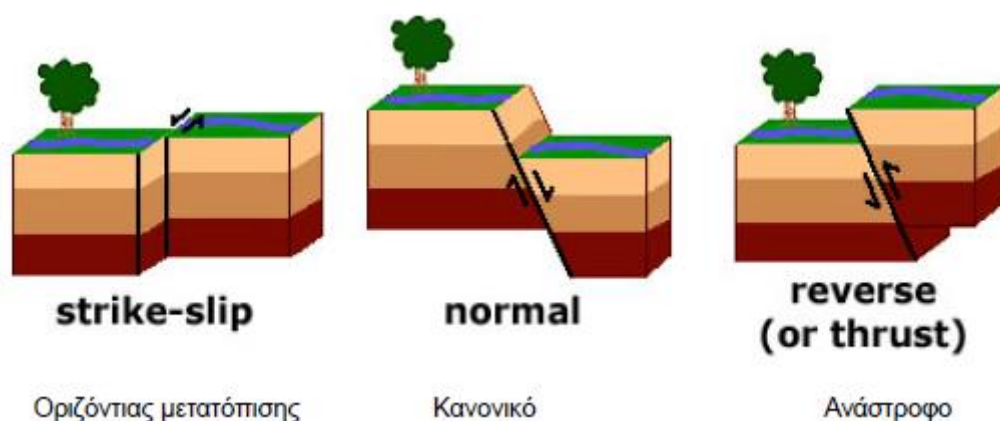
- Ρήγμα μετάπτωσης (ή κανονικό ρήγμα)
- Ρήγμα επώθησης/ εφίππευσης (ή ανάστροφο ρήγμα)
- Ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο

Τα **κανονικά ρήγματα** (normal faults) είναι αυτά στα οποία το πάνω τμήμα της κεκλιμένης ρηξιγενούς επιφάνειας κινείται προς τα κάτω, δηλαδή τα δύο τεμάχια απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Τα ρήγματα αυτά είναι αποτέλεσμα εφελκυστικών δυνάμεων που ασκούνται με την κατακόρυφη συνιστώσα να υπερτερεί ή στην βαρύτητα με αποτέλεσμα τα κανονικά ρήγματα να είναι κεκλιμένα η κατακόρυφα. Το επίπεδο της ρηξιγενούς επιφάνειας έχει συνήθως μεγάλη κλίση (πάνω από 45°). Αντίθετα με την ονομασία τους, τα ρήγματα αυτά συναντώνται σπάνια.

Τα **ανάστροφα ρήγματα** (reverse faults) λειτουργούν ακριβώς αντίθετα από τα κανονικά. Συγκεκριμένα, το άνω τμήμα του ρήγματος κινείται προς τα πάνω, επομένως τα δύο τεμάχια πλησιάζουν το ένα στο άλλο και έχουμε σμίκρυνση του γεωλογικού σχηματισμού. Τα ανάστροφα ρήγματα συνδέονται με θλιπτικές δυνάμεις και μείωση του φλοιού, παρατηρούνται επίσης στα όρια σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών και στη δημιουργία των ορεινών όγκων, που συνοδεύονται από επωθήσεις και πτυχωσεις. Τέλος, ανάστροφα θεωρούνται τα ρήγματα που η κλίση τους κυμαίνεται από 45° έως 90° (μοίρες), ενώ αν η κλίση είναι από 0° έως 45° (μοίρες) χαρακτηρίζονται ως εφίππευσεις (thrust faults).

Τα **οριζόντιας μετατόπισης** (strike-slip faults) είναι ρήγματα στα οποία παρατηρείται οριζόντια μετατόπιση των τμημάτων επί της ρηξιγενούς επιφάνειας, χωρίς αύξηση ή μείωση του γεωλογικού σχηματισμού. Ο μηχανισμός τους είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτό των κανονικών και ανάστροφων ρηγμάτων, συνδέονται με συμπιεστικές κυρίως τάσεις και συναντώνται συνήθως στο άκαμπτο τμήμα του γήινου φλοιού. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα ρήγματα μετασχηματισμού, τα οποία διαφέρουν ως προς τον τρόπο γένεσης και εμφανίζονται στις μεσο-ωκεάνιες ράχες. Διακρίνονται σε δεξιόστροφα (Dextral strike-slip faults) όταν η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται

κινούμενη από αριστερά προς τα δεξιά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος, και αριστερόστροφα (Sinistral strike-slip faults) στα οποία η μία πλευρά του ρήγματος φαίνεται να κινείται από δεξιά προς τα αριστερά, όταν παρατηρείται από την άλλη πλευρά του ρήγματος. Τα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία, διότι φαίνεται να συνδέονται με πολλούς και καταστρεπτικούς σεισμούς.



Εικόνα 2.26: Κατηγοριοποίηση ρηγμάτων σύμφωνα με τις κινήσεις των τεμάχων τους (Σπυράκος, Τουτουδάκη)

Στη συνέχεια, είναι σημαντικό να αναφερθεί ο τρόπος δημιουργίας των ρηγμάτων. Συγκεκριμένα, οι τάσεις που ασκούνται σε ένα σώμα προκαλούν μια ελαστική παραμόρφωση σε αυτό, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σώματος, μεταβάλλονται δηλαδή οι διαστάσεις του και παράλληλα αποθηκεύεται μηχανική ενέργεια λόγω παραμόρφωσης. Κάθε φυσικό σώμα έχει ένα όριο θραύσης. Όταν το σώμα βρίσκεται σε μη πλαστική κατάσταση (στην τεκτονική αυτή η κατάσταση καλείται θραυσιγενής) και οι ασκούμενες σε αυτό τάσεις υπερβούν το όριο θραύσης, ή ισοδύναμα, η ανηγμένη παραμόρφωση του σώματος υπερβεί μια ορισμένη τιμή, τότε αυτό διαρρηγνύεται, δημιουργώντας έτσι μια επιφάνεια ή μια ζώνη επιφανειών ασυνέχειας η οποία ονομάζεται ρήγμα. Από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί ένα ρήγμα, η κίνηση εκατέρωθεν αυτού απαιτεί πλέον μόνο την υπερνίκηση της στατικής τριβής στην επιφάνεια του. Το ρήγμα θα συνεχίσει να λειτουργεί για όσο διάστημα συνεχίσουν να ασκούνται οι τάσεις που το δημιούργησαν.

Οι τάσεις αυτές που ασκούνται σε ένα σώμα χωρίζονται σε συμπιεστικές και εφελκυστικές. Οι συμπιεστικές τάσεις τείνουν να προκαλέσουν συμπίεση του σώματος κατά τη διεύθυνση στην οποία ασκούνται ενώ οι εφελκυστικές τείνουν να προκαλέσουν έκταση του σώματος κατά την διεύθυνση στην οποία ασκούνται.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αφορούν τα ρήγματα είναι η πρόβλεψη της θέσης και του μεγέθους της ρήξης της επιφάνειας που προκαλείται από τη δράση του ρήγματος στα πετρώματα. Κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης των ρηγμάτων, οι ρήξεις δεν είναι συνεχείς, ούτε ακολουθούν ακριβώς την επιφάνεια προεξοχής των ήδη υπαρχόντων ρηγμάτων. Ακολουθούν τα επίπεδα αδυναμίας εντός μιας μάλλον ευρείας ζώνης διάτμησης. Για το λόγο αυτό υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον εντοπισμό της ακριβούς τοποθεσίας της επιφάνειας, στο σημείο που θα δημιουργηθεί το ρήγμα, ακόμα και όταν η γραμμή του ρήγματος απεικονίζεται με σαφήνεια σε ένα χάρτη μεγάλης κλίμακας. Συνεπώς, η διάδοση της διάρρηξης του ρήγματος από τη βάση προς την επιφάνεια του εδάφους γενικά εξαρτάται από τον προσανατολισμό του επιπέδου, το ποσό της μετατόπισης και το είδος κίνησης του ρήγματος καθώς επίσης και από το βάθος και το χαρακτήρα των υπερκείμενων κοιτασμάτων του εδάφους.

Κατά τη διάρρηξη κανονικών ρηγμάτων, το υποκείμενο τέμαχος παραμένει άθικτο με το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης να συγκεντρώνεται εντός του υπερκείμενου τεμάχους. Η διάθλαση λαμβάνει χώρα στη διαχωριστική επιφάνεια του εδάφους-υποβάθρου και καθώς η ρήξη διαδίδεται στην επιφάνεια, κάμπτεται άνωθεν του υπερκείμενου τεμάχους, αυξάνοντας περαιτέρω το βάθος. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να προεξέχουν κάθετα, ή να παράγουν μικρά βυθίσματα βαρύτητας. Επιπλέον, τα ανάστροφα ρήγματα κατά τη διάρρηξη τους τείνουν να κάμπτουν το υποκείμενο τέμαχος ενώ μεταδίδονται προς την επιφάνεια, μειώνοντας το βάθος τους. Ακολούθως, στην περίπτωση διάρρηξης κανονικών ρηγμάτων, τα όλκιμα υποστρώματα, κάμπτονται πάνω από τη γραμμή ολίσθησης, με διάδοση της παραμόρφωσης σε ευρύτερες ζώνες. Στη μέγιστη θέση κάμψης, παρατηρούνται ρωγμές λόγω εφελκυσμού και δευτερογενείς διαρρήξεις κανονικού τύπου. Όσον αφορά στα οριζόντια μετατόπισης ρήγματα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με το μηχανισμό βάθους ολίσθησης της διάρρηξης, διαθέτουν ποιοτικά παρόμοια χαρακτηριστικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις η γωνία βάθους είναι πρακτικά κάθετη, και η παραμόρφωση διανέμεται σε δύο πλευρές. Υπάρχουν ωστόσο, μικρές αποκλίσεις στη γωνία προσανατολισμού και του βάθους του ρήγματος οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε περίπλοκα μοτίβα.

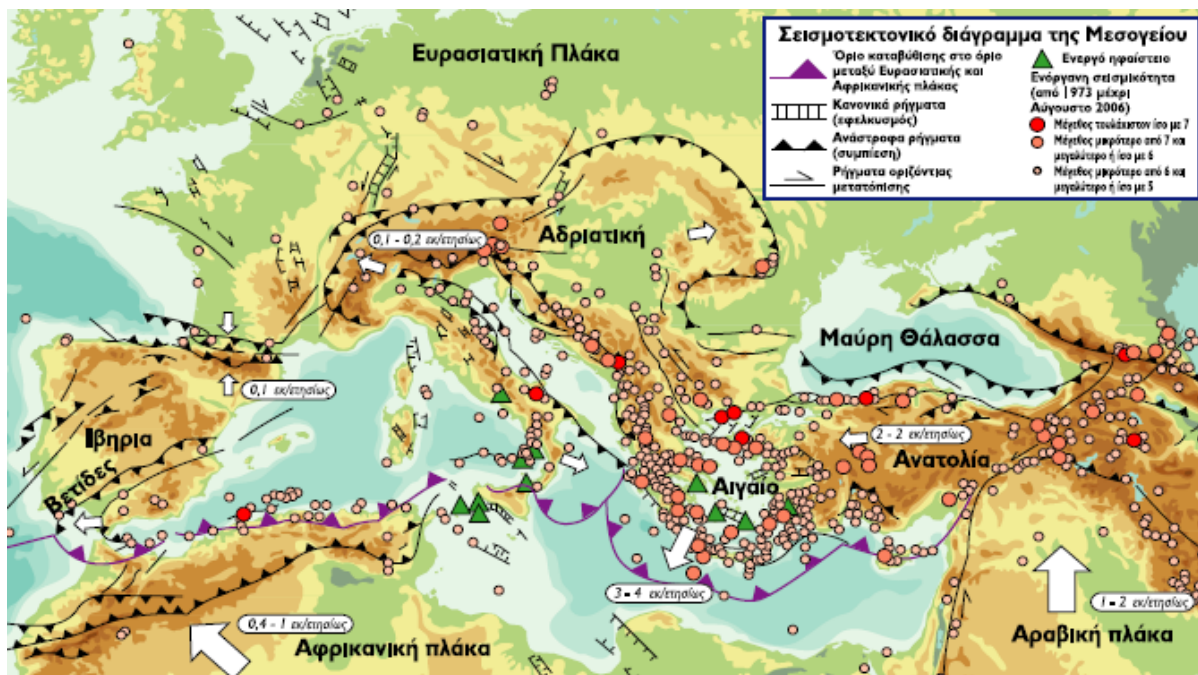
Τέλος, γίνεται αντιληπτό ότι τα ρήγματα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για τους υποθαλάσσιους αγωγούς, είτε πρόκειται για θαμμένους αγωγούς είτε όχι. Τα ρήγματα αποτελούν σημαντικό ζήτημα για τους θαμμένους αγωγούς, διότι

οι αγωγοί που διασχίζουν τις ζώνες βλάβης πρέπει να παραμορφώνονται κατά μήκος και να κάμπτονται για να δέχονται τις αντισταθμίσεις της επιφάνειας του εδάφους. Για τους υποθαλάσσιους αγωγούς που βρίσκονται στην κορυφή του θαλάσσιου πυθμένα, οι κινήσεις βλαβών είναι γενικά μικρές, αν υπάρχει συνέπεια. Ωστόσο, είναι πιθανό ότι η βλάβη του υποθαλάσσιου αγωγού είναι δυνατό να οδηγήσει σε μια κατακόρυφη μετατόπιση η οποία θα προκαλέσει την ανύψωση του που εκτείνεται πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας και κατόπιν να δημιουργηθούν ταλαντώσεις λόγω των ρευμάτων νερού με αποτέλεσμα να υπάρξει εξασθένηση του αγωγού.

2.5.4. Ρήγματα στη Μεσόγειο Θάλασσα

Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία των τεκτονικών συνθηκών που οδηγούν σε πολύπλοκες γεωλογικές και γεωφυσικές διεργασίες. Οι ακτογραμμές κατά μήκος της Μεσογείου εκτίθενται σε υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης υπεράκτιων γεωκινδύνων. Μέσα από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχουν εντοπιστεί γεωκίνδυνοι όπως είναι οι σεισμοί, οι εκρήξεις ηφαιστειών, οι μετακινήσεις μαζών και οι υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, η διαφυγή φυσικού αερίου ή άλλου ρευστού από το θαλάσσιο πυθμένα, η ραγδαία άνοδος της στάθμης της θάλασσας, τα ηφαίστεια λάσπης κ.α. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη ενότητα μελετάται η σεισμικότητα και κατ' επέκταση τα ρήγματα που εντοπίζονται στη Μεσόγειο Θάλασσα.

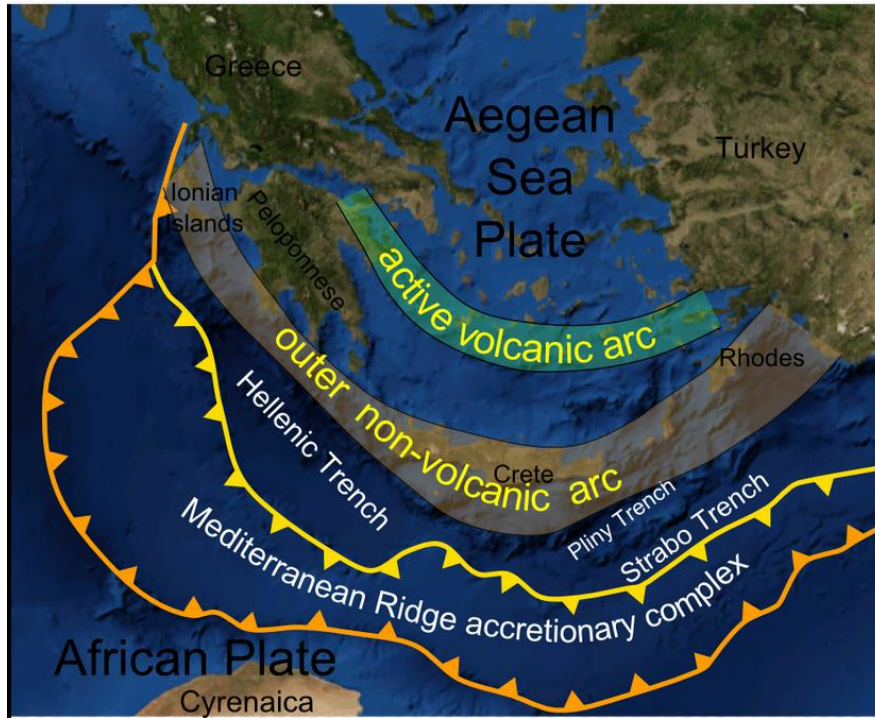
Η Μεσόγειος είναι μια πολύ δυναμική περιοχή όπου δύο μεγάλες και πολλές μικρότερες λιθοσφαιρικές πλάκες συναντώνται. Το γεωδυναμικό της μοντέλο κυρίως χαρακτηρίζεται από την κίνηση της Αφρικανικής πλάκας προς το βορρά καθώς και τη σύγκρουσή της και τελικά την καταβύθισή της κάτω από την Ευρασιατική πλάκα στις περιοχές της Σικελίας και του Αιγαίου. Η σύγκρουση άρχισε πριν από εκατομμύρια χρόνια στα δυτικά και μετακινήθηκε προς τα ανατολικά οδηγώντας στο σχηματισμό των μεγάλων οροσειρών της νότιας Ευρώπης. Επιπλέον, πολλές μικρές πλάκες, όπως η Αραβική και η πλάκα της Ανατολίας, κινούνται ανεξάρτητα και επηρεάζουν την ευρύτερη περιοχή. Αυτές οι κινήσεις έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλή σεισμικότητα και την έντονη ηφαιστειότητα ολόκληρης της Μεσογειακής λεκάνης, προκαλώντας έτσι ένα μεγάλο αριθμό ρηγμάτων.



Εικόνα 2.27: Σεισμοτεκτονικός χάρτης της Μεσογείου Θάλασσας (Πηγή: www.racce.nhmc.uoc.gr)

Από τον παραπάνω χάρτη γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στη Νοτιοανατολική Μεσόγειο παρατηρείται μεγαλύτερο πλήθος τεκτονικών φαινομένων. Πρόκειται για το σημείο όπου συγκλίνει η Αφρικανική λιθοσφαιρική πλάκα και βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική με αποτέλεσμα τη δημιουργία σεισμικών αναστροφών ρηγμάτων. Επιπλέον, εντοπίζονται νότια της Κρήτης πολύ σημαντικά ρηγάματα και γενικότερα γεωλογικές ασυνέχειες τόσο για τον Ελληνικό χώρο αλλά και για ολόκληρη τη Μεσόγειο. Ειδικότερα, το Ελληνικό τόξο (τόξο του Αιγαίου) το οποίο αποτελεί το όριο επαφής της Ευρασιατικής λιθοσφαιρικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι το Αιγαίο, και της Αφρικανικής πλάκας, τμήμα της οποίας είναι η λιθόσφαιρα της Ανατολικής Μεσογείου. Οι δύο λιθοσφαιρικές πλάκες συγκλίνουν στην περιοχή αυτή με σχετική ταχύτητα 2,5 εκατοστά το χρόνο, με συνέπεια την καταβύθιση της ωκεάνιας πλάκας της Ανατολικής Μεσογείου, λόγω μεγαλύτερης πυκνότητας, κάτω από την ηπειρωτική πλάκα του Αιγαίου. Το τόξο που δημιουργείται στην περίπτωση αυτή αποτελείται από την ελληνική τάφρο, το νησιωτικό τόξο, την οπισθοτάφρο και το ηφαιστειακό τόξο. Το μέγιστο βάθος της τάφρου εντοπίστηκε νοτιοδυτικά της Πελοποννήσου στο Ιόνιο πέλαγος (βάθος περίπου 4.500m). Αυτό είναι το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου. Εξίσου σημαντική είναι και η υποθαλάσσια κορυφογραμμή East Mediterranean Ridge που βρίσκεται νότια του Ελληνικού Τόξου όπως παρουσιάζονται και στην παρακάτω εικόνα. Εκτείνεται νότια της Κρήτης, του Καστελόριζου και της Κύπρου, ξεκινώντας

από το τόξο της Καλαβρίας, και φτάνοντας έως και τα παράλια της Συρίας στο Λύκιο πέλαγος. Η υποθαλάσσια κορυφογραμμή αυτή προκλήθηκε από τη σύγκλιση των δύο τεκτονικών πλακών.



Εικόνα 2.28: Ελληνικό Τόξο και East Mediterranean Ridge (Πηγή: wikipedia)

Επιπλέον, σημαντικό ρήγμα για την περιοχή μελέτης θεωρείται το ρήγμα της Ανατολίας το οποίο σχετίζεται με σεισμούς μεγάλου μεγέθους και βρίσκεται Βορειοανατολικά της Μεσογείου. Τέλος, στην περιοχή της Κύπρου εντοπίζεται η γωνία Isparta που συνδέει την περιοχή με το Ελληνικό τόξο αλλά και το τόξο της Κύπρου, στα Βόρεια της νήσου το οποίο συνδέεται με τα ρήγματα που εντοπίζονται στην Τουρκία.

3. Υπολογιστικά Εργαλεία

3.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εισαγωγικό σημείωμα, αξιοποιήθηκαν τρία υπολογιστικά εργαλεία για την επίτευξη του τελικού στόχου. Συνοπτικά, στην αρχή υλοποιήθηκαν ορισμένες προκαταρκτικές χαράξεις μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης αξιοποιώντας το λογισμικό **ArcGIS**, όπου σε περίπτωση διασταύρωσης της προκείμενης χάραξης με τους υπό μελέτη γεωκινδύνους θεωρήθηκε αναγκαία η ανάλυση των παραμορφώσεων που υπόκεινται ο υποθαλάσσιος αγωγός, για να παρθεί η απόφαση στη συνέχεια αν πρόκειται για επιτρεπόμενη διασταύρωση ή όχι. Για την επίτευξη του στόχου αυτού έγινε χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος **ABAQUS** το οποίο ασχολείται με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μέσω του λογισμικού εξήχθησαν οι παραμορφώσεις στις οποίες υπόκεινται ένας αγωγός κατόπιν καταπόνησής του από έναν γεωκίνδυνο, στη συγκεκριμένη περίπτωση από τη διάρρηξη ενός ρήγματος. Στη συνέχεια, με δεδομένες τις συγκεκριμένες παραμορφώσεις έγινε η εκπαίδευση των **Νευρωνικών Δικτύων** μέσω του λογισμικού MATLAB, έτσι ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον χρήστη να εξάγει τις παραμορφώσεις του αγωγού για οποιαδήποτε περίπτωση ιζηματογενούς στρώσης. Τέλος, αξιοποιώντας και πάλι το λογισμικό **ArcGIS** ελέγχθηκε η ικανότητα του αγωγού να διαπερνά τους υπό μελέτη γεωκινδύνους, εισάγοντας ως δεδομένα τις παραμορφώσεις του, με απώτερο σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης χάραξης μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης. Συνεπώς, κρίθηκε αναγκαίο στη συγκεκριμένη ενότητα να γίνει αναφορά στις θεωρητικές έννοιες που αφορούν τα συγκεκριμένα εργαλεία.

3.2. Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών

3.2.1. Γενικά Στοιχεία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.)

Οι ραγδαίες εξελίξεις στον ευρύτερο τομέα της Πληροφορικής και η ανάγκη για την αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων που αφορούν πληροφορίες του πραγματικού κόσμου, οδήγησαν στη δημιουργία και ανάπτυξη των Συστημάτων Βάσεων

Δεδομένων, τα οποία με την πρόσθεση της χωρικής πληροφορίας κατάφεραν να διεισδύσουν στον κόσμο της Χαρτογραφίας και της Γεωγραφίας, δημιουργώντας την επιστήμη της Γεωπληροφορικής και κατά συνέπεια τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), γνωστά και ως Geographic Information Systems (G.I.S.), είναι υπολογιστικά συστήματα τα οποία αξιοποιούνται για τη συλλογή, αποθήκευση, επεξεργασία, ανάλυση και απεικόνιση πληροφοριών με γεωγραφική αναφορά, δηλαδή δεδομένων που αναφέρονται σε κάποια θέση στο χώρο. Τα γεωγραφικά δεδομένα μπορούν να χαρτογραφηθούν και να εντοπιστούν στο χώρο, καθώς και οι υποκατηγορίες τους είναι τα χωρικά και περιγραφικά δεδομένα. Επιπλέον, τα Σ.Γ.Π. είναι ένα εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους και ιδιαίτερα στην επιστήμη της Γεωγραφίας, διότι έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώνουν τα χωρικά με τα περιγραφικά δεδομένα, κάτι το οποίο συμβάλλει στην υλοποίηση της χωρικής ανάλυσης. Επιτρέπει στους χρήστες να αποτυπώσουν τον πραγματικό κόσμο, να αναλύσουν τα χωρικά δεδομένα (spatial data), να τα προσαρμόσουν και να τα αποδώσουν χαρτογραφικά.

Το Σ.Γ.Π, ως πληροφοριακό σύστημα αποτελείται από μία αλληλουχία διαδικασιών με στόχο την εξαγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος. Πιο συγκεκριμένα, οι επιμέρους διαδικασίες κατά σειρά είναι οι εξής :

- Εισαγωγή: Το τμήμα αυτό είναι υπεύθυνο για την τροφοδότηση του συστήματος με δεδομένα. Αυτά πρέπει να είναι σε ψηφιακή δομή και συνήθως προκύπτουν με ψηφιοποίηση αναλογικών δεδομένων (π.χ. τυπωμένοι χάρτες) ή με τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων με τη χρήση ψηφιακών μεθόδων αποτύπωσης χώρου (αποτύπωση με GPS, Τηλεπισκόπηση). Αυτό το στάδιο αφορά τόσο τη γεωγραφική όσο και την περιγραφική διάσταση των δεδομένων.
- Επεξεργασία: Τα δεδομένα πρέπει να υποστούν την ανάλογη επεξεργασία που τα καθιστά κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση και χρήση. Αυτό μπορεί να αφορά την ορθή απόδοση του συστήματος συντεταγμένων, την δημιουργία σχέσεων μεταξύ των δεδομένων, τη διόρθωση σφαλμάτων, την μετάβαση από μια δομή σε μια άλλη.
- Ανάλυση: Ο χρήστης-αναλυτής στο στάδιο αυτό θέτει ερωτήσεις χωρικού ή και περιγραφικού τύπου , σύμφωνα με τη δυνατότητα των ίδιων των δεδομένων.

- Απόδοση: Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδίδονται σε αναλογικά μέσα μέσω της οργάνωσης της εκτύπωσης χαρτογραφικών προϊόντων ή με την απόδοση σε ψηφιακές πλατφόρμες είτε με τη χρήση του διαδικτύου, μέσω διαδραστικών χαρτών (Web-based GIS), είτε μέσω εσωτερικών δικτύων οργανισμών και εφαρμογών που υποστηρίζουν πολλαπλούς χρήστες με διακριτούς ρόλους (π.χ. Enterprise GIS).
- Έλεγχος: Κάθε σύστημα οφείλει να έχει μηχανισμούς ανάδρασης (feedback) ώστε να εξασφαλίζεται η ορθότητα και ακρίβεια των πληροφοριών. Αυτό είναι εφικτό μέσω λογισμικού με διαδικασίες κανόνων επικύρωσης, με διαδικασίες ελέγχου ακρίβειας συντεταγμένων και γενικότερα με διαδικασίες ποιοτικών και ποσοτικών ελέγχων ανάλογα με τη φύση των δεδομένων.

3.2.2. Αναπαράσταση της Γεωγραφικής Πληροφορίας

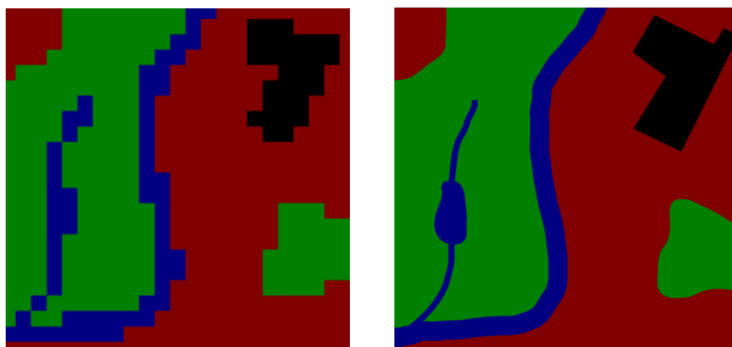
Τα γεωμετρικά δεδομένα τα οποία εισάγονται σε ένα Σ.Γ.Π, βοηθούν στην ανάπτυξη μιας εικόνας της γήινης επιφάνειας. Υπάρχουν δύο θεωρήσεις ή αλλιώς μοντέλα, για την περιγραφή της γήινης επιφάνειας. Τα κύρια μοντέλα δεδομένων (data models) που χρησιμοποιούνται είναι το μοντέλο πεδίων (field-based model) και το μοντέλο αντικειμένων (object-based model). Το μοντέλο πεδίων προσεγγίζει τον γεωγραφικό χώρο ως ένα συνεχές χωρικό μέσο το οποίο αποτελείται από επιμέρους υποπεριοχές, τα πεδία. Σύμφωνα με το μοντέλο αντικειμένων, ο γεωγραφικός χώρος περιγράφεται ως αποτελούμενος από αντικείμενα (objects) που διαθέτουν γεωμετρικές ιδιότητες (σχήμα, θέση, κλπ.) και θεματικά χαρακτηριστικά. Προτιμάται έναντι του μοντέλου πεδίων για την αναπαράσταση γεωγραφικών αντικειμένων με διακριτά όρια, όπως π.χ. για την αναπαράσταση των διοικητικών διαιρέσεων μιας περιοχής, των υδρογραφικών και οδικών δικτύων, κλπ.

Για την υλοποίηση των θεωρήσεων αυτών, έχουν αναπτυχθεί οι δομές γεωμετρικών δεδομένων, οι οποίες θεωρούνται ως ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του μοντέλου αντίληψης και περιγραφής του γεωγραφικού χώρου και του χώρου που παρέχεται από ένα υπολογιστικό σύστημα. Διακρίνονται στην **κανονικοποιημένη** (raster structure) και στη **διανυσματική δομή** (vector structure). Οι δύο αυτές δομές γεωμετρικών δεδομένων παρουσιάζουν ξεχωριστές ιδιότητες, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ακόμη, διαχειρίζονται τη χωρική διάσταση των γεωγραφικών δεδομένων, έχοντας ως

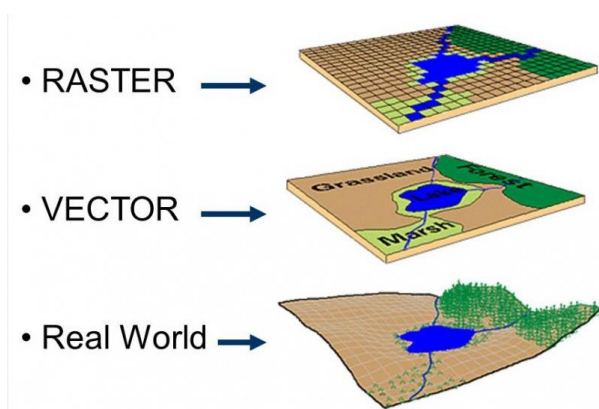
στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση χώρου κατά την αποθήκευσή τους και την ταχύτερη προσπέλαση, επεξεργασία και ανάκτησή τους.

Πιο συγκεκριμένα, η κανονικοποιημένη δομή θεωρείται η καταλληλότερη για την υλοποίηση του μοντέλου πεδίων, λόγω της δυνατότητάς της να αναπαριστά άμεσα τη μεταβολή της τιμής κάποιου γεωγραφικού χαρακτηριστικού από θέση σε θέση. Τα γεωγραφικά δεδομένα τα οποία αναπαρίστανται σύμφωνα με την κανονικοποιημένη δομή δημιουργούνται συνήθως κατά τη σάρωση κλασσικών αναλογικών χαρτών και εικόνων ή παράγονται κατά τη μετατροπή δεδομένων διανυσματικής δομής. Σύμφωνα με τη δομή αυτή, τα γεωγραφικά δεδομένα απεικονίζονται σ' ένα χώρο αναπαράστασης ο οποίος αποτελείται από ισομεγέθη χωρία και παρομοιάζεται με κάναβο ή πίνακα φατνίων. Κάθε φατνίο ή εικονοστοιχείο (picture element – pixel) χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος συντεταγμένων που προσδιορίζουν τη θέση του στον πίνακα (αριθμός γραμμής και αριθμός στήλης) και από μια τιμή η οποία αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό ή την ιδιότητα των γεωγραφικών δεδομένων στη θέση αυτή.

Παρόλου που η κανονικοποιημένη δομή θεωρείται καταλληλότερη για την υλοποίηση του μοντέλου πεδίων, όπως αναφέρθηκε, η διανυσματική δομή είναι στενά συνδεδεμένη με το μοντέλο αντικειμένων. Η διανυσματική δομή συχνά προτιμάται λόγω της ακρίβειας που προσφέρει κατά την αναπαράσταση γεωγραφικών δεδομένων, της οικονομίας σε χώρο αποθήκευσης, της ποιότητας της απεικόνισης που παρομοιάζεται με αυτήν του αναλογικού χάρτη, και της μεγάλης ποικιλίας λειτουργιών χωρικής ανάλυσης που παρέχονται συνήθως για τα γεωγραφικά δεδομένα της δομής αυτής από τα Σ.Γ.Π. Πλεονέκτημα της διανυσματικής δομής είναι ότι το γραφικό προϊόν μοιάζει περισσότερο με τους αναλογικούς χάρτες, αφού δεν εξαρτάται από τη χωρική ανάλυση όπως η κανονικοποιημένη δομή, με αποτέλεσμα κατά την αλλαγή κλίμακας (μεγέθυνση) να μην επηρεάζεται το απεικονιζόμενο αποτέλεσμα αλλά αντιθέτως να εμφανίζονται λεπτομέρειες οι οποίες ενδεχομένως να μην είχαν γίνει αντιληπτές αρχικά. Η διανυσματική δομή απεικονίζει τα γεωγραφικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο γεωμετρικών αρχετύπων. Όσον αφορά το διδιάστατο χώρο αναπαράστασης, τα αρχέτυπα αυτά είναι τα σημεία, οι γραμμές και τα πολύγωνα (ή επίπεδες επιφάνειες).



Σχήμα 3.1: Η κανονικοποιημένη (raster) και η διανυσματική (vector) εκδοχή ενός σχήματος (Κάβουρας κ.α.,2015)



Σχήμα 3.2: Διαφορά αναπαράστασης του πραγματικού κόσμου από μία διανυσματική (vector) δομή σε μια κανονικοποιημένη (raster) δομή (Spiller,2011)

3.2.3. Περιγραφή του Λογισμικού ArcGIS 10.3.1

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών το οποίο αξιοποιήθηκε είναι το ArcGis Desktop 10.3.1. Πρόκειται για μια πλατφόρμα η οποία ασχολείται με διαδικασίες χωρικής ανάλυσης, διαχείρισης δεδομένων και απεικόνισης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και χρήση χαρτών, τη συλλογή γεωγραφικών δεδομένων, την ανάλυση χαρτογραφημένων πληροφοριών, την κοινή χρήση και την ανακάλυψη γεωγραφικών πληροφοριών, τη χρήση χαρτών και γεωγραφικών πληροφοριών σε μια σειρά εφαρμογών και τη διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών σε μια βάση δεδομένων.

Η έκδοση αυτή του ArcGIS, όπως αντίστοιχα και κάθε έκδοση, περιέχει μια ομάδα από ενοποιημένες εφαρμογές στις οποίες περιλαμβάνονται οι ArcCatalog, ArcToolbox,

ArcGlobe, Model Builder και ArcMap. Οι εφαρμογές αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Ο **ArcCatalog** είναι μια εφαρμογή η οποία χρησιμοποιείται για την οργάνωση και διαχείριση των χωρικών δεδομένων και επιτρέπει τη σύνδεση με τους «φυσικούς» χώρους, όπου είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα και οι χάρτες καθώς επίσης και τη διερεύνηση, τη διαχείριση και την αναζήτησή τους. Συμβάλλει επίσης στην αναζήτηση χωρικών δεδομένων, την επισκόπηση τους (γεωμετρικών και περιγραφικών), την καταγραφή, επισκόπηση και διαχείριση μεταδεδομένων, την εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων σε άλλες γεωγραφικές δομές και τη δημιουργία και διαχείριση γεωβάσεων.

Το ArcGIS διαθέτει ξεχωριστή εφαρμογή για τον ArcCatalog, ωστόσο υπάρχει δυνατότητα αντίστοιχης χρήσης και μέσω του ArcMap.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο ArcCatalog σχετίζεται με τη διαχείριση των δεδομένων, συνεπώς αξίζει να αναφερθούν στην ενότητα αυτή όλοι οι τύποι αρχείων και δεδομένων που υποστηρίζει.

Feature class

Ο συνδεδειμένος κρίκος για τη διαχείριση όλων των αρχείων του ArcGIS είναι η ομάδα οντοτήτων. Η feature class αποτελείται από ομοιογενείς γεωγραφικές οντότητες οι οποίες έχουν κοινές ιδιότητες (attributes). Περιέχεται σε μια γεωβάση ή σε ένα feature dataset μιας γεωβάσης και υποστηρίζει τοπολογικές σχέσεις. Γενικά στηρίζεται σε τρία γεωμετρικά αρχέτυπα (σημείο, γραμμή, πολύγωνο). Οι feature classes μπορούν να εξαχθούν σε άλλες δομές δεδομένων (CAD, Coverage, Geodatabase, Shapefile) αλλά και να αποτελέσουν πηγή για εισαγωγή δεδομένων (import) σε μια γεωβάση (geodatabase) ή σε ένα feature dataset.

Πίνακας περιγραφικών χαρακτηριστικών (attribute table)

Οι ομάδες οντοτήτων οι οποίες συνήθως καλούνται και επίπεδα (layers) αποθηκεύονται σε πίνακες της βάσης δεδομένων που αποτελούνται από γραμμές και στήλες οντοτήτων και ονομάζονται Πίνακες Περιγραφικών Χαρακτηριστικών. Κάθε γραμμή περιέχει μια οντότητα (εγγραφή) και κάθε στήλη (πεδίο) περιέχει μια ιδιότητα της οντότητας ή ένα περιγραφικό χαρακτηριστικό (attribute). Τα δεδομένα τα οποία αποθηκεύονται στην τομή μιας στήλης με μια γραμμή καλούνται τιμές (values). Οι

πίνακες Γεωγραφικών δεδομένων διαφέρουν από τους μη Γεωγραφικούς πίνακες, λόγω της παρουσίας μιας επιπλέον στήλης (shape column) στην οποία αποθηκεύεται η μορφή ή η γεωμετρία της οντότητας (σημείο, γραμμή, πολύγωνο).

Σχηματικά αρχεία (Shapefiles)

Το Shapefile (.shp αρχείο), είναι μια απλή μη τοπολογική μορφή χωρικών δεδομένων, για την αποθήκευση γεωμετρικής και περιγραφικής πληροφορίας. Οι γεωγραφικές οντότητες σε ένα shapefile αποθηκεύονται ως γραμμές, σημεία ή πολύγωνα. Επίσης, τα shapefiles μπορούν να εξαχθούν (export) σε άλλες δομές δεδομένων (CAD, Coverage, Geodatabase) αλλά και να αποτελέσουν πηγή για εισαγωγή δεδομένων (import) σε μια γεωβάση (geodatabase).

Γεωβάσεις δεδομένων (Geodatabase)

Μια γεωβάση θεωρείται μια ειδική μορφή δεδομένων ειδικά σχεδιασμένη για το ArcGIS, η οποία αποτελείται από ένα σύνολο ομάδων οντοτήτων. Υπάρχουν δύο ειδών γεωβάσεις, οι προσωπικές (personal geodatabase) και οι πολλών χρηστών (geodatabase). Οι προσωπικές γεωβάσεις υποστηρίζουν πολλούς χρήστες για χρήση και μόνο έναν για διόρθωση.

Ψηφιδωτά αρχεία (Grids)

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

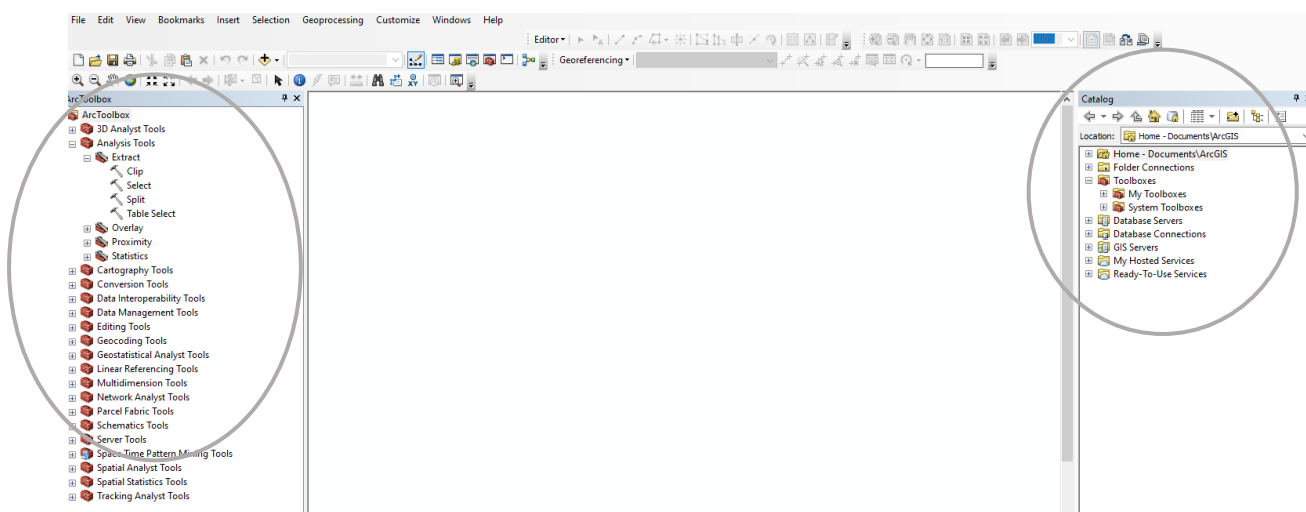
Εικόνες (Images)

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

Αρχεία Χωρικής Απεικόνισης (CAD αρχεία)

Στο περιβάλλον του ArcGIS είναι δυνατό να εισαχθούν σχεδιαστικά αρχεία από το λογισμικό του AutoCAD.

Το **ArcToolbox** περιέχει διάφορα εργαλεία γεωεπεξεργασίας, μετατροπής και διαχείρισης δεδομένων και πολλών ακόμη εργασιών. Ως γεωεπεξεργασία ορίζεται η διαδικασία μετάβασης από τα στοιχεία στην πληροφορία. Τα εργαλεία του ArcToolbox είναι δομημένα σε εργαλειοθήκες και μπορούν να διαχειρίζονται όλες τις μορφές δεδομένων που μπορεί να περιέχει το ArcGIS. Ορισμένες εργαλειοθήκες του είναι: Analysis tools, Spatial analyst tools και Data management tools.



Εικόνα 3.1: Περιβάλλον εφαρμογής του ArcToolbox και του ArcCatalog

Το **ArcGlobe** αποτελεί μια εφαρμογή τρισδιάστατης οπτικοποίησης που επιτρέπει την προβολή μεγάλου όγκου δεδομένων στην επιφάνεια της υδρογείου. Τα χωρικά δεδομένα τοποθετούνται σε τρισδιάστατη επιφάνεια, αναπαριστώντας την πραγματική γεωδαιτική τοποθεσία τους.

Το **Model Builder** δίνει τη δυνατότητα κατασκευής, επεξεργασίας και διαχείρισης μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν μια αυτοματοποιημένη χρήση εργαλείων και μπορούν να τρέχουν κάθε φορά με διαφορετικά δεδομένα. Είναι ροές εργασίας οι οποίες συνθέτουν αλληλουχίες εργαλείων γεωεπεξεργασίας, τροφοδοτώντας το αποτέλεσμα ενός εργαλείου σε αμέσως επόμενο εργαλείο, ως δεδομένο εισόδου.

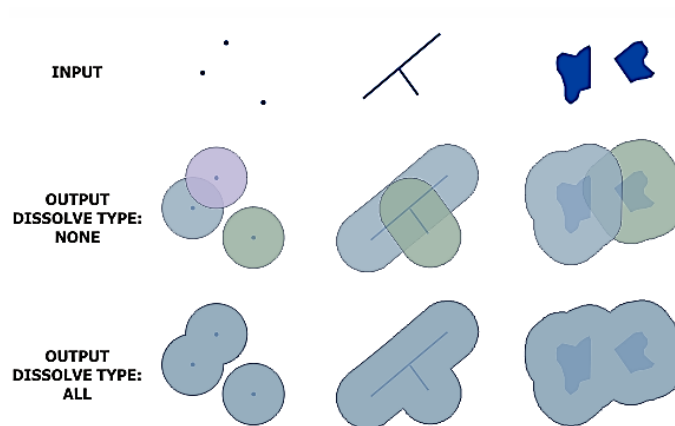
Τέλος, το **ArcMap** αποτελεί τη σημαντικότερη εφαρμογή του λογισμικού ArcGIS, αξιοποιείται για την προβολή, την επεξεργασία, τη δημιουργία και την ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων. Συνδέεται άμεσα με όλες τις προαναφερθείσες εφαρμογές, με σημαντικότερες συνδέσεις εξ αυτών την ArcCatalog, με στόχο τη σύνδεση των γεωβάσεων που δημιουργούνται και του φάκελου προέλευσης των δεδομένων, με την ArcToolbox, με στόχο την πρόσβαση στις γνωστές εργαλειοθήκες και τη δημιουργία, οργάνωση και διαχείριση εργαλείων και με την Model Builder, με στόχο τη δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση μοντέλων ροών εργασίας. Βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας του αποτελούν τα θεματικά επίπεδα πληροφοριών (layers), μέσω των οποίων προβάλλεται, επεξεργάζεται, διαμορφώνεται, αναλύεται και προκύπτει η χωρική πληροφορία. Προσφέρει επίσης τη δυνατότητα μελέτης και διευθέτησης πολυσύνθετων χωρικών προβλημάτων για τα οποία μπορεί να είναι απαραίτητη η χρήση μοντέλων ή και η συγγραφή προγραμματιστικού κώδικα (σε γλώσσα Python ή Visual Basic). Επιπλέον, εξίσου σημαντική είναι η χρήση του για όλες τις χαρτογραφικές διαδικασίες αλλά και τις διαδικασίες διόρθωσης (editing) των δεδομένων.

3.2.4. Χρήσιμα Εργαλεία για την Χάραξη Αγωγού στο ArcMap

Για την υλοποίηση των πιθανών χαράξεων του υποθαλάσσιου αγωγού μέσω του λογισμικού ArcMap αξιοποιήθηκαν συγκεκριμένα εργαλεία. Τα εργαλεία αυτά καθώς και η χρήση τους περιγράφονται παρακάτω.

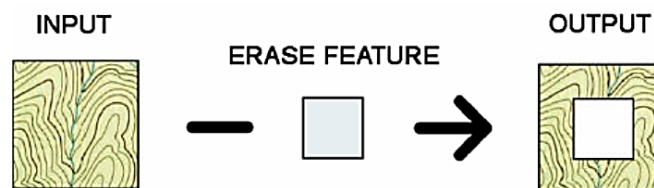
- **Project:** χρησιμοποιείται για την προβολή-μετατροπή των χωρικών δεδομένων από ένα σύστημα αναφοράς σε ένα άλλο. Στην περίπτωση που τα δεδομένα εισόδου ανήκουν σε άγνωστο ή μη καθορισμένο σύστημα αναφοράς, τότε αυτό μπορεί να καθοριστεί μέσω του εργαλείου Input Coordinate System και έτσι με τον τρόπο αυτόν δεν τροποποιούνται τα δεδομένα εισόδου.
- **Buffer:** με το εργαλείο αυτό δημιουργείται γύρω από τα δεδομένα εισόδου μια ζώνη σε καθορισμένη απόσταση από το χρήστη. Το buffer διασχίζει καθεμία από τις κορυφές των δεδομένων εισόδου για να εξάγει τη ζητούμενη ζώνη. Σχετικά με την παράμετρο της απόστασης μπορεί να εισαχθεί ως μια σταθερή τιμή ή ως ένα πεδίο αριθμητικών τιμών. Παρακάτω, παρουσιάζεται το εργαλείο

αυτό για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις δεδομένων εισόδου (ως σημεία, ως γραμμές και ως πολύγωνα).



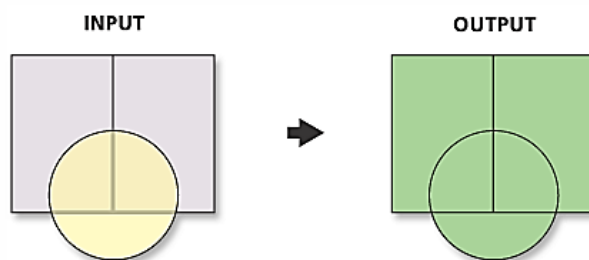
Εικόνα 3.2: Απεικόνιση του εργαλείου Buffer (Πηγή: desktop.arcgis.com)

- Erase:** με την επεξεργασία απαλοιφής (Erase) δημιουργούνται οντότητες μετά από την υπέρθεση των οντοτήτων του επιπέδου επεξεργασίας με τα πολύγωνα επιπέδου απαλοιφής. Οι οντότητες του επιπέδου επεξεργασίας οι οποίες περιλαμβάνονται στο παραγόμενο επίπεδο, είναι μόνον όσες βρίσκονται εκτός των ορίων των πολυγώνων απαλοιφής. Τα δεδομένα διαγραφής (Erase features) μπορεί να είναι σημεία, γραμμές ή και πολύγωνα με την προϋπόθεση ότι το δεδομένο εισόδου είναι ίδιου ή μικρότερου μεγέθους.



Εικόνα 3.3: Η λειτουργία απαλοιφής (erase) (Χαλκιάς, 2015)

- Union:** με τη γεωμετρική ένωση (union) συνδυάζονται δύο ή περισσότερα επίπεδα κι όλες οι οντότητές τους (ασχέτως αν επικαλύπτονται ή όχι) μεταφέρονται στο παραγόμενο επίπεδο. Στο εργαλείο αυτό, όλα τα επίπεδα τα οποία συνδυάζονται θα πρέπει να περιέχουν πολύγωνα.



Εικόνα 3.4: Η λειτουργία ένωσης (union) (Πηγή: desktop.arcgis.com)

- **Polygon to raster:** με χρήση του εργαλείου αυτού επιτυγχάνεται η μετατροπή πολυγωνικών δεδομένων σε αρχεία ψηφιδωτής μορφής (raster). Ο τύπος του πεδίου εισαγωγής (polygon) είναι αυτός που καθορίζει και τον αντίστοιχο τύπο εξόδου (raster). Εάν για παράδειγμα έχουμε ως δεδομένο εισόδου ακέραια τιμή, τότε η έξοδος θα είναι αντίστοιχα ακέραιη.
- **Raster to polygon:** στην περίπτωση αυτή υλοποιείται η ακριβώς αντίστροφη διαδικασία με το polygon to raster. Συνεπώς, τα δεδομένα ψηφιδωτής μορφής (raster) μετατρέπονται σε πολυγωνικές οντότητες.
- **Euclidean distance:** υπολογίζεται για κάθε κελί η ευκλείδεια απόσταση από την πλησιέστερη πηγή. Τα δεδομένα εισόδου του μπορεί να είναι γεωμετρικές οντότητες (σημείο, πολύγωνο, γραμμή) αλλά και ψηφιδωτά αρχεία (raster).
- **Reclassify:** το εργαλείο αυτό στοχεύει στην αναταξινόμηση των τιμών ενός συνόλου σε ψηφιδωτά δεδομένα (raster). Τα εύρη τιμών που πρόκειται να αναταξινομηθούν δεν πρέπει να επικαλύπτονται μεταξύ τους. Είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί το εργαλείο αυτό για μια τιμή τη φορά ή και για ομάδες τιμών ταυτόχρονα με βάση ορισμένα κριτήρια. Επίσης, ένας ακόμη λόγος για αναταξινόμηση είναι η εκχώρηση τιμών ανά προτίμηση, ευαισθησία, προτεραιότητα και άλλων ακόμη περιπτώσεων. Με τη μέθοδο αυτή αποδίδονται τιμές έστω σε μια κλίμακα από το 1 έως το 10, σ' ένα αρχείο raster για να γίνει διαβάθμιση των δεδομένων.

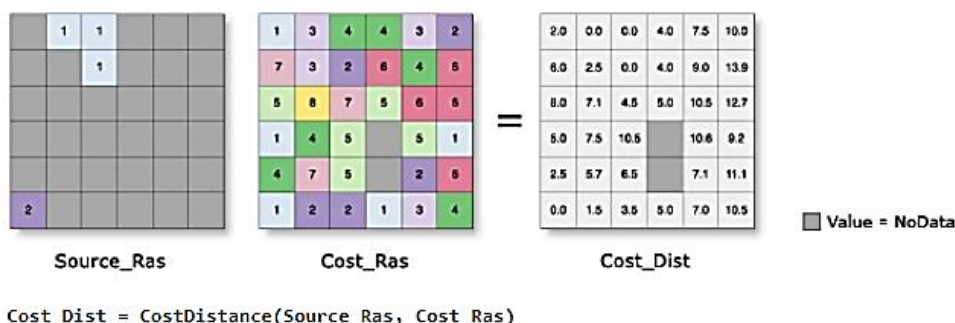
- **Slope:** το εργαλείο αυτό αναγνωρίζει την απόκλιση σε κάθε κελί μιας επιφάνειας ενός ψηφιδωτού αρχείου (raster). Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της κλίσης, τόσο πιο επίπεδο είναι το έδαφος. Εν αντιθέσει όσο υψηλότερη είναι η τιμή της κλίσης, τόσο πιο απότομο είναι το έδαφος.
- **Intersect:** με το εργαλείο αυτό έπειτα από την υπέρθεση δύο (ή περισσότερων) επιπέδων, διατηρούνται στο παραγόμενο επίπεδο μόνο οι οντότητες (ή τμήματα αυτών) οι οποίες βρίσκονται στον κοινό χώρο εμφάνισης των επιπέδων (γεωμετρική τομή των επιπέδων). Συνήθως, το επίπεδο υπέρθεσης περιέχει πολύγωνα έτσι ώστε, να ορίζεται η περιοχή τομής.



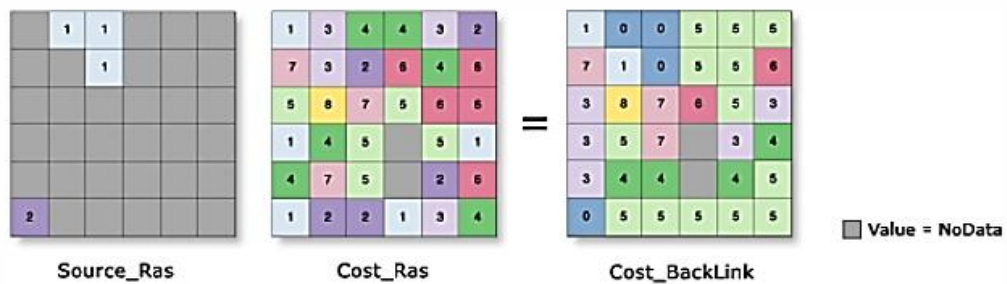
Εικόνα 3.5 : Η λειτουργία τομής (intersect) (Χαλκιάς,2015)

- **Weighted Overlay:** χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση ανάλυσης σταθμισμένης επικάλυψης και εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων. Στο εργαλείο αυτό πρέπει αρχικά να οριστεί το πρόβλημα, να διαχωριστεί το μοντέλο σε υπομοντέλα και να προσδιοριστούν τα επίπεδα εισόδου. Συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούνται είναι αρχικά η επαναταξινόμηση των τιμών στα ψηφιδωτά αρχεία εισόδου (raster) σε μια κοινή κλίμακα αξιολόγησης. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζονται οι τιμές των κελιών ψηφιδωτής μορφής με το αντίστοιχο βάρος σπουδαιότητας τους, οι οποίες τιμές κατόπιν προστίθενται για να παραχθεί το αρχείο εξόδου σε raster μορφή. Το άθροισμα των τιμών αυτών πρέπει να ισοδυναμεί με 100%. Σημαντικό επίσης να αναφερθεί ότι, το εργαλείο δέχεται μόνο ακέραια raster αρχεία ως δεδομένα εισόδου.

- Cost distance:** με το εργαλείο αυτό υπολογίζεται η ελάχιστη αθροιστική απόσταση κόστους για κάθε κελί με την πλησιέστερη πηγή. Τα δεδομένα εισόδου του εργαλείου μπορεί να είναι γεωμετρικά χαρακτηριστικά ή ψηφιδωτά αρχεία (raster). Στην πρώτη περίπτωση, τα δεδομένα μετατρέπονται εσωτερικά σε ψηφιδωτά αρχεία πριν από την εκτέλεση της ανάλυσης ή για ευκολία μετατρέπονται εκ των προτέρων με το εργαλείο feature to raster, ενώ στη δεύτερη περίπτωση όλα τα κελιά εμπεριέχουν έγκυρες τιμές. Τα κελιά που δεν έχουν δεδομένα (no data), δεν περιλαμβάνονται στο σύνολο προέλευσης. Συνήθως, καταλληλότερο αρχείο εισόδου θεωρείται το εξαγόμενο αποτέλεσμα του εργαλείου weighted overlay. Επομένως, με τη διαδικασία αυτή εξάγεται ένα ψηφιδωτό αρχείο (raster) εξόδου, όπου σε κάθε κελί εκχωρείται το συσσωρευτικό κόστος για την πλησιέστερη πηγή. Με βάση τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται επιτυγχάνεται η αναπαράσταση κάθε κελιού ως κόμβο σύνδεσης, ο οποίος συνδέεται με τους γειτονικούς κόμβους με πολλαπλούς συνδέσμους. Επιπλέον, το αρχείο κόστους δεν μπορεί να περιέχει τιμές ίσες με το μηδέν διότι ο αλγόριθμος είναι μια πολλαπλασιαστική διαδικασία. Παρακάτω, απεικονίζεται η διαδικασία που ακολουθείται σχηματικά. Παρατηρούμε συνοπτικά ότι, αρχικά γίνεται η ανάθεση τιμών στην επιφάνεια προέλευσης, στη συνέχεια δημιουργούνται τα κελιά ανά μονάδα απόστασης και τέλος προκύπτει το ψηφιδωτό αρχείο εξόδου στο οποίο εμπεριέχονται οι τιμές συσσωρευτικού κόστους ανά κελί (Cost_dist) καθώς και το αρχείο backlink το οποίο ορίζει τους γειτονικούς προορισμούς με το λιγότερο κόστος προς την πηγή.



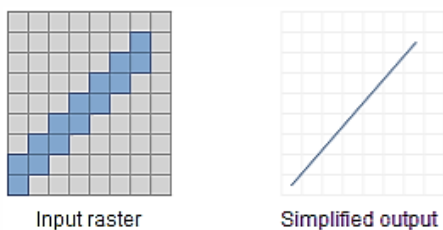
Εικόνα 3.6α: Απεικόνιση του εργαλείου Cost Distance (Πηγή: desktop.arcgis.com)



Cost_BackLink = CostBacklink(Source_Ras, Cost_Ras)

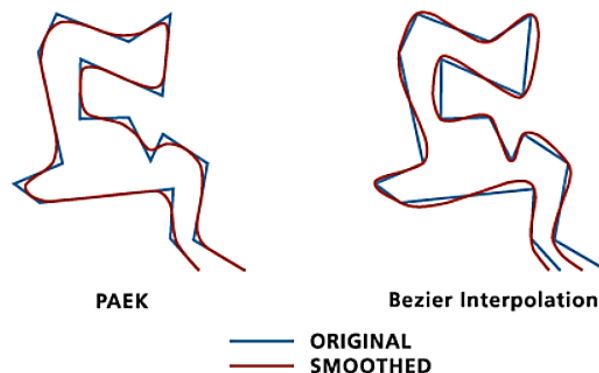
Εικόνα 3.6β: Απεικόνιση του εργαλείου Cost Distance (Πηγή: desktop.arcgis.com)

- Cost path:** στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται η διαδρομή με το χαμηλότερο κόστος από ένα σημείο προέλευσης προς έναν σημείο προορισμού. Η αξιοποίηση του εργαλείου αυτού προϋποθέτει τον καθορισμό του προορισμού καθώς επίσης και το εξαγόμενο αποτέλεσμα από το εργαλείο cost distance, δηλαδή τα ψηφιδωτά αρχεία της απόστασης (cost_dist) και το ονομαζόμενο ως «backlink». Το τελευταίο, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της λιγότερο δαπανηρής διαδρομής από τον προορισμό προς την προέλευση στην επιφάνεια του κόστους απόστασης. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται από το προαναφερθέν εργαλείο, αποτελούν δεδομένα εισόδου για το εργαλείο cost path.
- Raster to polyline:** μετατρέπονται, με το εργαλείο αυτό, τα αρχεία ψηφιδωτής μορφής (raster) σε γραμμικές οντότητες. Το αρχείο εισόδου σε raster μορφή μπορεί να έχει οποιοδήποτε έγκυρο μέγεθος κελιού (cell size), αρκεί να είναι μεγαλύτερο του μηδενός και να ανήκει σε ένα έγκυρο ακέραιο σύνολο δεδομένων ψηφιδωτής μορφής (raster dataset).



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση του εργαλείου Raster to polyline (Πηγή: desktop.arcgis.com)

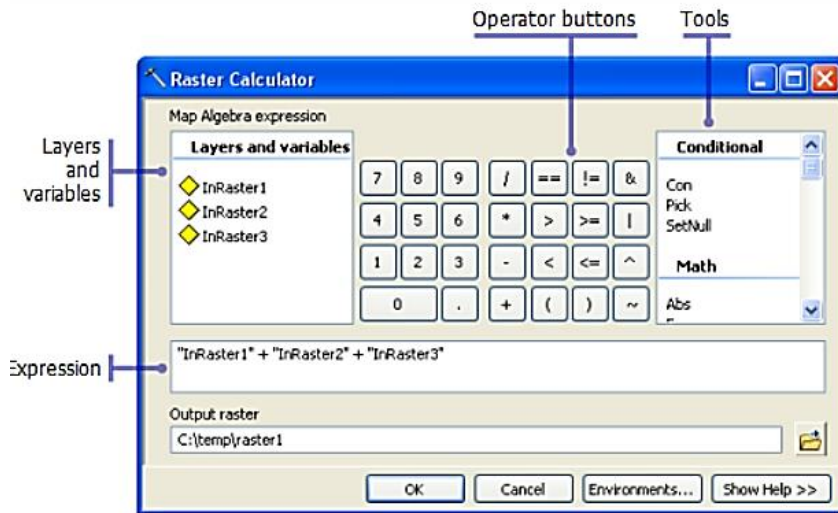
- **Smooth line:** το εργαλείο αυτό βοηθάει στην εξομάλυνση των γραμμικών στοιχείων έτσι ώστε να επιτευχθεί η βελτίωση της αισθητικής ή της χαρτογραφικής ποιότητας. Για την εξομάλυνση αυτή υπάρχουν δύο μέθοδοι. Η μέθοδος Polynomial Approximation with Exponential Kernel (PAEK), δηλαδή πρόκειται για μια Πολυωνυμική Προσέγγιση με Εκθετική συνάρτηση Kernel, η οποία εξομαλύνει τις γραμμές με βάση την ανοχή εξομάλυνσης. Αυτό σημαίνει ότι κάθε λεία γραμμή μπορεί να έχει περισσότερες κορυφές από την αρχική της γραμμή. Η δεύτερη μέθοδος είναι η Bezier, η οποία εξομαλύνει τις γραμμές χωρίς να χρησιμοποιεί ανοχή, δημιουργεί δηλαδή κατά προσέγγιση καμπύλες ώστε να ταιριάζουν με την αρχική γραμμή εισόδου.



Εικόνα 3.8: Απεικόνιση του εργαλείου Smooth Line (Πηγή: desktop.arcgis.com)

- **Excel to table:** σύμφωνα με το εργαλείο αυτό εισάγονται τα αρχεία ενός φύλλου επεξεργασίας (excel) στο λογισμικό ArcMap με τη μορφή πίνακα. Τα στοιχεία του πίνακα είναι κάθετα ταξινομημένα. Συγκεκριμένα, η πρώτη σειρά από το αρχείο excel, λαμβάνεται από το εργαλείο ως ονομασία των πεδίων για τον πίνακα εξόδου. Επίσης, όσον αφορά στις κενές στήλες μεταξύ των δεδομένων διατηρούνται και τους αποδίδεται ένα γενικό όνομα πεδίου.
- **Raster Calculator:** το εργαλείο αυτό επιτρέπει τη δημιουργία και την εκτέλεση αλγεβρικών εκφράσεων, με εξαγόμενο αρχείο εξόδου ψηφιδωτής μορφής (raster). Τα αρχεία εισόδου και οι μεταβλητές (layers and variables) προσδιορίζουν την είσοδο που μπορεί να χρησιμοποιήσει το εργαλείο στη ζητούμενη αλγεβρική έκφραση (expression). Επιπλέον, οι αλγεβρικές αυτές

πράξεις γίνονται με χρήση της αριθμομηχανής που εμφανίζεται στο παράθυρο λειτουργίας του, συνδυάζοντας τα διαθέσιμα εργαλεία πράξεων (tools) για αριθμητικούς ή λογικούς τελεστές.



Εικόνα 3.9: Δομή του εργαλείου Raster Calculator (Πηγή: dekstop.arcgis.com)

3.3. Πρόγραμμα Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (ABAQUS)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method), χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση των πολύπλοκων κατασκευών και κατατάσσεται πρώτη μεταξύ των μοντέρνων εργαλείων σχεδιασμού στη βιομηχανία, στη ναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι βάσεις της μεθόδου αυτής τέθηκαν τη δεκαετία του 1940, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης πάσης φύσεως κατασκευής. Οι βασικοί ημι-εμπειρικοί κανόνες και οι λύσεις κλειστής μορφής αδυνατούν να αποδώσουν επαρκώς τα πεδία μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και τάσεων σε προβλήματα που παρουσιάζουν πολυπλοκότητα ως προς την συμπεριφορά των υλικών, τη γεωμετρία των δομικών στοιχείων, το είδος των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών.

Συνεπώς, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια υπολογιστική μέθοδο που επιλύει με προσεγγιστικές μεθόδους τις θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν μια ευρεία ομάδα προβλημάτων συνεχούς μέσου, τα οποία έχουν αυθαίρετη γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες και φόρτιση. Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του

συνεχούς μέσου σε επιμέρους τμήματα όπου τα τμήματα αυτά ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στην απόλυτα ορισμένη αυτή περιοχή κάθε πεπερασμένου στοιχείου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας, και εν συνεχεία γίνεται συναρμολόγηση όλων των εξισώσεων αυτών για την επίλυση τους στα πλαίσια του συνεχούς μέσου. Επομένως, η μέθοδος επιλύει κάθε πρόβλημα που περιγράφεται από μια μερική διαφορική εξίσωση, όπως προβλήματα παραμορφώσιμων στερεών, μετάδοσης θερμότητας, μηχανικής των ρευστών, και προσεγγίζεται από ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται προσεγγιστικά με τεχνικές γραμμικής άλγεβρας.

Με σκοπό την υλοποίηση των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται το προγραμματιστικό περιβάλλον ABAQUS. Το ABAQUS/CAE είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον που παρέχει μια απλή και εύχρηστη διεπιφάνεια για δημιουργία, εκτέλεση, έλεγχο και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις ABAQUS/Standard και ABAQUS/Explicit. Το ABAQUS/CAE είναι χωρισμένο σε ενότητες, η κάθε μία εκ των οποίων είναι ένα λογικό βήμα στη διαδικασία της μοντελοποίησης: ορισμός γεωμετρίας, ορισμός ιδιοτήτων των υλικών, κατασκευή πλέγματος. Καθώς γίνεται η μετάβαση από ενότητα σε ενότητα, κατασκευάζεται το μοντέλο από το οποίο το ABAQUS/CAE παράγει ένα αρχείο input το οποίο στη συνέχεια εκτελείται στο περιβάλλον ανάλυσης ABAQUS/Standard ή ABAQUS/Explicit. Το περιβάλλον ανάλυσης διενεργεί την ανάλυση, στέλνει πληροφορίες στο ABAQUS/CAE που επιτρέπουν τον έλεγχο της προόδου της διαδικασίας και τέλος, παράγει μία βάση δεδομένων (output database). Τελικά χρησιμοποιείται η ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) του ABAQUS/CAE (ή το ξεχωριστό πρόγραμμα ABAQUS/Viewer) για να διαβαστεί η βάση δεδομένων και να μπορέσουν να διαβαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Σημαντικό να αναφερθούν επίσης ορισμένα βασικά στοιχεία για τα προγράμματα ABAQUS/Standard και ABAQUS/Explicit. Το ABAQUS/Standard είναι ένα γενικού σκοπού πρόγραμμα ανάλυσης το οποίο μπορεί να επιλύσει ένα μεγάλο εύρος γραμμικών και μη – γραμμικών προβλημάτων περιλαμβάνοντας τη στατική, δυναμική, θερμική και ηλεκτρική απόκριση των δομικών στοιχείων. Το ABAQUS/Standard επιλύει ένα σύστημα εξισώσεων «σιωπηρά» σε κάθε βήμα επίλυσης, ενώ σε αντίθεση το ABAQUS/Explicit υλοποιεί μία λύση κατά την έννοια του χρόνου σε μικρά χρονικά βήματα χωρίς να επιλύει το αντίστοιχο σύστημα εξισώσεων σε κάθε βήμα επιλύοντας τις δυναμικές εξισώσεις ισορροπίας χωρίς να απαιτείται κάθε φορά η δημιουργία του γενικού μητρώου στιβαρότητας. Επιπλέον, το ABAQUS/Explicit είναι ένα πρόγραμμα

ανάλυσης ειδικού σκοπού, το οποίο χρησιμοποιεί μία ρητή, δυναμική διατύπωση πεπερασμένων στοιχείων. Είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση σύντομων και παροδικών δυναμικών φαινομένων και επίσης είναι αρκετά αποτελεσματική σε έντονα μη-γραμμικά προβλήματα που σχετίζονται και με την αλλαγή της επιφάνειας επαφής δύο σωμάτων που αλληλεπιδρούν.

3.4. Νευρωνικά Δίκτυα

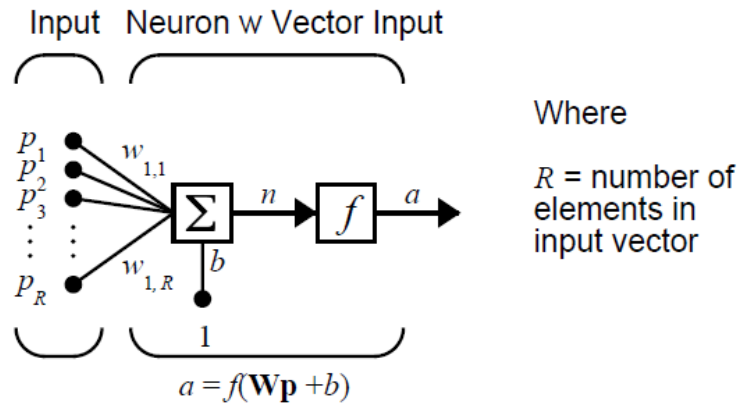
Νευρωνικό δίκτυο ονομάζεται ένα κύκλωμα διασυνδεδεμένων νευρώνων. Στην περίπτωση βιολογικών νευρώνων, πρόκειται για ένα τμήμα νευρικού ιστού. Στην περίπτωση τεχνητών νευρώνων, πρόκειται για ένα αφηρημένο αλγοριθμικό κατασκεύασμα το οποίο εμπίπτει στον τομέα της υπολογιστικής νοημοσύνης, όταν στόχος του νευρωνικού δικτύου είναι η επίλυση κάποιου υπολογιστικού προβλήματος, ή της υπολογιστικής νευροεπιστήμης, όταν στόχος είναι η υπολογιστική προσομοίωση της λειτουργίας των βιολογικών νευρωνικών δικτύων με βάση κάποιο μαθηματικό μοντέλο τους.

Στην παρούσα εργασία ωστόσο αναλύεται λεπτομερώς η έννοια του **Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ)**. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα είναι μαζικά παράλληλοι κατανεμημένοι επεξεργαστές αποτελούμενοι από απλές μονάδες επεξεργασίας (τεχνητοί νευρώνες). Κάθε μονάδα επεξεργασίας χαρακτηρίζεται από εισόδους και εξόδους. Υλοποιεί τοπικά έναν υπολογισμό με βάση τις εισόδους που δέχεται και μεταδίδει το αποτέλεσμα σε άλλες μονάδες επεξεργασίας με τις οποίες συνδέεται. Το σύστημα λειτουργεί παράλληλα και πολλές μονάδες έχουν δυνατότητα να πραγματοποιήσουν ταυτόχρονα τους υπολογισμούς τους. Κάθε σύνδεση μεταξύ μονάδων χαρακτηρίζεται από μια τιμή βάρους. Οι τιμές των βαρών των συνδέσεων αποτελούν τη γνώση η οποία είναι αποθηκευμένη στο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο και χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του. Συνήθως ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο αναπτύσσει μια συνολική λειτουργικότητα μέσω μιας μορφής εκπαίδευσης. Στο δίκτυο υπάρχουν και οι κρυφές μονάδες οι οποίες δεν είναι ορατές στον εξωτερικό κόσμο και οι είσοδοι τους καθώς και οι έξοδοι τους βρίσκονται εντός του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

3.4.1. Μαθηματικό Μοντέλο Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από απλούς υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες, νευρώνια), διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Οι νευρώνες είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Κάθε τέτοιος κόμβος δέχεται ένα σύνολο αριθμητικών εισόδων από διαφορετικές πηγές (είτε από άλλους νευρώνες, είτε από το περιβάλλον), επιτελεί έναν υπολογισμό με βάση αυτές τις εισόδους και παράγει μία έξοδο. Η έξοδος αυτή είτε κατευθύνεται στο περιβάλλον, είτε τροφοδοτείται ως είσοδος σε άλλους νευρώνες του δικτύου. Υπάρχουν τρεις τύποι νευρώνων: οι νευρώνες εισόδου, οι νευρώνες εξόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες ή κρυμμένοι νευρώνες. Οι νευρώνες εισόδου δεν επιτελούν κανέναν υπολογισμό, μεσολαβούν ανάμεσα στις περιβαλλοντικές εισόδους του δικτύου και στους υπολογιστικούς νευρώνες. Οι νευρώνες εξόδου διοχετεύουν στο περιβάλλον τις τελικές αριθμητικές εξόδους του δικτύου. Οι υπολογιστικοί νευρώνες πολλαπλασιάζουν κάθε είσοδό τους με το αντίστοιχο συναπτικό βάρος και υπολογίζουν το ολικό άθροισμα των γινομένων.

Ένας νευρώνας λαμβάνει συνήθως πολλές ταυτόχρονες εισόδους. Κάθε είσοδος έχει το αντίστοιχο βάρος της. Τα βάρη είναι προσαρμοστικοί συντελεστές μέσα στο δίκτυο οι οποίοι καθορίζουν την ένταση του σήματος εισόδου καθώς εισάγεται στον τεχνητό νευρώνα. Ανάλογα πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το βάρος w τόσο η συνεισφορά του σήματος είναι μεγάλη ή μικρή αντίστοιχα. Σε κάθε νευρώνα καταφθάνει ένας αριθμός σημάτων, τα οποία έρχονται ως είσοδος σε αυτόν. Κάθε σήμα που μεταδίδεται από ένα νευρώνα σε έναν άλλο μέσα στο νευρωνικό δίκτυο συνδέεται με την τιμή βάρους w η οποία υποδηλώνει πόσο στενά είναι συνδεδεμένοι οι δύο νευρώνες που συνδέονται με το βάρος αυτό. Επίσης, ο τεχνητός νευρώνας έχει και μια σύνδεση σταθερής διέγερσης, δηλαδή μια είσοδο b_k (bias) η τιμή της οποίας ισοδυναμεί μόνιμα με 1. Εναλλακτικά η είσοδος μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι συνδεδεμένη με ένα ιδεατό νευρώνα ο οποίος βρίσκεται σε διαρκή ενεργοποίηση και μεταδίδει συνεχώς σήματα με τιμή 1. Όπως και οι υπόλοιπες συνδέσεις έτσι και αυτή χαρακτηρίζεται από μια τιμή βάρους που συμβολίζεται με w_0 και ονομάζεται πόλωση νευρώνα. Η εισαγωγή της πόλωσης προσδίδει στο νευρώνα επιπλέον υπολογιστικές δυνατότητες μάθησης και προσαρμογής στα δεδομένα εκπαίδευσης.



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση ενός απλού Νευρωνικού Δικτύου
(Πηγή: *Neural Network Toolbox™ 7, User's Guide*)

Συνεπώς, κάθε εισερχόμενο σήμα x_i πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος w_i και όλα αυτά τα γινόμενα αθροίζονται μαζί με ένα εξωτερικό βάρος (πόλωση) w_0 που αποτελεί τη συνολική είσοδο του νευρώνα :

$$u = \sum_{i=1}^n (x_i * w_i + w_0) \quad (3.1)$$

Στη συνέχεια η είσοδος αυτή μετασχηματίζεται σύμφωνα με μια συνάρτηση ενεργοποίησης $\varphi(u)$ η οποία δίνει και την τελική έξοδο του νευρώνα που θα διαδοθεί μέσα στο νευρωνικό δίκτυο προς την έξοδο. Η συνάρτηση ενεργοποίησης φ επιλέγεται από το δημιουργό του δικτύου και σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Αντίστοιχα, οι παράμετροι w και w_0 προσαρμόζονται με τη χρήση ενός κανόνα εκπαίδευσης έτσι ώστε η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του νευρώνα να ικανοποιεί τον επιθυμητό στόχο του προβλήματος. Επομένως, η έξοδος y_k του k νευρώνα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

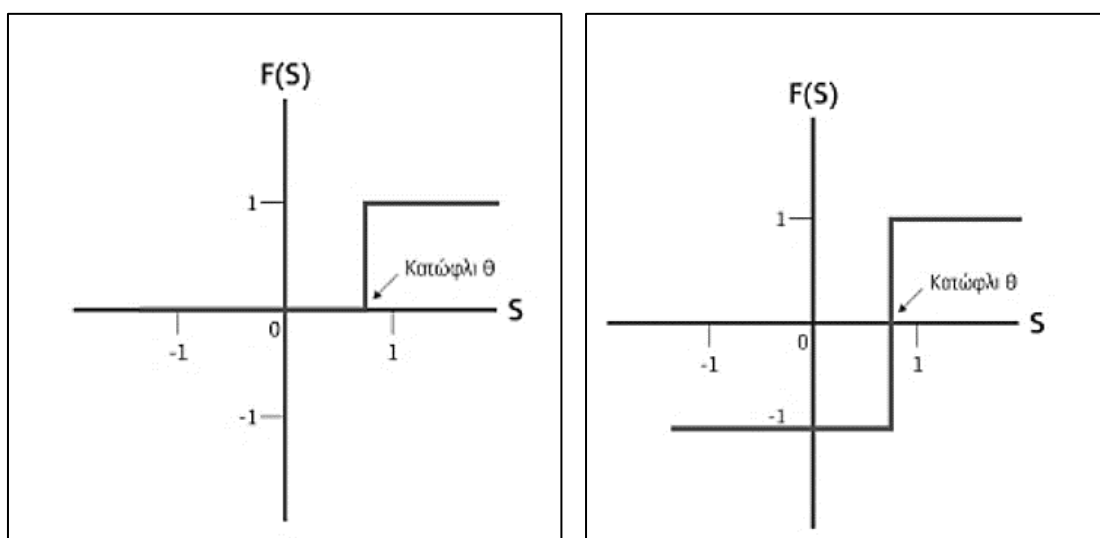
$$y_k = \varphi\left(\sum_{i=0}^n (x_{ki} * w_{ki} + w_0)\right) \quad (3.2)$$

Επιπλέον, ο τεχνητός νευρώνας δίνει έξοδο μέσω της συνάρτησης μετάβασης (transfer function), μόνο όταν το ζυγισμένο άθροισμα των εισόδων είναι μεγαλύτερο μιας ορισμένης τιμής κατωφλίου (threshold value) θ , δηλαδή όταν:

$$\sum_i^n x_i * w_i - \theta > 0 \quad (3.3)$$

Η συνάρτηση ενεργοποίησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη δημιουργία του νευρωνικού δικτύου. Υπάρχουν τρεις τύποι συναρτήσεων η βηματική, η γραμμική και η σιγμοειδής.

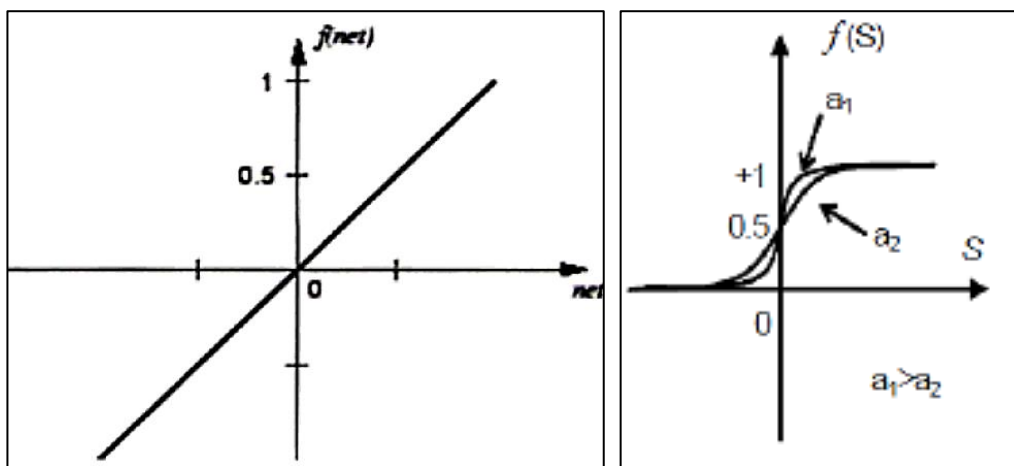
Η βηματική ορίζει την έξοδο του νευρώνα ίση με 0 αν το όρισμα της συνάρτησης είναι μικρότερο ή ίσο του 0 και ίση με 1 αν το όρισμα είναι μεγαλύτερο του μηδενός. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία νευρώνων που διαχωρίζουν τις εισόδους σε δυο διαφορετικές κατηγορίες. Παρόμοια είναι η συνάρτηση προσήμου η οποία έχει ως αποτέλεσμα η έξοδος του νευρώνα να παίρνει τιμές $[-1, 1]$ και περιορίζει το πεδίο τιμών της εξόδου του νευρώνα στο διάστημα $(0,1)$. Η βηματική συνάρτηση δε θεωρείται χρήσιμη ως συνάρτηση ενεργοποίησης στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, καθώς σύμφωνα με τον απειροστικό λογισμό έχει το βασικό μειονέκτημα ότι η παράγωγός της απειρίζεται. Γι' αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν συναρτήσεις ενεργοποίησης που η γραφική τους παράσταση μοιάζει με τη βηματική, αλλά ταυτόχρονα να είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες σε όλο το πεδίο ορισμού τους.



Σχήμα 3.4: Συνάρτηση Βηματική και Προσήμου (Πηγή: *Neural Network Toolbox™ 7, User's Guide*)

Όσον αφορά τη γραμμική συνάρτηση είναι της μορφής $\varphi(u)=u$ και χρησιμοποιείται κυρίως σε νευρωνικά δίκτυα που προορίζονται για γραμμική προσέγγιση στα γραμμικά φίλτρα. Η γραμμική συνάρτηση είναι η απλούστατη και λιγότερο χρησιμοποιούμενη. Τέλος, η πιο συνηθισμένη συνάρτηση που αξιοποιείται για την κατασκευή των νευρωνικών δικτύων είναι η σιγμοειδής η οποία ορίζεται ως εξής :

$$F(S) = \frac{1}{1 + e^{-a*S}} \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.5:: Γραμμική και Σιγμοειδής Συνάρτηση (Πηγή: Neural Network Toolbox™ 7, User's Guide)

3.4.2. Δομή και Αρχιτεκτονική Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

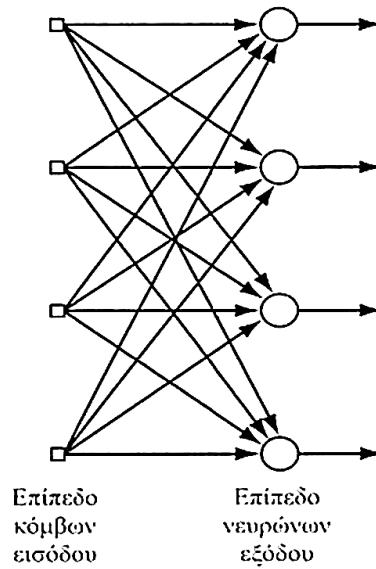
Όλα τα νευρωνικά δίκτυα έχουν παρόμοια δομή, οι νευρώνες τους διασυνδέουν τον πραγματικό κόσμο για να λάβουν τις εισόδους του και άλλοι νευρώνες παρέχουν στον πραγματικό κόσμο τα αποτελέσματα του δικτύου. Όλο το υπόλοιπο των νευρώνων είναι κρυφή μορφή. Πιο συγκεκριμένα, οι νευρώνες ομαδοποιούνται σε στρώματα (neuron layers), κάθε νευρώνας ενός στρώματος συνδέεται με τους προηγούμενους νευρώνες και το επόμενο στρώμα, εκτός από το στρώμα εισόδου (input layer) και το στρώμα εξόδου (output layer). Οι νευρώνες που σχετίζονται με το στρώμα εισόδου λαμβάνουν είσοδο από το εξωτερικό περιβάλλον ενώ οι νευρώνες του στρώματος εξόδου διαβιβάζουν την έξοδο του συστήματος στο χρήστη ή στο εξωτερικό

περιβάλλον. Μεταξύ αυτών των δύο προαναφερόμενων στρωμάτων υπάρχουν τα κρυμμένα στρώματα (hidden layers), μέσω των οποίων μεταβιβάζονται οι πληροφορίες από στρώμα σε στρώμα. Από το στρώμα εισόδου στο στρώμα εξόδου ο αριθμός των κρυμμένων στρωμάτων ποικίλει, μπορεί να μην υπάρχει κανένα ή να είναι μόνο ένα ή και περισσότερα κρυμμένα στρώματα. Όταν το στρώμα εισόδου δεχτεί μια είσοδο, οι νευρώνες του παράγουν μια έξοδο, η οποία γίνεται είσοδος στα άλλα στρώματα του συστήματος. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί μια συγκεκριμένη κατάσταση για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Ακόμη σημαντικό είναι ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων να μην αυξάνεται πολύ διότι δημιουργείται πρόβλημα στο δίκτυο.

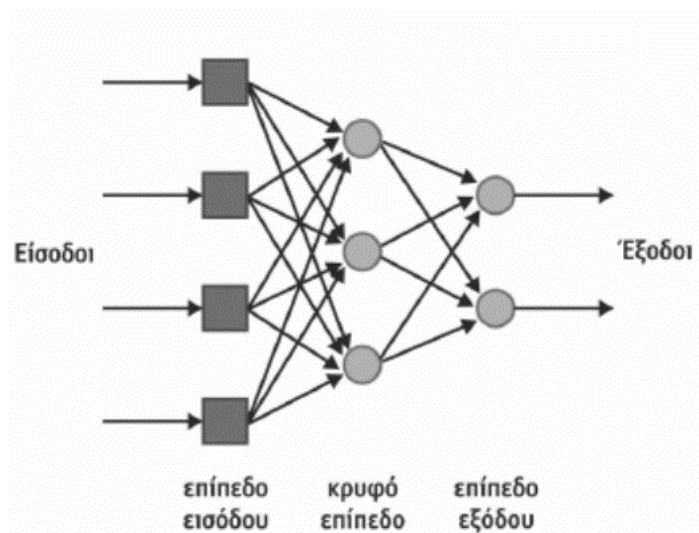
Εν συνεχεία, η αρχιτεκτονική των νευρωνικών δικτύων καθορίζει τη διάταξη, τον αριθμό και τον τύπο των νευρώνων. Οι νευρώνες οργανώνονται σε μορφή επιπέδων (ή αλλιώς στρωμάτων), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και ο τρόπος με τον οποίο είναι δομημένοι σχετίζεται με τον αλγόριθμο μάθησης που χρησιμοποιείται κατά την εκπαίδευση του δικτύου. Αναλυτικότερα, υπάρχουν τρεις κατηγορίες αρχιτεκτονικών δικτύων οι οποίες είναι τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (single layer feedforward Networks), τα πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (multilayer feedforward Networks) και τα αναδρομικά δίκτυα (Recurrent Neural Networks).

Τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (feedforward) αποτελούν την πιο απλή μορφή ενός δικτύου. Περιέχουν ένα επίπεδο εισόδου το οποίο αποτελείται από πηγαίους κόμβους και κατευθύνεται στο επόμενο επίπεδο νευρώνων εξόδου (υπολογιστικοί κόμβοι) και όχι αντίστροφα. Οι νευρώνες εισόδου δηλαδή, απλά μεταφέρουν το σήμα στο επίπεδο εξόδου χωρίς να αυτό να υπόκεινται σε κάποια επεξεργασία.

Στα πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης υπάρχουν ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα, των οποίων οι νευρώνες ονομάζονται κρυφοί. Οι νευρώνες σε κάθε επίπεδο έχουν σαν εισόδους τα σήματα εξόδου μόνο του προηγούμενου επιπέδου. Συνεπώς, το σήμα κατευθύνεται από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου μέσω των κρυφών επιπέδων. Και σε αυτή την περίπτωση δικτύου οι νευρώνες εισόδου μεταφέρουν το σήμα στο επόμενο επίπεδο χωρίς να κάνουν καμία επεξεργασία, σε αντίθεση με τους κρυφούς νευρώνες και τους νευρώνες εξόδου οι οποίοι μπορούν να χαρακτηριστούν ως υπολογιστικοί νευρώνες. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα τέτοιο δίκτυο με ένα κρυφό επίπεδο.



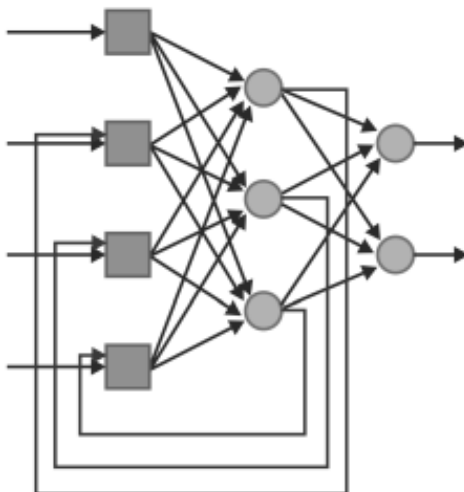
Σχήμα 3.6: Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης ενός επιπέδου (Γεωργούλη, 2015)



Σχήμα 3.7: Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ένα κρυφό επίπεδο (Γεωργούλη, 2015)

Τέλος, τα αναδρομικά δίκτυα διαφέρουν από τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης εφόσον περιέχουν ένα τουλάχιστον βρόγχο ανατροφοδότησης. Η έξοδος κάθε νευρώνα του δικτύου ανατροφοδοτεί την είσοδο των άλλων νευρώνων του ίδιου επιπέδου και σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και τη δική του είσοδο (αυτό-ανάδραση). Η παρουσία βρόγχων ανάδρασης (ή ανατροφοδότησης) επηρεάζει τη δυνατότητα μάθησης του δικτύου και την απόδοσή του. Οι κλάδοι των βρόγχων ανάδρασης

περιέχουν στοιχεία μοναδιαίας χρονικής καθυστέρησης που συμβολίζονται ως z^{-1} . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα αναδρομικό δίκτυο χωρίς αυτό-ανάδραση και κρυφούς νευρώνες.



Σχήμα 3.8: Αναδρομικό δίκτυο με ετερο-συσχετιζόμενη μνήμη (Γεωργούλη, 2015)

3.4.3. Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Σκοπός της λειτουργίας ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου είναι η επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων ή η επιτέλεση ορισμένων διεργασιών από μόνο του π.χ. αναγνώριση εικόνων. Για την επίτευξη του σκοπού απαραίτητη προτεραιότητα αποτελεί η εκπαίδευση του δικτύου. Τα ΤΝΔ πραγματοποιούν δύο βασικές λειτουργίες, τη μάθηση και την ανάκληση. Ανάκληση (recall) ονομάζεται η διαδικασία του υπολογισμού ενός διανύσματος εξόδου για συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου και τιμές βαρών. Μάθηση (learning) ονομάζεται η διαδικασία της τροποποίησης της τιμής των βαρών του δικτύου, ώστε δίνοντας συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου να παράγεται συγκεκριμένο διάνυσμα εξόδου.

Η μάθηση γίνεται με τη χρήση κάποιων παραδειγμάτων εκπαίδευσης και με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου εκπαίδευσης και έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια επαναληπτική διαδικασία με την οποία αλλάζουν οι ελεύθεροι παράμετροι (βάρη και κατώφλι) ενός Νευρωνικού Δικτύου με απώτερο σκοπό τη μείωση του σφάλματος μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής εξόδου του

δικτύου. Συνεπώς, η διαδικασία αυτή ονομάζεται και εκπαίδευση (training) του ΤΝΔ. Σύμφωνα με τον τρόπο τροποποίησης των βαρών κατά την εκπαίδευση διακρίνονται τρία είδη μάθησης, η μάθηση με επίβλεψη, η βαθμολογημένη μάθηση και η μάθηση χωρίς επίβλεψη.

Η **επιβλεπόμενη μάθηση (supervised learning)** είναι μια διαδικασία η οποία συνδυάζει έναν εξωτερικό εκπαιδευτή και τη συνολική ή γενικευμένη πληροφορία. Κάποιες από τις μεθόδους οι οποίες συγκαταλέγονται σε αυτή την κατηγορία είναι η μάθηση με διόρθωση σφάλματος και η στοχαστική μάθηση. Παραδείγματα τα οποία αντιπροσωπεύουν την μάθηση με επίβλεψη συμπεριλαμβάνουν αποφάσεις για τη χρονική στιγμή που θα σταματήσει η διαδικασία εκπαίδευσης, αποφάσεις αναφορικά με τη συχνότητα παρουσίασης στο δίκτυο, τα πρότυπα εκπαίδευσης και τη παρουσίαση προόδου του δικτύου. Η μάθηση με επίβλεψη χωρίζεται σε δύο ακόμα κατηγορίες: στη δομική (structural) και στην προσωρινή (temporal) εκμάθηση. Οι αλγόριθμοι οι οποίοι βρίσκονται στην πρώτη κατηγορία, χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης σχέσης μεταξύ εισόδων και εξόδων για κάθε ξεχωριστό ζευγάρι προτύπων. Παραδείγματα της δομικής εκμάθησης αποτελούν η αναγνώριση και η κατηγοριοποίηση προτύπων, ενώ παραδείγματα της προσωρινής εκμάθησης η πρόβλεψη και ο έλεγχος.

Στη μάθηση αυτή ο εκπαιδευτής έχει γνώση του περιβάλλοντος σε αντίθεση με το Νευρωνικό Δίκτυο και αυτή η γνώση αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο παραδειγμάτων εισόδου-εξόδου. Ο εκπαιδευτής και το Νευρωνικό δίκτυο αντλούν από το περιβάλλον σαν είσοδο ένα διάνυσμα εκπαίδευσης και ο εκπαιδευτής παρέχει στο Νευρωνικό δίκτυο μια επιθυμητή απόκριση (στόχος) για το συγκεκριμένο διάνυσμα εκπαίδευσης. Η επιθυμητή απόκριση είναι η βέλτιστη ενέργεια που πρέπει να εκτελέσει το Νευρωνικό δίκτυο. Η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής απόκρισης και της πραγματικής του δικτύου αποτελεί το σήμα σφάλματος. Η επιρροή του διανύσματος εκπαίδευσης σε συνδυασμό με το σήμα σφάλματος οδηγούν στη μεταβολή με επαναληπτικό τρόπο των παραμέτρων του δικτύου. Η προσαρμογή αυτή στοχεύει στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του εκπαιδευτή. Έτσι η γνώση του περιβάλλοντος μεταφέρεται στο Νευρωνικό Δίκτυο μέσω εκπαίδευσης και αποθηκεύεται με τη μορφή σταθερών συναπτικών βαρών τα οποία αποτελούν την μακροπρόθεσμη μνήμη του δικτύου.

Στη **βαθμολογημένη μάθηση (graded learning)** η έξοδος χαρακτηρίζεται ως καλή ή κακή σύμφωνα με μια αριθμητική κλίμακα και κατόπιν τα βάρη αναπροσαρμόζονται με βάση αυτόν τον χαρακτηρισμό. Σε αυτόν τον τύπο μάθησης το Νευρωνικό Δίκτυο τροφοδοτείται με δειγματικά πρότυπα εισόδου αλλά δεν τροφοδοτείται με τις επιθυμητές αποκρίσεις σε αυτές τις εισόδους. Χρησιμοποιείται ένα συνολικό μέτρο της επάρκειας της απόκρισης που προκύπτει (δείκτης συμπεριφοράς) το οποίο μπορεί να οδηγήσει το κείμενο στην επιθυμητή συμπεριφορά. Το μέτρο αυτό είναι γνωστό ως ενισχυτικό σήμα και ανατροφοδοτείται στο ΝΔ έτσι ώστε να «επιβραβεύσει» (reward) τις ορθές τιμές συμπεριφορές και να «τιμωρήσει» (penalize) τις λανθασμένες συμπεριφορές. Η βαθμολογημένη μάθηση διακρίνεται επίσης σε συσχετιστική και μη συσχετιστική. Στην πρώτη, το περιβάλλον τροφοδοτεί, πέρα από το ενισχυτικό σήμα, άλλες μορφές πληροφορίας από τις οποίες το ΝΔ πρέπει να μάθει μια απεικόνιση με τη μορφή μιας συσχέτισης αιτίου-αποτελέσματος. Στη δεύτερη, η μοναδική πληροφορία (είσοδος) που δίνεται από το περιβάλλον είναι το ενισχυτικό σήμα, ενώ ο προορισμός του συστήματος μάθησης είναι μάλλον να επιλέξει μια μοναδική βέλτιστη ενέργεια παρά να συσχετίσει διάφορες ενέργειες με διαφορετικά ερεθίσματα (εισόδους). Συγκεντρωτικά, η μάθηση αυτή ακολουθεί τις εξής διαδικασίες. Αρχικά, το Νευρωνικό Δίκτυο υπολογίζει τις εξόδους που παράγονται από την τρέχουσα είσοδο με τις παρούσες τιμές των βαρών. Εν συνεχεία το σύστημα αξιολογεί την έξοδο και το ενισχυτικό σήμα τροφοδοτείται στο δίκτυο. Τα βάρη ανανεώνονται με βάση το ενισχυτικό σήμα, αυξάνοντας τις τιμές των βαρών που συνέβαλαν σε καλή συμπεριφορά ή μειώνοντας τις τιμές αυτών που προκάλεσαν κακή συμπεριφορά.

Τέλος, στη **μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning)** οι αλγόριθμοι της αναφέρονται ως αυτό-οργανώμενοι (self-organized) και είναι διαδικασίες οι οποίες δεν απαιτούν να είναι παρών ένας εξωτερικός εκπαιδευτής που να δίνει την επιθυμητή απόκριση και να επιβλέπει τη διαδικασία της μάθησης. Βασίζονται μόνο σε τοπική πληροφορία σε όλη τη διάρκεια της εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Τα δείγματα εκπαίδευσης αποτελούνται μόνο από τα δείγματα εισόδου και δεν περιέχουν δείγματα επιθυμητής εξόδου. Το δίκτυο αξιοποιεί έναν εσωτερικό έλεγχο και εκπαιδεύεται έτσι ώστε τα σήματα εξόδου να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τις εισόδους. Συνεπώς, το δίκτυο ελέγχει τον εαυτό του και διορθώνει τα σφάλματα στα δεδομένα με έναν μηχανισμό ανατροφοδότησης (feedback). Όταν το δίκτυο σταματήσει να αλλάζει τις τιμές των βαρών τότε η εκπαίδευση έχει ολοκληρωθεί.

Σημαντικό να αναφερθεί ότι στις περισσότερες εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων χρησιμοποιείται η επιβλεπόμενη μάθηση, για την οποία υπάρχουν αρκετοί **αλγόριθμοι εκπαίδευσης**. Στον αλγόριθμο που βασίζεται στον κανόνα Δέλτα (Delta rule learning), η διαφορά μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής εξόδου ελαχιστοποιείται μέσω μιας διαδικασίας ελαχίστων τετραγώνων. Στον αλγόριθμο ανάστροφης μετάδοσης λάθους (back propagation) η μεταβολή των βαρών βασίζεται στον υπολογισμό της συνεισφοράς κάθε βάρους στο συνολικό σφάλμα. Στην ανταγωνιστική μάθηση (competitive learning), οι τεχνητοί νευρώνες συναγωνίζονται μεταξύ τους και μόνο αυτός με τη μεγαλύτερη απόκριση σε δοθείσα είσοδο τροποποιεί τα βάρη του. Τέλος, στην τυχαία μάθηση (random learning), οι μεταβολές στα βάρη εισάγονται τυχαία και ανάλογα με το αν η έξοδος βελτιώνεται ή όχι με βάση κάποια προκαθορισμένα από το χρήστη κριτήρια, οι μεταβολές αυτές υιοθετούνται ή απορρίπτονται.

Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη οι αλγόριθμοι οι οποίοι αξιοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των Νευρωνικών Δικτύων σε περιβάλλον MATLAB, είναι ο Levenberg-Marquardt (LM), ο Bayesian Regularization (BR) και ο Scaled Conjugate Gradient (SCG).

Ο **Levenberg-Marquardt (LM)** είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος ενημερώνει τις τιμές βαρών και μεροληψίας (bias) σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Επιπλέον, θεωρείται ο ταχύτερος αλγόριθμος ανάστροφης μετάδοσης λάθους (back propagation) και συνήθως επιλέγεται πρώτος για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων αν και απαιτεί περισσότερη μνήμη από άλλους αλγόριθμους. Συνίσταται στη διαδοχική προσέγγιση των δεδομένων αρχικών τιμών των παραμέτρων στο επιθυμητό τοπικό βέλτιστο. Το εκπαιδευτικό σετ του αλγορίθμου διαιρείται σε διανύσματα επικύρωσης και δοκιμής. Τα διανύσματα επικύρωσης χρησιμοποιούνται για να σταματήσουν την εκπαίδευση νωρίς εάν η απόδοση του δικτύου σχετικά με το διάνυσμα επικύρωσης δε βελτιώνεται ή παραμένει το ίδιο για μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Τα διανύσματα δοκιμής χρησιμοποιούνται ως περαιτέρω έλεγχος ότι το δίκτυο γενικεύεται ορθά, αλλά δεν επηρεάζουν την εκπαίδευση. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου σταματά όταν συμβεί οποιαδήποτε από τις επόμενες συνθήκες, δηλαδή στην περίπτωση που επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (ή αλλιώς εποχών), η κλίση απόδοσης πέσει κάτω από την τιμή διόρθωσης (min_grad), το σφάλμα επικύρωσης (max_fail)

αυξηθεί περισσότερο από έναν προκαθορισμένο αριθμό φορών από την τελευταία φορά που μειώθηκε (όταν χρησιμοποιείται η επικύρωση (validation)) ή ακόμη στην περίπτωση που γίνει υπέρβαση του μέγιστου χρονικού ορίου.

Ο **Bayesian Regularization (BR)** θεωρείται ως μια από τις καλύτερες προσεγγίσεις για να ξεπεραστεί το σύνηθες πρόβλημα των νευρωνικών δικτύων, το οποίο είναι η βέλτιστη λύση να οδηγεί σε υπερπροσαρμογή (over-fitting). Η προσέγγιση αυτή ελαχιστοποιεί το πρόβλημα αυτό λαμβάνοντας υπόψιν την αρχιτεκτονική του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μια τεχνική εκπαίδευσης η οποία ενημερώνει τις τιμές από τα βάρη και τα συστηματικά σφάλματα με τη βοήθεια της μεθόδου βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt. Στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση του συνδυασμού τετραγωνικών σφαλμάτων και βαρών ώστε στη συνέχεια να καθορίσει το σωστό συνδυασμό τους με σκοπό να παραχθεί ένα δίκτυο του οποίου η γενίκευση να είναι καλύτερη. Ακόμη, είναι δυνατό να εκπαιδεύσει οποιοδήποτε δίκτυο, εφόσον οι συναρτήσεις βάρους, εισόδου και μεταφοράς έχουν παράγωγες συναρτήσεις. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου σταματά όταν συμβεί οποιαδήποτε από τις επόμενες συνθήκες, δηλαδή στην περίπτωση που επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (ή αλλιώς εποχών), η κλίση απόδοσης πέσει κάτω από την τιμή διόρθωσης (min_grad) και στην περίπτωση ελαχιστοποίησης του προσαρμοστικού βάρους (ρύθμιση-regularization). Τέλος, συγκριτικά με τον προηγούμενο αλγόριθμο απαιτεί περισσότερο χρόνο εκπαίδευσης, αλλά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε δύσκολες, μικρές ή ακόμη και «θορυβώδεις» ομάδες δεδομένων.

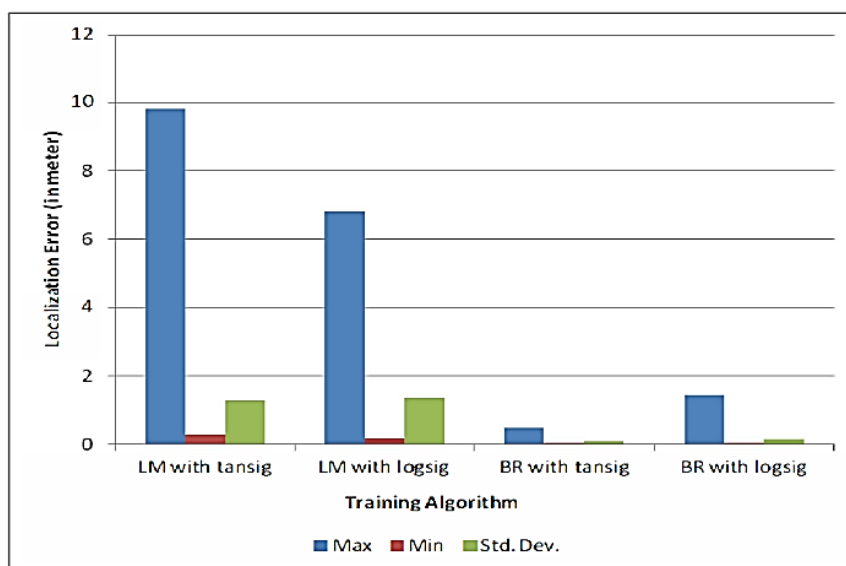
Ο **Scaled Conjugate Gradient (SCG)** βασίζεται σε οδηγίες σύζευξης, ωστόσο ο αλγόριθμος αυτός δεν εκτελεί αναζήτηση γραμμής σε κάθε επανάληψη σε αντίθεση με άλλους αλγόριθμους. Σχεδιάστηκε επομένως με σκοπό την αποφυγή αυτής της χρονοβόρας διαδικασίας και κατ' επέκταση η υπολογιστική μνήμη που απαιτείται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μικρότερη. Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου στα νευρωνικά δίκτυα ενημερώνει τις τιμές βάρους και μεροληψίας (bias) σύμφωνα με τη μέθοδο της κλιμακοποίησης της παραμέτρου του ρυθμού εκπαίδευσης που εξαρτάται από την επιτυχημένη μείωση του σφάλματος και την πιστότητα μιας μονοδιάστατης τετραγωνικής προσέγγισης. Μπορεί να εκπαιδεύσει οποιοδήποτε δίκτυο αρκεί οι συναρτήσεις βάρους, εισόδου και μεταφοράς να έχουν παράγωγες συναρτήσεις. Τέλος, η εκπαίδευση του σταματά για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.

Για τη σύγκριση της αποδοτικότητας των αλγορίθμων που προαναφέρθηκαν μελετήθηκαν τρία διαφορετικά άρθρα (Khan et al.,2019, Kayri, 2016 and Payal et al.,2013). Και στις τρεις περιπτώσεις αυτές κατόπιν δοκιμών και αναλύσεων συμπεραίνεται ότι ο αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR) έχει καλύτερη απόδοση καθώς οι τιμές παλινδρόμησης που εξήχθησαν ήταν καλύτερες από τους άλλους δύο αλγόριθμους σύγκρισης. Ο BR αλγόριθμος είναι πιο ακριβής διότι μειώνει την ανάγκη για μακροχρόνια εγκυρότητα, παρέχει αποτελεσματικά κριτήρια για τη διακοπή της εκπαίδευσης και αποτρέπει την υπερβολική και κατ' επέκταση χρονοβόρα εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

Όσον αφορά στο άρθρο των Payal et al. (2013) χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με τρισδιάστατες εισόδους και ένα κρυφό στρώμα με 15 νευρώνες και 2 εξόδους. Επιπλέον, αξιοποιήθηκαν δύο σιγμοειδείς μορφές συναρτήσεων ενεργοποίησης. Παρακάτω, παρατίθενται τα στατιστικά αποτελέσματα (σφάλματα) για τις δύο περιπτώσεις συναρτήσεων και για τους αλγόριθμους BR και LM που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη ανάλυση.

S.No	Transfer Function		Training Algorithm	Localization Error (LE in meter)		
	Hidden layer	Output layer		Max	Min	Std. Dev.
1.	Tansig	Linear	Levenberg-Marquardt (LM)	9.82	0.27	1.28
2.	Logsig	Linear	Levenberg-Marquardt (LM)	6.81	0.17	1.36
3.	Tansig	Linear	Bayesian regularization (BR)	0.49	0.004	0.08
4.	Logsig	Linear	Bayesian regularization (BR)	1.43	0.005	0.14

Σχήμα 3.9α:: Στατιστικά αποτελέσματα για αλγόριθμους BR και LM (Payal et al.,2013)



Σχήμα 3.10β.: Στατιστικά αποτελέσματα για αλγόριθμους BR και LM (Payal et al.,2013)

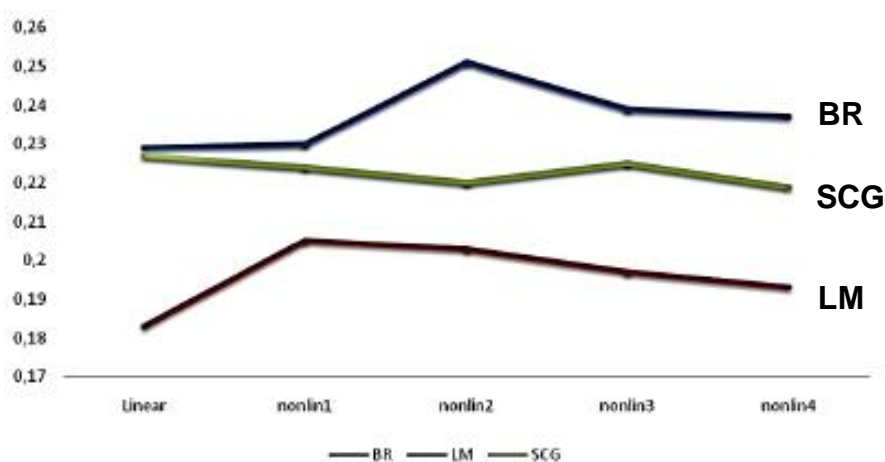
Από τον πίνακα καθώς και από το αντίστοιχο διάγραμμα είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος Bayesian Regularization παρουσιάζει μικρότερο συγκριτικά σφάλμα από τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.

Ομοίως και στο άρθρο του Kayri (2016) έγινε αρχικά σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων BR και LM με βάση τον αλγόριθμο ανάστροφης μετάδοσης λάθους (back-propagation). Το μοντέλο εξετάστηκε στην ανάλυση αυτή ως γραμμικό και μη γραμμικό και για τις δύο περιπτώσεις αλγορίθμων, ωστόσο παρατηρήθηκε ότι η σχέση μεταξύ των νευρώνων εισόδου και εξόδου ήταν μη γραμμική. Επίσης, εξετάστηκε η αρχιτεκτονική ενός, δύο, τριών, τεσσάρων και πέντε νευρώνων. Επομένως, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα ο αλγόριθμος BR θεωρήθηκε καλύτερο και αποδοτικότερο μοντέλο εφόσον τα αποτελέσματα που εξήχθησαν παρουσίαζαν υψηλότερη συσχέτιση με τον μικρότερο δυνατό και αποτελεσματικό αριθμό παραμέτρων.

Πίνακας 3.1: Συντελεστές συσχέτισης των αλγορίθμων BR και LM (Kayri,2016)

Training Algorithm	Linear	Nonlinear (One-Neuron)	Nonlinear (Two-Neuron)	Nonlinear (Three-Neuron)	Nonlinear (Four-Neuron)
BR	0.229	0.23	0.251	0.239	0.237
LM	0.183	0.205	0.203	0.197	0.193

Τέλος, στο άρθρο αυτό οι Okut et al. (2013) διερεύνησαν την ικανότητα πρόβλεψης των αλγορίθμων Bayesian Regularization (BR) και Scaled Conjugate Gradient (SCG). Στη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος BR απέδωσε ελαφρώς καλύτερα συγκριτικά με τον SCG. Κατέληξαν συνεπώς στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος BR σε πολλές μελέτες έχει μέτρια έως καλή απόδοση σε σχέση με άλλους αλγορίθμους κι αυτό συμβαίνει διότι υπερτερεί στην επιλογή και στη δύναμη του μοντέλου, στην επιλογή του συνόλου επικύρωσης, στο μέγεθος της προσπάθειας επικύρωσης καθώς και στη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Από τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζει και τους τρεις υπό μελέτη αλγόριθμους, σχετικά με την ικανότητα πρόβλεψής τους.



Σχήμα 3.11: Προγνωστική ικανότητα των αλγορίθμων BR, SCG και LM (Καγρι,2016)

3.4.4. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα με τη δυνατότητα τους να εξαγάγουν έννοιες και αποτελέσματα από περίπλοκα μέχρι ανακριβή στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωρίσουν πρότυπα και να ανιχνεύουν τάσεις που είναι σύνθετες για να παρατηρηθούν από άλλα υπολογιστικά συστήματα.

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα έχουν την ικανότητα να μάθουν μέσω παραδειγμάτων. Παρόλο που δεν είναι τα μόνα συστήματα με αυτήν τη δυνατότητα μάθησης διακρίνονται για την ικανότητά τους να οργανώνουν την πληροφορία των δεδομένων εισόδου με χρήσιμες μορφές. Αυτές οι μορφές αποτελούν στην ουσία ένα μοντέλο που

αναπαριστά τη σχέση η οποία ισχύει μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Επιπλέον, μπορούν να θεωρηθούν ως κατανεμημένη μνήμη και ως μνήμη συσχέτισης. Ο χαρακτηρισμός ως κατανεμημένη μνήμη προέρχεται από την κωδικοποίηση που δημιουργούν η οποία είναι κατανεμημένη σε όλα τα βάρη της συνδεσμολογίας τους. Για τον ίδιο λόγο τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα χαρακτηρίζονται και ως μνήμες συσχέτισης. Μια μνήμη συσχέτισης δεν αποθηκεύει πληροφορία με τον παραδοσιακό τρόπο αλλά μέσω κατάλληλων συσχετίσεων που δημιουργείται από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Η ανάκληση της πληροφορίας γίνεται με βάση το περιεχόμενο και όχι τη διεύθυνση, όπως συμβαίνει με τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η παραπάνω οργάνωση κάνει ορισμένα είδη νευρωνικών δικτύων να είναι πολύ ανεκτικά σε μικρές αλλαγές στα σήματα εισόδου, δηλαδή είναι σε θέση να παράγουν τη σωστή έξοδο ακόμη κι αν τα δεδομένα εισόδου είναι λίγο διαφορετικά ή ελλιπή, για παράδειγμα λόγω θορύβου. Οι υπολογισμοί ενός νευρωνικού δικτύου μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα ενώ συγχρόνως παρουσιάζουν ανοχή στη διαστρέβλωση εικόνων προτύπων.

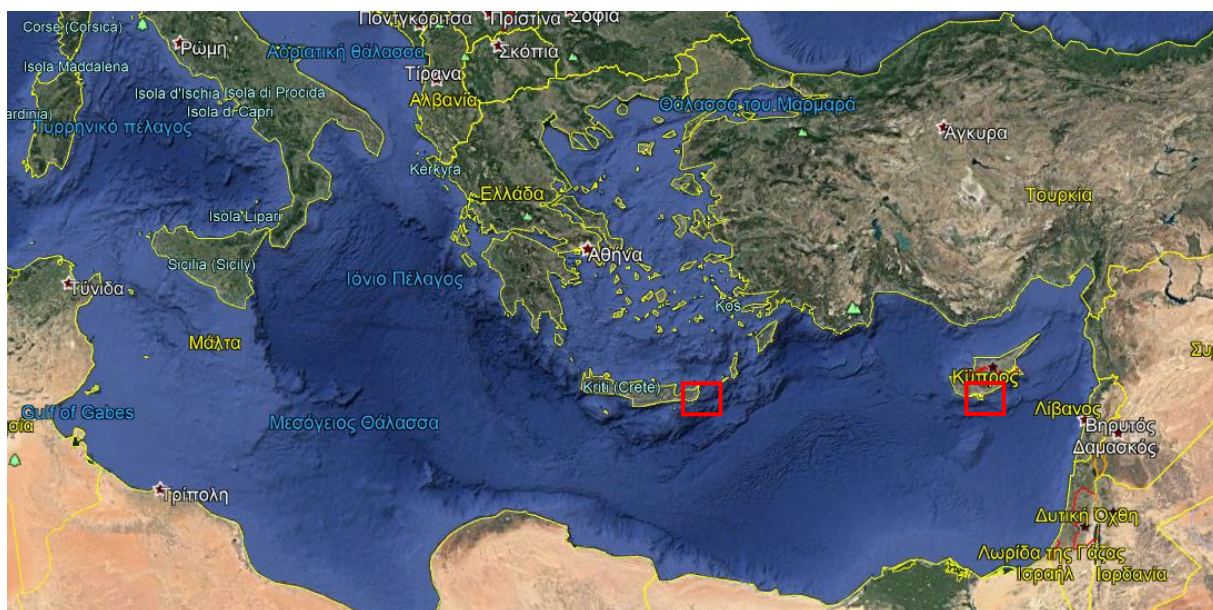
Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα όπως και τα βιολογικά έχουν μεγάλη ανοχή σε δομικά σφάλματα. Αυτό σημαίνει ότι η κακή λειτουργία ή η καταστροφή ενός νευρώνα ή κάποιων συνδέσμων δεν είναι ικανή να διαταράξει σημαντικά τη λειτουργία τους καθώς η πληροφορία που εσωκλείουν δεν είναι εντοπισμένη σε συγκεκριμένο σημείο αλλά διάχυτη σε όλο το δίκτυο. Γενικά το μέγεθος του σφάλματος λόγω των δομικών λαθών είναι ανάλογο του ποσοστού των κατεστραμμένων συνδέσεων. Από τη στιγμή που ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο εκπαιδεύει στο να αναγνωρίζει συνθήκες και καταστάσεις απαιτείται ένας μόνο κύκλος λειτουργίας τους για να προσδιορίσουν μια συγκεκριμένη κατάσταση.

Τα μειονεκτήματα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων είναι ότι η χρήση τους δεν συνίσταται σε περιπτώσεις στις οποίες υπάρχουν αποδοτικές μαθηματικές ή αλγοριθμικές μέθοδοι επίλυσης εφόσον ο χρόνος που απαιτείται για το σχεδιασμό και την εκπαίδευση ενός ΤΝΔ είναι πιθανά αυξημένος. Τέλος, υπάρχει δυσκολία στην εξήγηση της αιτίας για την οποία το ΤΝΔ φτάνει σε μια συγκεκριμένη λύση κι όχι σε κάποια άλλη.

4. Πιθανές Χαράξεις ενός Υποθαλάσσιου Αγωγού μέσω του ArcMap

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η διασύνδεση δύο περιοχών μελέτης, της Κύπρου με την Κρήτη, μέσω ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Συγκεκριμένα, το σημείο προέλευσης του αγωγού είναι το Ζύγι της Κύπρου και το σημείο προέλευσης είναι ο Γούδουρας της Κρήτης. Υλοποιήθηκαν συνεπώς με δύο διαφορετικές μεθόδους ορισμένες πρωταρχικές χαράξεις. Απαραίτητη μέριμνα για τη συγκεκριμένη διασύνδεση, είναι η μελέτη των παραγόντων που την επηρεάζουν. Ειδικότερα, οι σημαντικότεροι παράγοντες αφορούν την οικονομική ευστάθεια του έργου, ώστε να μην είναι αρκετά δαπανηρό καθώς επίσης και την προστασία του περιβάλλοντος. Το πρώτο στάδιο ανάλυσης, σχετίζεται με τη μέθοδο της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) όπου αξιοποιήθηκαν συγκεκριμένοι παράγοντες (περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και μηχανικοί), οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την χάραξη του υποθαλάσσιου αγωγού. Ωστόσο, το δεύτερο και σημαντικότερο στάδιο, εκεί όπου δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση, είναι η επίτευξη της χάραξης με σκοπό την αποφυγή των γεωκινδύνων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των μελετώμενων περιοχών. Στόχος συνεπώς του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η βελτιστοποίηση της χάραξης μεταξύ των δύο περιοχών καθώς επίσης και η διαπίστωση εάν ο προκείμενος υποθαλάσσιος αγωγός καταπονείται από γεωκινδύνους. Στην περίπτωση αυτή γίνεται ανάλυση της καταπόνησης, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5, έτσι ώστε να ελεγχθεί στη συνέχεια αν η διασταύρωση αγωγού και γεωκινδύνου είναι επιτρεπόμενη ή αντιθέτως πρέπει να αποφευχθούν εντελώς (κεφάλαιο 6). Παρακάτω, παρουσιάζεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης με τα αντίστοιχα σημεία προέλευσης και προορισμού, από την οποία αντιλαμβανόμαστε ότι ο υπό μελέτη υποθαλάσσιος αγωγός θα διασχίζει τη Μεσόγειο Θάλασσα.



Εικόνα 4.1: Ευρύτερη περιοχή μελέτης της χάραξης του αγωγού- σημεία προέλευσης (Κύπρος) και προορισμού (Κρήτη)

4.2. Προκαταρκτικές χαράξεις με την αξιοποίηση δύο μεθόδων

4.2.1. Προκαταρκτική Χάραξη με χρήση της Μεθοδολογίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (ΑΗΡ) – Περιβαλλοντικοί, Οικονομικοί, Μηχανικοί Παράγοντες Επιρροής

Το πρώτο στάδιο για την ενότητα αυτή είναι η προσπάθεια χάραξης αξιοποιώντας τη μεθοδολογία της Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process – ΑΗΡ). Η διαδικασία αυτή είναι μια συστηματική μέθοδος για συστήματα λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων και πολλαπλών αντικειμένων που πρότεινε ο γνωστός επιχειρησιακός ερευνητής των ΗΠΑ Τ.Λ. Saaty, τη δεκαετία του 1970. Πρόκειται για μία γενικότερη υπολογιστική θεωρία η οποία χρησιμοποιεί τόσο παραγωγική όσο και επαγωγική λογική, λαμβάνοντας υπόψη πολλούς διαφορετικούς παράγοντες ταυτόχρονα. Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι έχει απλή τεκμηρίωση και εύκολη επαναληψιμότητα, επιπλέον έχει τη δυνατότητα συνδυασμού ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων καθώς επίσης συμβάλλει στην κατανόηση του υπό μελέτη προβλήματος, με την αποσύνθεσή του, μέσω της ιεραρχικής δομής.

Τα στάδια υλοποίησης της μεθόδου AHP είναι :

1. Αποδόμηση του μελετώμενου προβλήματος σε ένα ιεραρχικό μοντέλο, το οποίο απαρτίζεται από τις βασικές συνιστώσες του, επιτρέποντας τις συγκρίσεις κατά ζεύγη
2. Συγκριτική αξιολόγηση κάθε κριτηρίου
3. Σύνθεση των αξιολογημένων κριτηρίων με σκοπό την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.
4. Εύρεση βέλτιστης επιλογής.

Συνεπώς, προηγείται η ιεράρχηση του προβλήματος με τον καθορισμό των βασικών κριτηρίων με βάση τα οποία θα γίνει η ανάλυση, ακολουθεί η συγκριτική κατάταξη των κριτηρίων, η οποία προκύπτει από την εμπειρία του χρήστη και τέλος, πραγματοποιείται η σύνθεση αυτών ώστε να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα, ως η βέλτιστη εναλλακτική λύση σύμφωνα με τις προτεραιότητες και τους στόχους που έχουν τεθεί. Η μεθοδολογία αυτή, παρά την εκτεταμένη χρήση της, έχει υποστεί κριτική, κυρίως λόγω της αδυναμίας της για τη διαχείριση της αβεβαιότητας των αποφάσεων των χρηστών οι οποίοι εμπλέκονται στην υλοποίησή της.

Άρα, η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει δύο γενικές φάσεις, τη δόμηση της ιεραρχίας και το στάδιο της αξιολόγησης των επιμέρους κριτηρίων. Το στάδιο της αξιολόγησης βασίζεται στη σύγκριση ανά ζεύγος των διαφόρων κριτηρίων. Το αποτέλεσμα αυτών των συγκρίσεων είναι η δημιουργία ενός πίνακα συγκρίσεων (judgment matrix). Από κάθε πίνακα τέτοιων συγκρίσεων, προκύπτει ένα ιδιοδιάνυσμα, το οποίο αντικατοπτρίζει τη μονοδιάστατη κλίμακα, στην οποία ποσοτικοποιούνται οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων σε κάθε επίπεδο ιεραρχίας. Επομένως, τα στοιχεία κάθε επιπέδου συγκρίνονται μεταξύ τους ανά ζεύγη, με κριτήριο τη συμβολή τους στην επίτευξη ενός καθορισμένου στόχου, συγκεκριμένα στη μελέτη αυτή τη χάραξη μεταξύ των περιοχών μελέτης. Τα τρία επιμέρους στάδια τα οποία συγκροτούν τη συγκεκριμένη ενέργεια είναι τα εξής:

- ανάπτυξη ενός συγκριτικού πίνακα για κάθε επίπεδο της ιεραρχίας, ξεκινώντας από την κορυφή προς τα κάτω
- υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας για κάθε στοιχείο της ιεραρχίας
- εκτίμηση του δείκτη συνέπειας (consistency index)

Αναλυτικότερα, εφόσον πραγματοποιηθεί η δημιουργία ιεραρχικού μοντέλου της μελέτης, δηλαδή τίθενται σε προτεραιότητα οι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τη χάραξη του αγωγού, στη συνέχεια κατασκευάζεται όπως προαναφέρθηκε ένας συγκριτικός πίνακας κριτηρίων. Σκόπιμο να αναφερθεί ότι για την επίτευξη της σύγκρισης κάθε ζεύγους κριτηρίων αξιοποιείται η εξής κλίμακα αξιολόγησης:

1 → εξίσου σημαντικό → οι δύο παράγοντες έχουν την ίδια σημασία

3 → ελάχιστα σημαντικό → με εμπειρία και κρίση ευνοείται ο ένας παράγοντας συγκριτικά με τον άλλο

5 → πολύ σημαντικό → ο ένας παράγοντας είναι πολύ πιο σημαντικός από τον άλλο

7 → προφανές σημαντικό → η κυριαρχία του παράγοντα αποδεικνύεται στην πράξη

9 → απόλυτα σημαντικό → ο ένας παράγοντας είναι απόλυτα σημαντικότερος από τον άλλο

2,4,6,8 → ενδιάμεση τιμή → όταν απαιτείται συμβιβασμός μεταξύ της υπερίσχυσης των δύο παραγόντων

Το επόμενο βήμα της μεθοδολογίας είναι ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας. Για τη διαδικασία αυτή ακολουθούνται τα εξής :

A) Ομαλοποίηση κάθε στήλης του πίνακα κριτηρίων

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad i,j=1,2,\dots,n \quad (4.1)$$

B) Άθροισμα γραμμών του πίνακα κριτηρίων

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad i,j=1,2,\dots,n \quad (4.2)$$

Γ) Υπολογισμός βαρών του διανύσματος $\bar{w} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{w}_3]^T$

$$W_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \quad i,j=1,2,\dots,n \quad (4.3)$$

Δ) Υπολογισμός της μέγιστης ιδιοτιμής του πίνακα κριτηρίων (λ_{\max})

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n \cdot W_i} \quad (4.4)$$

όπου, $n \rightarrow$ στήλες του πίνακα σύγκρισης (πίνακας A)

$(AW)_i \rightarrow$ ο συντελεστής στη θέση i του διανύσματος $A\bar{W}$

- ❖ Τα στοιχεία a αποτελούν δεδομένα από τον πίνακα σύγκρισης κριτηρίων κάθε επίπεδου ιεραρχίας.
- ❖ Οι υπολογισμοί αυτοί είναι δυνατό να προσδιοριστούν μέσω της υπολογιστικής αριθμομηχανής του εργαλείου στο διαδίκτυο (AHP calculator)

Τελευταίο στάδιο αποτελεί η εκτίμηση του δείκτη συνέπειας του πίνακα κριτηρίων για κάθε επίπεδο ιεραρχίας. Για την εκτίμηση αυτή χρησιμοποιείται ο συντελεστής CR, ο οποίος προσδιορίζεται :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.5)$$

Όπου, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, $n \rightarrow$ στήλες του πίνακα σύγκρισης (πίνακας A)

$\lambda_{\max} \rightarrow$ μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα κριτηρίων

Και RI τυχαίος σταθερός δείκτης, ο οποίος προκύπτει σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα :

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0.0	0.0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

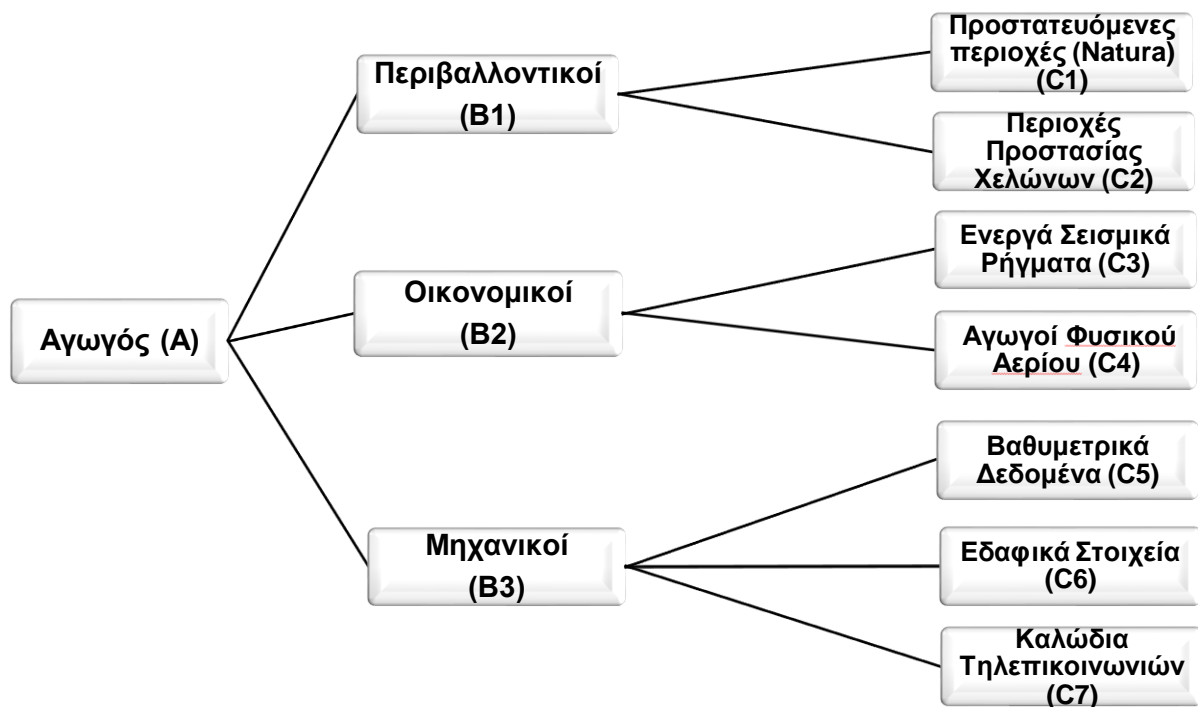
Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι :

- Όταν ο δείκτης συνέπειας $CR < 0.1$ τότε έχουμε λογική συνοχή του πίνακα κριτηρίων, άρα η μέγιστη ιδιοτιμή και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διανύσματα βάρους
- Όταν ο δείκτης συνέπειας $CR > 0.1$ τότε πρέπει να τροποποιηθεί ο πίνακας κριτηρίων. Η 1η και 2η σειρά του πίνακα είναι πάντα συνεπής άρα $CR=0$

Συλλογή Δεδομένων - Εφαρμογή Μεθοδολογίας AHP

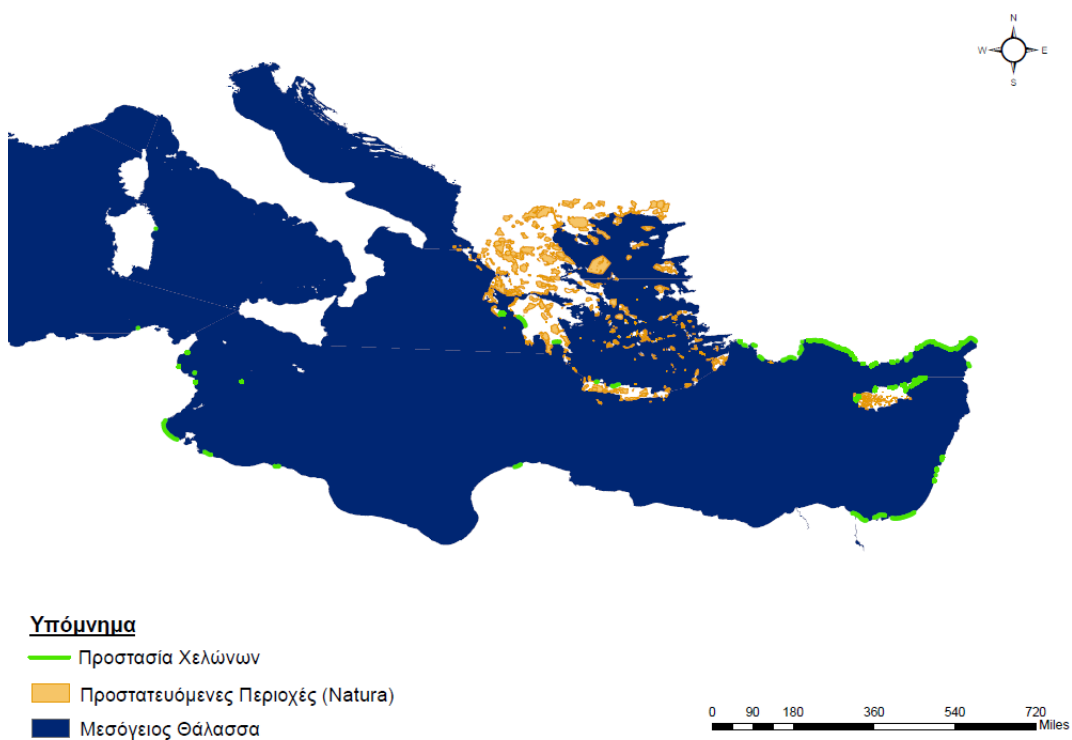
Πρωταρχικό μέλημα για την υλοποίηση της μεθοδολογίας είναι η ανεύρεση και συλλογή των δεδομένων που θα αποτελέσουν τους καθοριστικούς παράγοντες επιρροής της προκείμενης χάραξης του υποθαλάσσιου αγωγού. Συγκεκριμένα, οι παράγοντες αναζητήθηκαν με κριτήρια περιβαλλοντικά, οικονομικά και μηχανικά. Για τη συγκεκριμένη μελέτη περιβαλλοντικοί παράγοντες θεωρήθηκαν οι προστατευόμενες περιοχές (Natura) στην Ελλάδα και την Κύπρο και οι περιοχές προστασίας χελωνών. Στη συνέχεια, καταλυτικό ρόλο στην οικονομία του έργου διαδραματίζουν τα ενεργά σεισμικά ρήγματα καθώς και οι προϋπάρχοντες αγωγοί φυσικού αερίου και τέλος ως μηχανικά κριτήρια θεωρήθηκαν τα βαθυμετρικά δεδομένα της Μεσογείου Θάλασσας, στην οποία θα πραγματοποιηθεί η χάραξη του υποθαλάσσιου αγωγού, τα εδαφικά στοιχεία τα οποία πρέπει να αποφεύγονται εφόσον πρόκειται για υποθαλάσσια μελέτη και τέλος τα υπάρχοντα υποθαλάσσια καλώδια τηλεπικοινωνιών που συναντώνται στη Μεσόγειο Θάλασσα.

Το ιεραρχικό μοντέλο με δεδομένα τα παραπάνω διαμορφώνεται όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, δίνοντας προτεραιότητα στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, κατόπιν στους οικονομικούς και τέλος στους μηχανικούς.

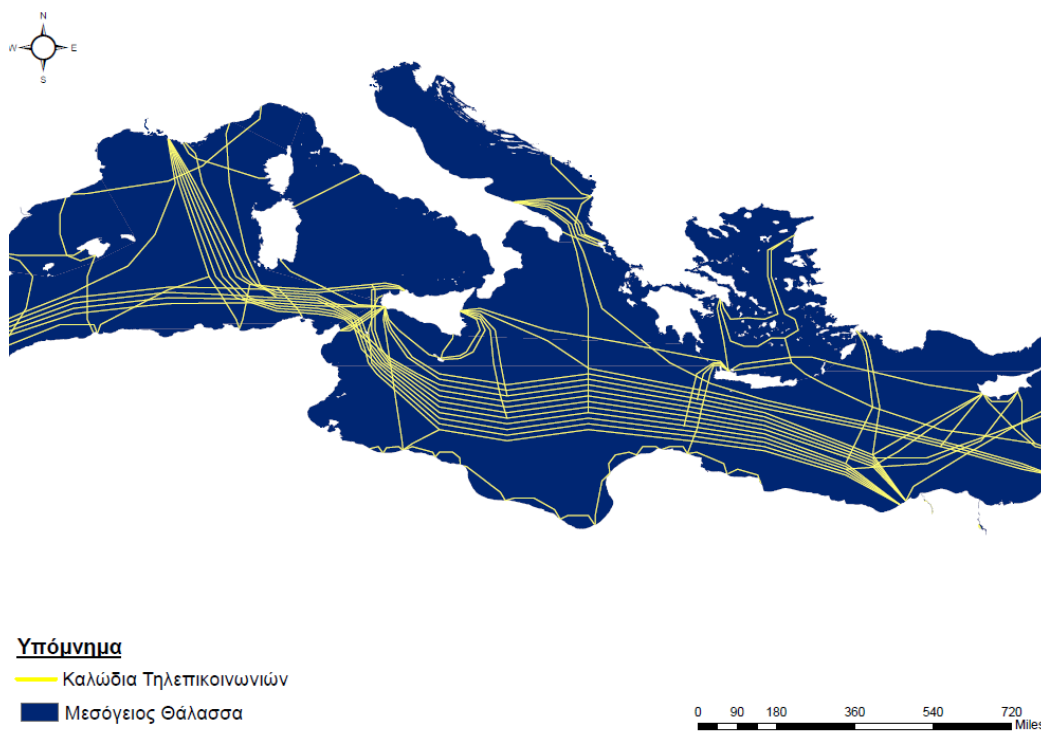


Σχήμα 4.1:: Απεικόνιση ιεραρχικού μοντέλου επιλογής διαδρομής υποθαλάσσιου αγωγού

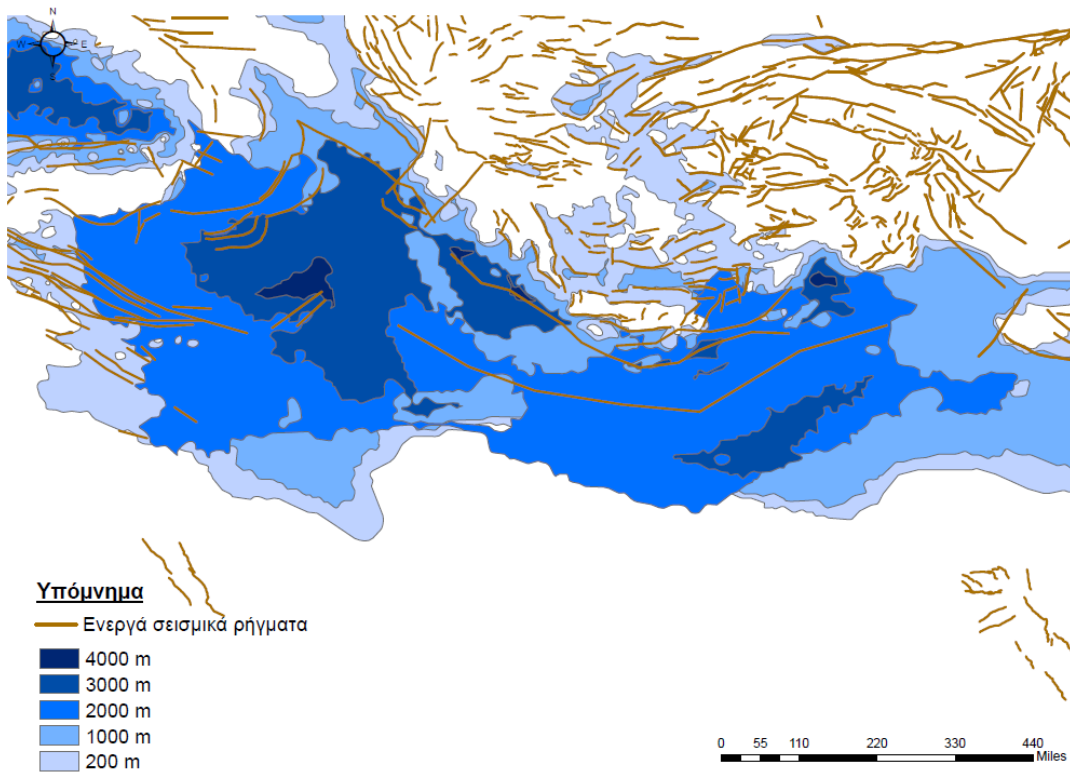
Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι χάρτες στους οποίους απεικονίζονται τα δεδομένα επιρροής, οι οποίοι διαμορφώθηκαν εντός του περιβάλλοντος του ArcMap.



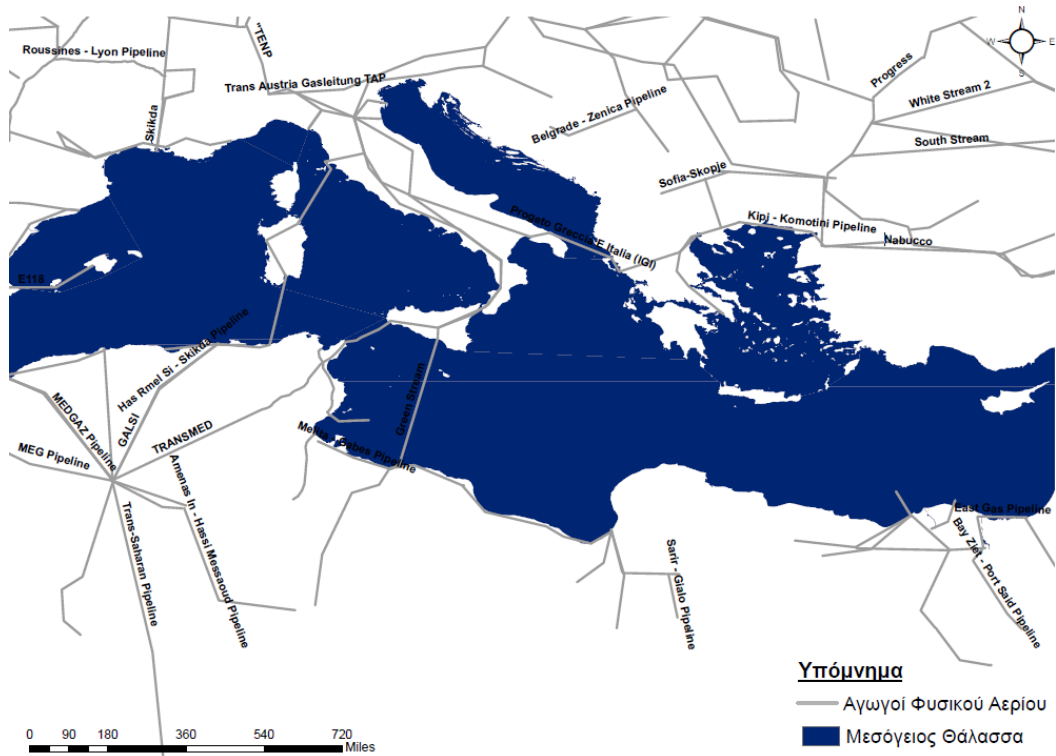
Εικόνα 4.2: Χάρτης Natura και περιοχών προστασίας χελωνών



Εικόνα 4.3: Χάρτης καλωδίων τηλεπικοινωνιών



Εικόνα 4.4: Χάρτης βαθυμετρικών δεδομένων Μεσογείου θάλασσας-Ενεργά σεισμικά ρήγματα



Εικόνα 4.5: Χάρτης αγωγών φυσικού αερίου

Το επόμενο βήμα της μεθοδολογίας είναι η ανάπτυξη των συγκριτικών πινάκων για κάθε επίπεδο ιεραρχίας σύμφωνα με την κλίμακα που αναφέρθηκε παραπάνω καθώς επίσης και ο προσδιορισμός των αντίστοιχων βαρών. Συνεπώς, προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας κριτηρίων για τα επίπεδα Β ως προς Α

A	B1	B2	B3
B1	1	3	5
B2	1/3	1	3
B3	1/5	1/3	1

Σύμφωνα με υπολογισμούς προέκυψαν τα εξής :

- $\lambda_{\max} = 3.04$
- $RI = 0.58 \Rightarrow CR = \frac{CI}{RI} = 0.03 < 0.1 \rightarrow$ λογική συνοχή
- $CI = 0.02$

Το ζητούμενο διάνυσμα βαρών:

- $W_i = [0.636982, 0.25829, 0.104729]^T$

Πίνακας κριτηρίων για τα επίπεδα Β1 ως προς C

B1	C1	C2
C1	1	5
C2	1/5	1

Σύμφωνα με υπολογισμούς προέκυψαν τα εξής :

- $\lambda_{\max} = 2.00$
- $RI = 0.00 \Rightarrow CR = \frac{CI}{RI} = 0.00 < 0.1 \rightarrow$ λογική συνοχή
- $CI = 0.00$

Το ζητούμενο διάνυσμα βαρών:

- $W_i = [0.833333, 0.166667]^T$

Πίνακας κριτηρίων για τα επίπεδα B2 ως προς C

B2	C3	C4
C3	1	5
C4	1/5	1

Σύμφωνα με υπολογισμούς προέκυψαν τα εξής :

- $\lambda_{\max} = 2.00$
- $RI = 0.00 \Rightarrow CR = \frac{CI}{RI} = 0.00 < 0.1 \rightarrow$ λογική συνοχή
- $CI = 0.00$

Το ζητούμενο διάνυσμα βαρών:

- $W_i = [0.75, 0.25]^T$

Πίνακας κριτηρίων για τα επίπεδα B3 ως προς C

B3	C5	C6	C7
C5	1	3	5
C6	1/3	1	3
C7	1/5	1/3	1

Σύμφωνα με υπολογισμούς προέκυψαν τα εξής :

- $\lambda_{\max} = 3.04$
- $RI = 0.58 \Rightarrow CR = \frac{CI}{RI} = 0.03 < 0.1 \rightarrow$ λογική συνοχή
- $CI = 0.02$

Το ζητούμενο διάνυσμα βαρών:

- $W_i = [0.636982, 0.25829, 0.104729]^T$

Πίνακας κριτηρίων για τα επίπεδα C ως προς A

Συνεπώς, προκύπτει ο συνολικός πίνακας βαρών, τα οποία θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια στο λογισμικό ArcMap.

	B1 0.636982	B2 0.25829	B3 0.104729	Βάρη C ως προς A
C1	0.833333	0	0	0.5308
C2	0.166667	0	0	0.1062
C3	0	0.75	0	0.1937
C4	0	0.25	0	0.0646
C5	0	0	0.636982	0.0667
C6	0	0	0.25829	0.0271
C7	0	0	0.104729	0.0110

Επίσης, ο δείκτης συνέπειας για τον συνολικό πίνακα βαρών προκύπτει :

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.04 < 0.1 \rightarrow \text{λογική συνοχή πίνακα}$$

Όπου,

$$RI = \sum_{i=1}^3 Bi(RI)i = 0.06074$$

$$CI = \sum_{i=1}^3 Bi(CI)i = 0.0243$$

Εφαρμογή Μεθοδολογίας στο ArcMap

Αρχικά, εφόσον εισήχθησαν όλα τα παραπάνω δεδομένα επιρροής στο λογισμικό, διαπιστώθηκε η διαφοροποίηση τους ως προς το σύστημα αναφοράς. Η αναγωγή τους σε ένα κοινό σύστημα, συγκεκριμένα το WGS'84, είναι αρκετά σημαντική και γι' αυτό το λόγο υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου project. Εξίσου σημαντική είναι η εισαγωγή των σημείων προέλευσης και προορισμού της προκειμένης χάραξης.

Επομένως, μέσω του catalog window και του editor, τοποθετήθηκαν επακριβώς τα σημεία στους οικισμούς Ζύγι (Κύπρος) και Γούδουρα (Κρήτη).

Επιπλέον, προκειμένου να προκύψουν ψηφιδωτά αρχεία δεδομένων (raster) προσδιορίστηκε η ευκλείδεια απόσταση, εισάγοντας στο εργαλείο Euclidean Distance την κάθε γεωμετρική οντότητα των παραγόντων επιρροής (προστατευόμενες περιοχές (natura), προστασία χελωνών, ενεργά σεισμικά ρήγματα κ.λπ.). Ειδικότερα, από το κέντρο του κάθε δεδομένου δημιουργούνται αποστάσεις, οι οποίες αυξάνονται όσο απομακρύνονται από αυτό. Ωστόσο, όσον αφορά τα βαθυμετρικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο slope, το οποίο εξάγει ένα εύρος διαστημάτων από την πιο απότομη έως την πιο ήπια κλίση.

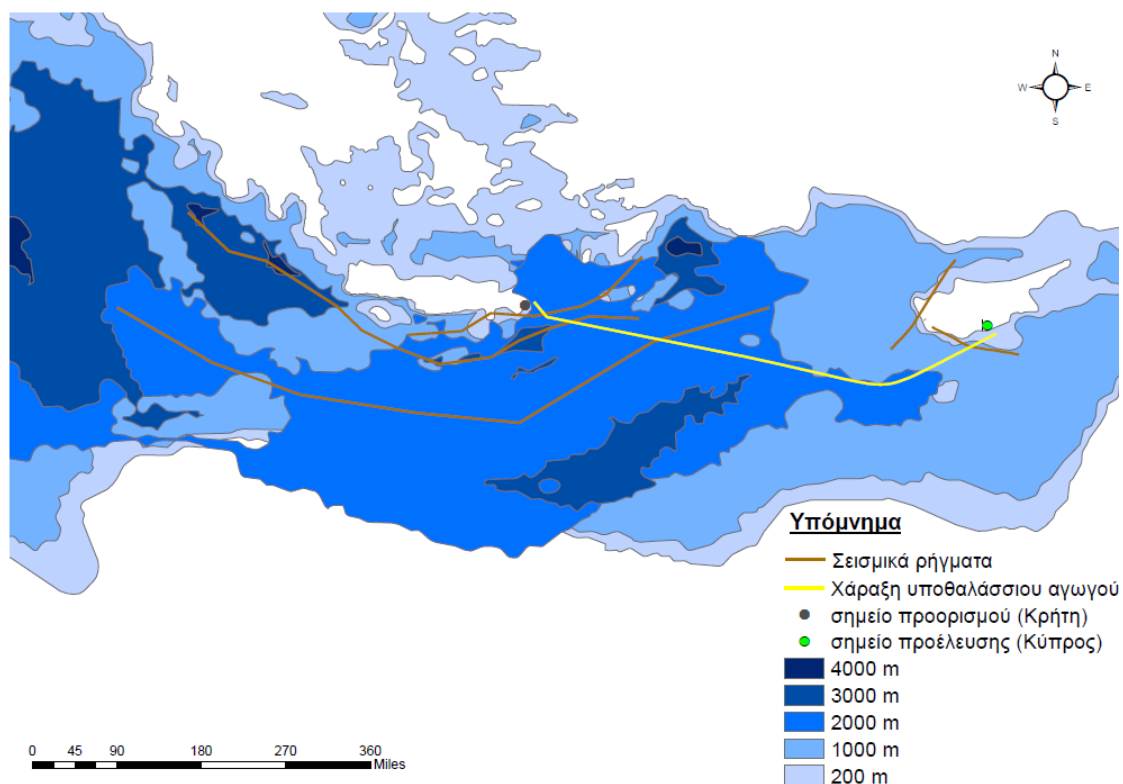
Το επόμενο βήμα είναι η αναταξινόμηση των δεδομένων με χρήση του εργαλείου Reclassify. Η αναταξινόμηση αλλάζει ένα εύρος τιμών σε στατιστικές τιμές σε συγκεκριμένο εύρος ακεραίων. Καθορίστηκε συνεπώς, μια κοινή κλίμακα από το 1 (προτιμότερη) έως 9 (λιγότερο προτιμότερη) για τη βαθμολόγηση κάθε διαστήματος, τα οποία προέκυψαν από τις εξαγόμενες ευκλείδειες αποστάσεις καθώς και από το εργαλείο κλίσης των βαθυμετρικών δεδομένων. Συνεπώς, οι υψηλότερες ακέραιες τιμές αντιστοιχούν σε υψηλότερο κόστος κατασκευής ενώ οι χαμηλότερες σε χαμηλότερο κόστος αντίστοιχα. Επομένως, οι ακέραιοι αριθμοί αντιστοιχίζονται σύμφωνα με το επίπεδο του προτιμώμενου κόστους κατασκευής. Άρα, για την περίπτωση των βαθυμετρικών δεδομένων, το 1 αντιστοιχεί σε πιο επίπεδη κλίση ενώ το 9 αντίστοιχα σε πιο απότομη. Για τα υπόλοιπα δεδομένα, το 1 αποδόθηκε στις πιο μακρινές αποστάσεις από κάθε περίπτωση και το 9 στις πλησιέστερες.

Στη συνέχεια, στο στάδιο αυτό αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα βαρών που προέκυψαν από τη μεθοδολογία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP). Ειδικότερα, σύμφωνα με τη μέθοδο όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό που αποδίδεται σε κάθε παράγοντα, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή του στο τελικό αποτέλεσμα. Σημαντικό στοιχείο για τη διαδικασία αυτή είναι ότι τα συνολικά ποσοστά βαρών πρέπει να ανέρχονται στο 100%. Επιπρόσθετα, η υλοποίηση της πραγματοποιήθηκε με χρήση του εργαλείου Raster Calculator, εισάγοντας τα δεδομένα της αναταξινόμησης πολλαπλασιασμένα με τα αντίστοιχα βάρη.

Μετά τη διαμόρφωση της συσσωρευμένης επιφάνειας κόστους, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Cost Distance, με σκοπό τη δημιουργία μιας επιφάνειας κόστους και μιας

επιφάνειας κατεύθυνσης. Η τελευταία χρησιμοποιείται για να καθοδηγήσει τη διαδρομή του αγωγού προς τον προορισμό. Τα δεδομένα που εισάγονται στο εργαλείο αυτό είναι το σημείο προέλευσης της χάραξης καθώς επίσης και το εξαγόμενο αποτέλεσμα (συσσωρευμένη επιφάνεια κόστους) του εργαλείου Raster Calculator. Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Cost Path με σκοπό την εξαγωγή της επιθυμητής χάραξης. Ως δεδομένα εισόδου του εργαλείου θεωρούνται το σημείο προορισμού της χάραξης, όπως επίσης και τα εξαγόμενα αποτελέσματα του εργαλείου Cost distance, δηλαδή η επιφάνεια κατεύθυνσης και η επιφάνεια κόστους.

Από τα παραπάνω, διαμορφώνεται η τελική χάραξη του υποθαλάσσιου αγωγού σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, μεταξύ της Κύπρου και της Κρήτης. Ωστόσο, με σκοπό την ευδιάκριτη εικόνα της χρησιμοποιήθηκαν ακόμη δύο εργαλεία εντός του λογισμικού, το Raster to polyline και το smooth line. Το πρώτο εξ αυτών μετέτρεψε το ψηφιδωτό αρχείο (raster) που προέκυψε από το εργαλείο Cost Path, σε γραμμική οντότητα, ενώ το δεύτερο οδήγησε στην εξομάλυνση των άκρων της γραμμής. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, απεικονίζοντας επίσης το σημαντικότερο παράγοντα της συγκεκριμένης μελέτης, τους γεωκινδύνους που εμπλέκονται στη συγκεκριμένη χάραξη.



Εικόνα 4.6: Χάρτης χάραξης υποθαλάσσιου αγωγού- μεθοδολογία AHP

Ωστόσο, η συγκεκριμένη μελέτη δύναται να εστιάσει στην επιρροή των γεωκινδύνων, συγκεκριμένα των σεισμικών ρηγμάτων, ανεξάρτητα από οποιοδήποτε άλλον παράγοντα, με στόχο τη χάραξη των υποθαλάσσιων αγωγών. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε αναγκαία η διαμόρφωση επιπλέον προκαταρκτικών χαράξεων, ακολουθώντας μια ελαφρώς τροποποιημένη μεθοδολογία, η οποία ασχολείται μόνο με τα ρήγματα. Η διαδικασία αυτή αναλύεται στην μετέπειτα υποενότητα.

4.2.2. Προκαταρκτικές Χαράξεις με Κριτήριο την Αποφυγή Γεωκινδύνων

Η ανάγκη διαμόρφωσης επιπλέον προκαταρκτικών χαράξεων εστιάζοντας μόνο στην αποφυγή γεωκινδύνων συνέβαλε στην ανάλυση μιας μεθοδολογίας η οποία εξετάζει διάφορες δοκιμές για την επιρροή του κάθε γεωκινδύνου ξεχωριστά. Οι γεωκίνδυνοι που πρόκειται να μελετηθούν αφορούν σεισμικά ρήγματα τα οποία λαμβάνουν χώρα στη Μεσόγειο θάλασσα. Συγκεκριμένα, τα ρήγματα αυτά είναι ο East Mediterranean, ο Hellenic και ο Cretan που βρίσκονται κοντά στην Κρήτη, όπως επίσης και δύο ρήγματα τα οποία βρίσκονται το ένα δυτικά και το άλλο νότια της Κύπρου. Χάριν συντομίας το πρώτο θα ονομαστεί ως Cy_1 και το δεύτερο ως Cy_2 .

Για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας αυτής ακολουθήθηκαν αρχικά ορισμένα ίδια βήματα με την προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, ανάχθηκαν τα δεδομένα σε κοινό σύστημα αναφοράς το WGS'84, προσδιορίστηκαν μετέπειτα οι ευκλείδειες αποστάσεις από το κέντρο του κάθε ρήματος ξεχωριστά και στη συνέχεια έγινε αναταξινόμηση με βάση τα αρχεία των ευκλείδειων αποστάσεων. Όσον αφορά την κλίμακα της αναταξινόμησης το 1 αποδόθηκε στις πιο μακρινές αποστάσεις, εφόσον είναι προτιμότερη η αποφυγή των γεωκινδύνων, ενώ το 9 αποδόθηκε στις πλησιέστερες αποστάσεις στα ρήγματα.

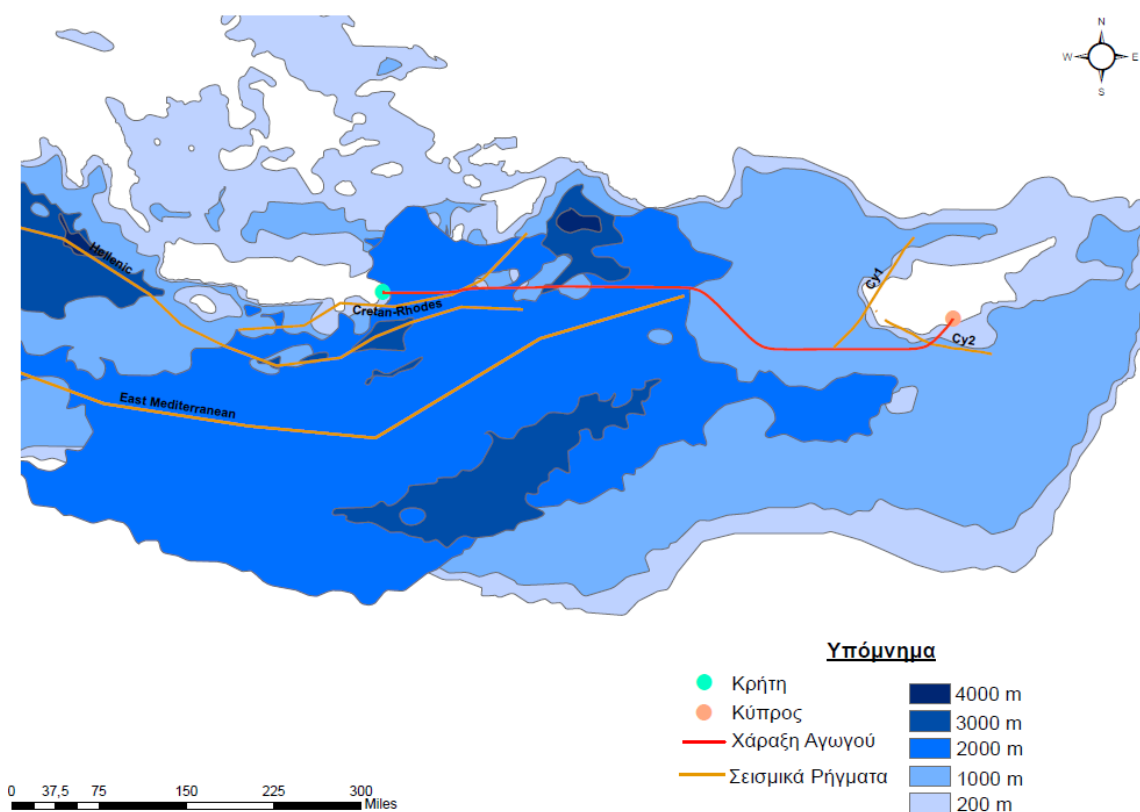
Στη συνέχεια, παρατηρήθηκαν επικαλύψεις μεταξύ των προηγούμενων αποτελεσμάτων, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα και δυσκολία επίτευξης του ζητούμενου αποτελέσματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα εργαλεία εντός του λογισμικού, εφόσον κρίθηκε αναγκαίο να σβηστούν τα επικαλυπτόμενα δεδομένα από κάθε επίπεδο. Ειδικότερα, μετατράπηκαν τα δεδομένα της αναταξινόμησης από ψηφιδωτά αρχεία (raster) σε πολυγωνικές οντότητες, με χρήση του εργαλείου Raster to Polygon, με σκοπό την μετέπειτα εισαγωγή τους στο εργαλείο

Erase μέσω του οποίου σβήστηκαν σε κάθε περίπτωση τα επικαλυπτόμενα τμήματα. Να τονιστεί ότι, η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε και για την επικάλυψη των αντίστοιχων αποτελεσμάτων με τη Μεσόγειο θάλασσα. Στο σημείο αυτό δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στα τμήματα που βρίσκονται εντός ξηράς τα οποία διαγράφηκαν, εφόσον η ζητούμενη χάραξη είναι υποθαλάσσια.

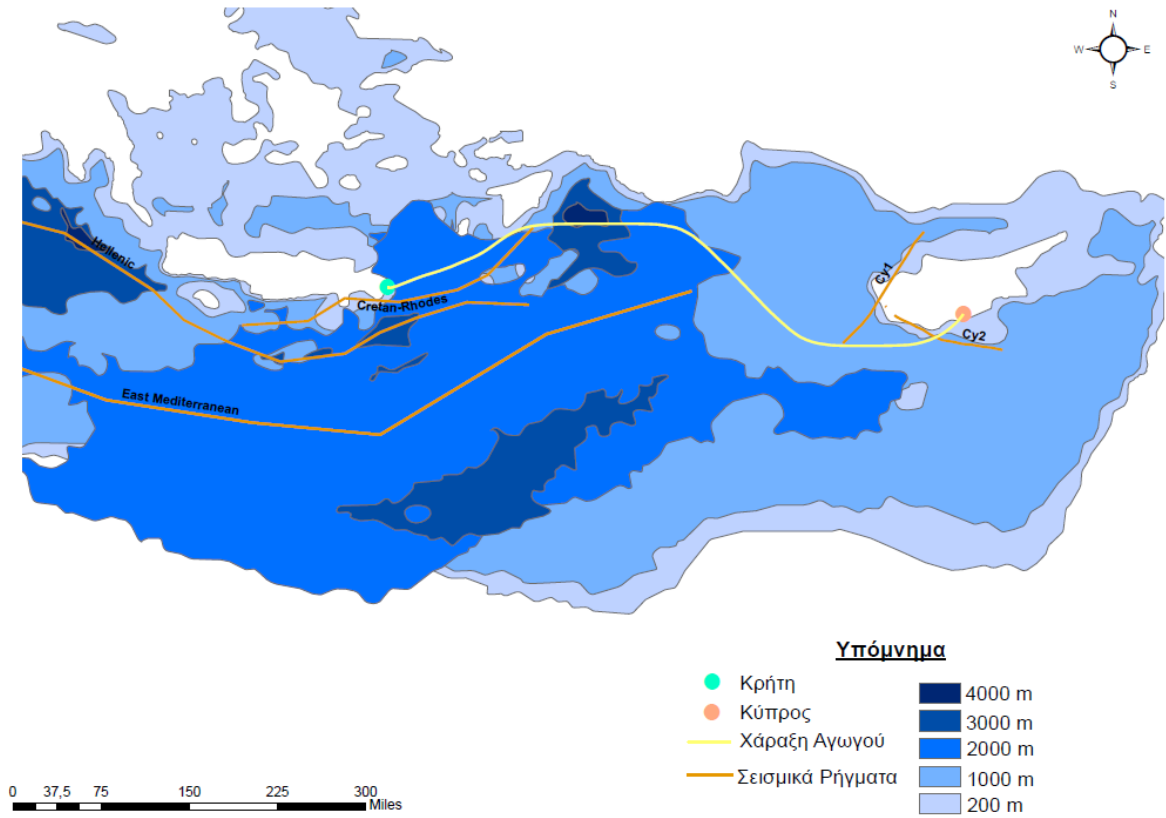
Ακολούθως, δημιουργήθηκε ένα ενοποιημένο αρχείο των πολυγώνων των γεωκινδύνων, της Μεσογείου θάλασσας και των τμημάτων ξηράς, με χρήση του εργαλείου Union, το οποίο κατόπιν μετατράπηκε από πολυγωνική οντότητα σε ψηφιδωτό αρχείο (raster) με το εργαλείο Polygon to Raster. Η εξαγωγή του αρχείου αυτού συμβάλλει στο διαχωρισμό του κάθε στοιχείου αποφυγής της χάραξης σε ένα ξεχωριστό επίπεδο. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια του σημειώθηκαν οι αριθμοί που αντιστοιχούν σε κάθε γεωκίνδυνο καθώς και των τμημάτων ξηράς.

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή του ενοποιημένου αρχείου στο εργαλείο Weighted overlay, μέσω του οποίου καθορίστηκε το βάρος των προς αποφυγήν χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε μια κλίμακα από το 1 έως το 9, όπου ο μεγαλύτερος αριθμός 9 υποδηλώνει μεγαλύτερη βαρύτητα του χαρακτηριστικού ως προς την αποφυγή του, ενώ καθώς μειώνονται οι τιμές έως το 1, υποδηλώνεται η λιγότερο σημαντική επιρροή του χαρακτηριστικού αυτού. Στο σημείο αυτό έγιναν τρεις διαφορετικές δοκιμές, τροποποιώντας σε κάθε περίπτωση τα βάρη αυτά με σκοπό την εξαγωγή τριών διαφορετικών προκαταρκτικών χαράξεων. Αναλυτικότερα, για την πρώτη δοκιμή δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στο ρήγμα Cy₁ καθώς και στα τμήματα ξηράς στα οποία αποδόθηκε η τιμή 9. Στη συνέχεια εξίσου σημαντικός θεωρήθηκε ο East Mediterranean αποδίδοντας του την τιμή 8 και ακολούθως ο Hellenic με την τιμή 7. Λιγότερη σπουδαιότητα για την αποφυγή τους δόθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση στον Cretan και στον Cy₂, στους οποίους αντιστοιχήθηκε η τιμή 1. Για τη δεύτερη δοκιμή ομοίως αποδόθηκε η τιμή 9 στον Cy₁ και στα τμήματα ξηράς. Οι αμέσως επόμενοι αρκετά σημαντικοί προς αποφυγήν γεωκίνδυνοι θεωρήθηκαν ο Cretan, ο Hellenic και ο Cy₂ στους οποίους τοποθετήθηκαν οι τιμές 8, 7 και 6 αντίστοιχα. Σε αντίθετη περίπτωση ο East Mediterranean θεωρήθηκε λιγότερο σημαντικός αντιστοιχίζοντας τον με κλίμακα 1. Η τελευταία δοκιμή έθεσε στην κορυφή προτεραιότητας τα τμήματα ξηράς και τον Hellenic εισάγοντας στο εργαλείο τις τιμές 9 και 8 αντίστοιχα, ενώ όλες οι υπόλοιπες κλίμακες θεωρήθηκαν ίσες με τη μονάδα.

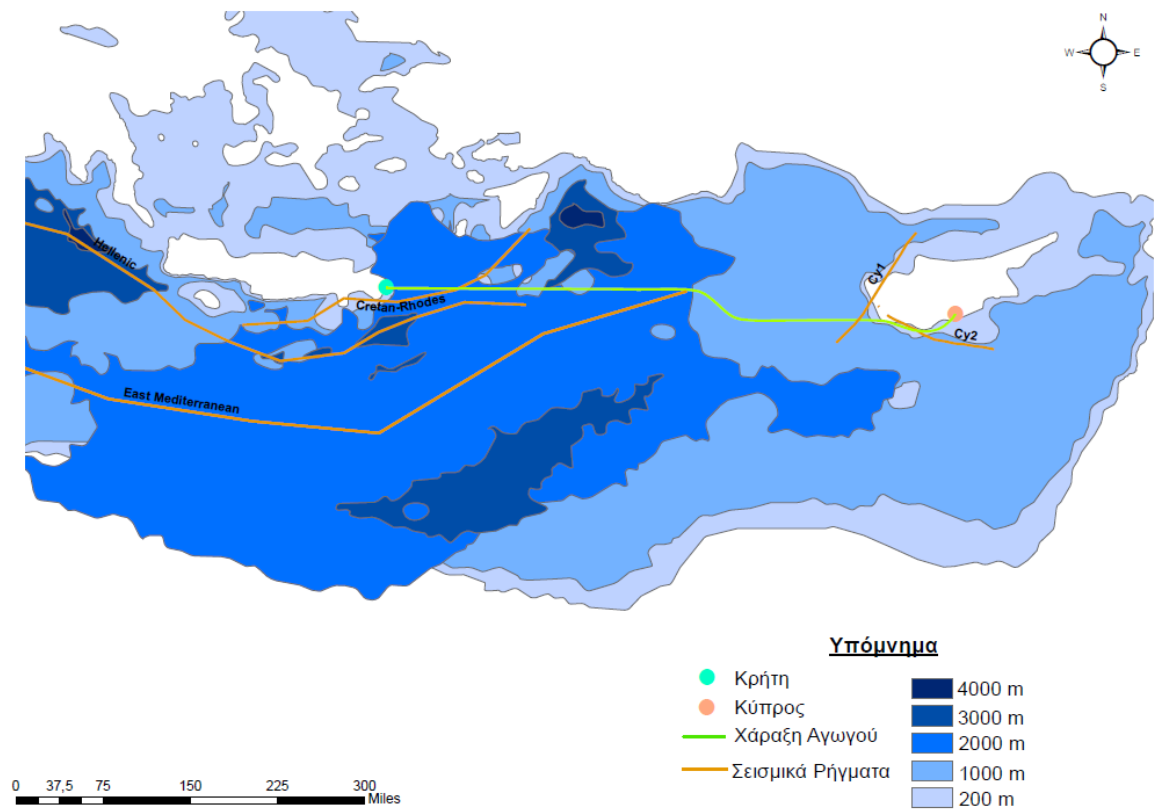
Επιπροσθέτως, για την υλοποίηση της χάραξης αξιοποιήθηκαν τα δύο προαναφερόμενα εργαλεία στην προηγούμενη ενότητα, το Cost Distance και το Cost Path. Αρχικά, το Cost Distance με δεδομένα εισόδου το σημείο προέλευσης και το εξαγόμενο αρχείο του εργαλείου Weighted Overlay κάθε περίπτωση συνέβαλε στη δημιουργία μιας επιφάνειας κόστους και μιας επιφάνειας κατεύθυνσης. Οι οποίες στη συνέχεια αξιοποιήθηκαν στο εργαλείο Cost Path, μαζί με το σημείο προορισμού, ώστε να εξαχθεί για κάθε περίπτωση η ζητούμενη χάραξη του υποθαλάσσιου αγωγού. Ωστόσο, με σκοπό την ευδιάκριτη εικόνα της χρησιμοποιήθηκαν ακόμη δύο εργαλεία εντός του λογισμικού, το Raster to polyline και το smooth line. Το πρώτο εξ αυτών μετέτρεψε το ψηφιδωτό αρχείο (raster) που προέκυψε από το εργαλείο Cost Path, σε γραμμική οντότητα, ενώ το δεύτερο οδήγησε στην εξομάλυνση των άκρων της γραμμής. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



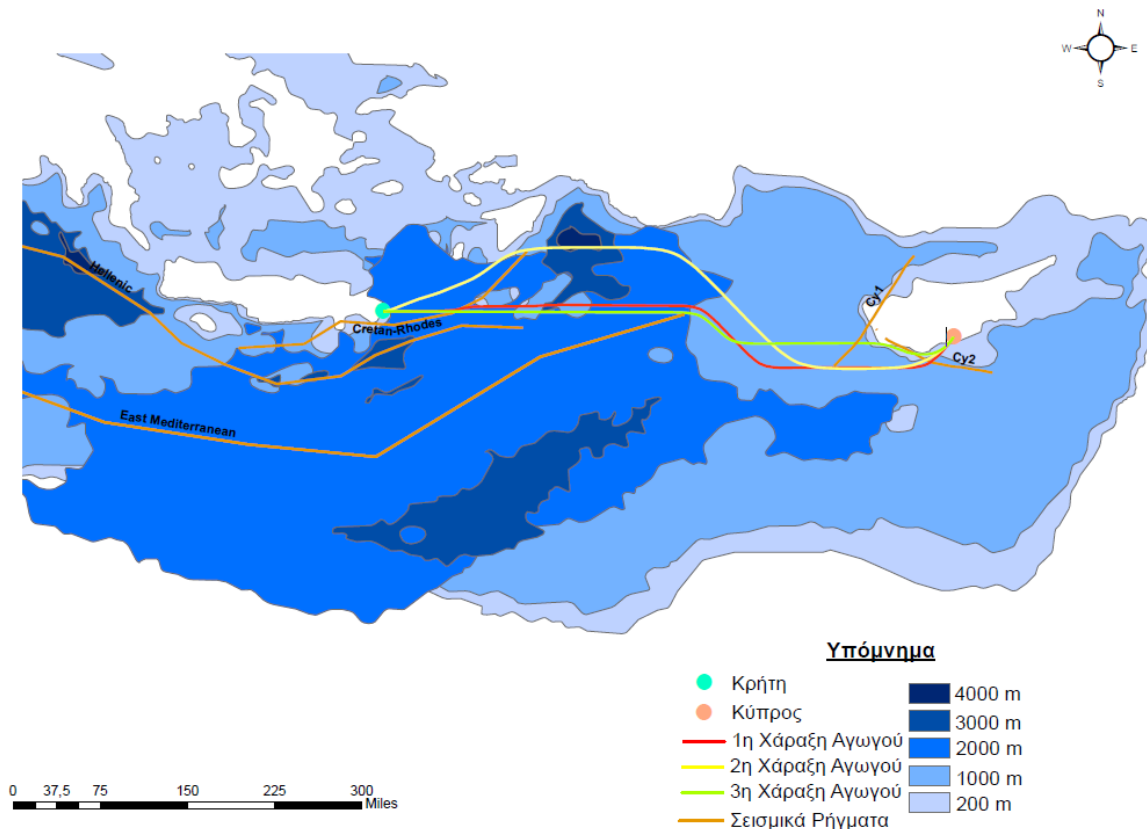
Εικόνα 4.7: Χάρτης πρώτης χάραξης υποθαλάσσιου αγωγού για την αποφυγή γεωκινδύνων



Εικόνα 4.8: Χάρτης δεύτερης χάραξης υποθαλάσσιου αγωγού για την αποφυγή γεωκινδύνων



Εικόνα 4.9: Χάρτης τρίτης χάραξης υποθαλάσσιου αγωγού για την αποφυγή γεωκινδύνων



Εικόνα 4.10: Χάρτης συνολικών χαράξεων υποθαλάσσιου αγωγού για την αποφυγή γεωκινδύνων

Σύμφωνα με τους παραπάνω χάρτες διαπιστώθηκε ότι τα κριτήρια κλίμακας που ορίστηκαν σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκαν πλήρως. Επομένως, στην πρώτη χάραξη ο αγωγός αποφεύγει ένα μεγάλο μέρος των ρηγμάτων, συγκεκριμένα τα τρία από τα πέντε ρήγματα. Στη δεύτερη χάραξη ο αγωγός αποφεύγει όλα τα ρήγματα εκτός του Cy₂, το οποίο για να το αποφύγει θα έπρεπε να διασχίσει αρκετά μεγαλύτερη διαδρομή και επομένως θα αυξανόταν αρκετά το κόστους του. Τέλος, ως τρίτη χάραξη παρουσιάζεται μια συντομότερη διαδρομή, η οποία αποφεύγει δύο από τα συνολικά πέντε ρήγματα, ωστόσο μπορεί να είναι αρκετά οικονομικότερη λόγω του μικρότερου μήκους της.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, και στις τρεις περιπτώσεις χάραξης ο αγωγός διασχίζει κάποιο από τα μελετώμενα ρήγματα, για το λόγο αυτό θεωρήθηκε αναγκαίος ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων που υπόκεινται κατόπιν επαφής με τα αντίστοιχα ρήγματα, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι δυνατό να διαπεράσει ανάμεσα ή θα πρέπει να αποφευχθεί πλήρως. Αυτές οι διαδικασίες αναλύονται στα δύο επόμενα κεφάλαια.

5. Συνδυασμός της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα και Έλεγχος Διασταύρωσης Αγωγού με Πιθανό Γεωκίνδυνο

5.1. Εισαγωγή

Με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας αποφυγής των γεωκινδύνων της παρούσας μελέτης, για την προκείμενη χάραξη μεταξύ των δύο περιοχών, αναλύονται στην ενότητα αυτή σε βάθος, δύο δισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Τα προσομοιώματα της ιζηματογενούς στρώσης και του υποθαλάσσιου αγωγού, τα οποία εκτελούνται μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος ABAQUS. Το πρώτο εξ αυτών προσομοιώνει τη διάρρηξη του ρήγματος, όπου προκύπτει κατόπιν καταπονήσεως της ιζηματογενούς στρώσης από τον μελετώμενο γεωκίνδυνο, και κατά συνέπεια εξάγονται οι μετατοπίσεις της κατά την οριζόντια (U1) και κατακόρυφη διεύθυνση (U2). Ειδικότερα, η ιζηματογενής στρώση μελετήθηκε για διάφορες περιπτώσεις εδαφικών χαρακτηριστικών, τροποποιώντας το πάχος της (H), τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) καθώς και τη συνοχή του εδαφικού υλικού (c). Όσον αφορά στο δεύτερο προσομοίωμα διερευνάται η συμπεριφορά του αγωγού όταν διαπερνά το ρήγμα, συνεπώς με δεδομένες τις τρέχουσες μετατοπίσεις του πρώτου προσομοιώματος, εξάγει τις αντίστοιχες παραμορφώσεις του αγωγού (e11). Στη συνέχεια, για την ολοκληρωμένη εκτέλεση του προσομοιώματος αυτού κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός των εδαφικών ελατηρίων. Τέλος, εκτελέστηκαν συνολικά 109 αναλύσεις για κάθε περίπτωση προσομοιωμάτων, γεγονός που οδήγησε στην σκέψη για την ελαχιστοποίηση της διάρκειας εκτέλεσης τους καθώς και τον έλεγχο του μεγάλου όγκου δεδομένων. Για την αποφυγή υλοποίησης της προαναφερθείσας διαδικασίας χειροκίνητα, δημιουργήθηκαν κώδικες (scripts) σε γλώσσα προγραμματισμού Python, με σκοπό την αυτοματοποίηση της εισαγωγή στοιχείων στα αρχεία εισόδου του ABAQUS, την επεξεργασία τους καθώς και των διαδικασιών εντός του ABAQUS.

Το δεύτερο σκέλος της ενότητας αφορά την κατασκευή των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε με σκοπό την αξιοποίηση των δεδομένων που προέκυψαν από την ανάλυση των δύο προσομοιωμάτων. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται να δοθεί η δυνατότητα στο χρήστη να εξάγει εύκολα και άμεσα τις μετατοπίσεις της

ιζηματογενούς στρώσης και τις παραμορφώσεις του αγωγού για οποιοδήποτε περίπτωση χωρίς να είναι αναγκαία η επανάληψη της προηγούμενης χειροκίνητης διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι 109 αναλύσεις ως δεδομένα εκπαίδευσης του Νευρωνικού δικτύου, θεωρώντας ως δεδομένα εισόδου τα χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς στρώσης (H,φ,c) και ως δεδομένα στόχου τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων (μετατοπίσεις (U1,U2) και παραμορφώσεις αγωγού (e11)). Στη συνέχεια κατά την περάτωση της εκπαίδευσης, έγιναν ορισμένες τροποποιήσεις στα δείγματα εκπαίδευσης, στην αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου καθώς επίσης και στους αλγορίθμους εκπαίδευσης, εντός του λογισμικού MATLAB έτσι ώστε να επιλεγεί ο καταλληλότερος συνδυασμός δεδομένων που καταλήγει στο βέλτιστο αποτέλεσμα με το λιγότερο δυνατό σφάλμα.

Το τρίτο και τελευταίο σκέλος βασίζεται στον έλεγχο της επιτρεπόμενης ή μη διασταύρωσης του αγωγού με τον υπό μελέτη ανά περίπτωση γεωκίνδυνο. Συγκεκριμένα, μέσω του λογισμικού ArcMap τέθηκαν ως δεδομένα οι παραμορφώσεις που εξήχθησαν από την προαναφέρουσα διαδικασία, έτσι ώστε με δεδομένο επιτρεπόμενο όριο για τις παραμορφώσεις των αγωγών να ανέρχεται στο 0.5%, να παρθεί η απόφαση εάν ο γεωκίνδυνος θεωρείται επιτρεπτός ή όχι ώστε να διαπεραστεί από τον υποθαλάσσιο αγωγό.

5.2. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων – Ανάπτυξη Κώδικα (Python)

5.2.1. Περιγραφή Προσομοιώματος της Ιζηματογενούς Στρώσης

Για τη μελέτη αυτή υλοποιήθηκε αρχικά μια παραμετρική ανάλυση της διάρρηξης ενός ρήγματος στο ελεύθερο πεδίο πάνω στο οποίο βρίσκεται η ιζηματογενής στρώση. Σκοπός της ανάλυσης, είναι η μελέτη της σχέσης μεταξύ των ιζημάτων και του ρήγματος, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος ABAQUS. Συνεπώς, δημιουργήθηκε ένα προσομοίωμα, μέσω του λογισμικού, με ιζηματογενής στρώση 1000 m μήκους, η οποία διαθέτει 1000 ίσου μεγέθους στοιχεία τύπου CPE4 με 1m μήκος το καθένα. Όσον αφορά τη διάρρηξη του ρήγματος σημειώνεται στη μέση της ιζηματογενούς στρώσης, δηλαδή στα 500m. Επιπλέον, ορισμένα στοιχεία που σχετίζονται με το υλικό των ιζημάτων, το οποίο θεωρήθηκε ως

αργιλικό, είναι η πυκνότητα του υλικού $\rho=2 \text{ tn/m}^3$, το μέτρο ελαστικότητας $E_0=10000 \text{ MPa}$ και ο λόγος Poisson $\nu=0.3$. Επίσης, αρκετά σημαντικό να αναφερθεί ότι ο γεωκίνδυνος μελετήθηκε ως ένα ανάστροφο ρήγμα με γωνία διάρρηξης 60° και οι περιπτώσεις των εδαφικών χαρακτηριστικών για τις οποίες αναλύθηκε είναι οι εξής :

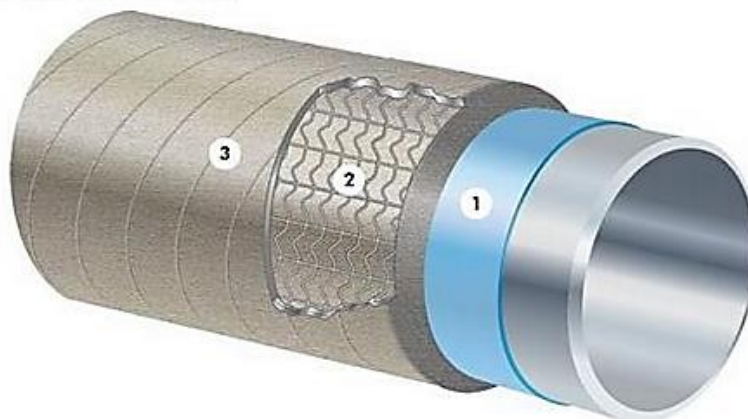
- **Πάχος ιζηματογενούς στρώσης H:** 30,45,60,105,120 και 135 m
- **Γωνία εσωτερικής τριβής φ :** $8^\circ, 16^\circ, 24^\circ, 32^\circ$ και 40°
- **Συνοχή εδαφικού υλικού c:** 15,35,55,75 και 95 kPa

Τα στοιχεία αυτά συμβάλλουν στη διαμόρφωση του κάθε αρχείου εισόδου ρήγματος για διαφορετικό H, φ και c , τα οποία εκτελούνται μέσω του ABAQUS. Οι αναλύσεις που δημιουργήθηκαν με τους παραπάνω συνδυασμούς ανέρχονται στις 150 συνολικά. Από τις αναλύσεις αυτές εξάγονται τα αποτελέσματα για τις μετατοπίσεις που προκαλούνται στην επιφάνεια της ιζηματογενούς στρώσης σε κάθε περίπτωση, κατά την οριζόντια (U1) και την κατακόρυφη (U2) διεύθυνση, λόγω της διάρρηξης του ρήγματος.

5.2.2. Περιγραφή Προσομοιώματος του Αγωγού

Εφόσον μελετήθηκε η διάρρηξη ανάστροφου ρήγματος για διάφορες τιμές εδαφικών χαρακτηριστικών, το δεύτερο εξίσου σημαντικό προσομοίωμα που δημιουργήθηκε για τη μελέτη αυτή είναι ένας τυπικός μεταλλικός υποθαλάσσιος αγωγός, με εξωτερική διάμετρο 0.6604 m και πάχος τοιχώματος 0.027 m. Πρόκειται, για έναν αγωγό κατασκευασμένο από χάλυβα, εξωτερικά επενδεδυμένο (outer wrap) με σκυρόδεμα (reinforced concrete) και ακόμη ένα λεπτότερο στρώμα επένδυσης για προστασία από τη διάβρωση (anti-corrosion coating) που υπόκεινται εξαιτίας του θαλασσινού υγρού στοιχείου. Στην παρακάτω εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι επενδύσεις αυτές ενός τυπικού υποθαλάσσιου αγωγού. Επιπλέον, το μήκος του αγωγού στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ίσο με 1000 m και η διασταύρωση του με το ρήγμα πραγματοποιείται στο μέσο του με γωνία 90° .

Concrete Weight Coating



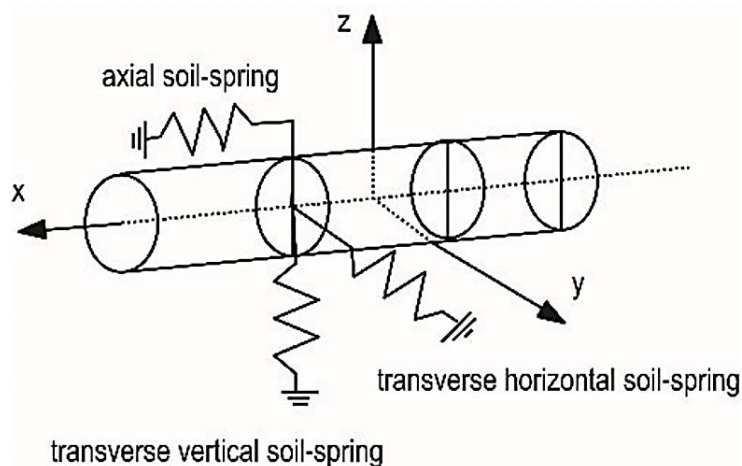
1. Anti-Corrosion Coating
2. Reinforced Concrete
3. Outer Wrap

Εικόνα 5.1: Απεικόνιση των εξωτερικών επενδύσεων ενός υποθαλάσσιου αγωγού
(Πηγή: www.offshore-energy.biz)

Ο αγωγός προσομοιώνεται αριθμητικά σε δύο διαστάσεις με πεπερασμένα στοιχεία δοκού, τα οποία θεωρούνται ένα αρκετά χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο, καθώς μπορούν να εκτιμήσουν τη συμπεριφορά του αγωγού. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων σε επιλεγμένες θέσεις τόσο κατά μήκος του αγωγού, όσο και επί της διατομής. Ακολούθως, τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης εδάφους και αγωγού προσομοιώνονται με μη-γραμμικά ελατήρια μετάθεσης σε δύο διευθύνσεις.

Πιο συγκεκριμένα, ο αγωγός διακριτοποιείται σε 1000 ίσου μήκους στοιχεία (elbow elements), 1m το καθένα. Επομένως, η τριβή μεταξύ του αγωγού και του εδάφους προσομοιώνεται με διαμήκη ελατήρια. Οι ιδιότητες των ελατηρίων εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της εδαφικής επίχωσης και των περιβλημάτων του αγωγού. Ταυτόχρονα, ένα ζεύγος κατακόρυφων ελατηρίων προσομοιώνει την κατακόρυφη κίνηση του αγωγού εντός του ορύγματος με τα χαρακτηριστικά τους να διαφέρουν σημαντικά. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι κάθε κόμβος του αγωγού συνδέεται με ελατήριο στην κάθετη, την οριζόντια και την εγκάρσια οριζόντια διεύθυνση, με αποτέλεσμα η μετακίνηση του ρήγματος να επιβάλλεται στον αγωγό στατικά με τη μετακίνηση των ελεύθερων άκρων των αντίστοιχων ελατηρίων σε κάθε περίπτωση. Εν κατακλείδι, θεωρήθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός των εδαφικών ελατηρίων, τα οποία αποτελούν σημαντικά δεδομένα για το προσομοίωμα του αγωγού, και παρουσιάζεται

αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού τους στην επόμενη ενότητα. Η προσομοίωση των εδαφικών ελατηρίων απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 5.2: Προσομοίωση εδάφους-αγωγού (Hideyuki O-tani et al.,2018)

Επιπρόσθετα, η μετακίνηση (Δy) που επιβάλλεται στον αγωγό μέσω των ελατηρίων στον κατακόρυφο άξονα είναι δύο φορές η ακτίνα του αγωγού, με δεδομένη τη γωνία διάρρηξης (δ) του ρήγματος ίση με 60° , άρα προκύπτει ότι:

$$\Delta y = 2 * D = 2 * 0.6604 \rightarrow \Delta y = 1.3208 \text{ m} \quad (5.1)$$

Ενώ η μετατόπιση κατά τον οριζόντιο άξονα είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη γωνία διάρρηξης (δ) του ρήγματος και προκύπτει:

$$\Delta x = \frac{\Delta y}{\tan(\delta)} = \frac{1.3208}{\tan(60)} \rightarrow \Delta x = 0.7626 \text{ m} \quad (5.2)$$

Τέλος, ο αγωγός διαθέτει σταθερή εσωτερική πίεση $P_i=11000 \text{ kPa}$, ενώ η εξωτερική του πίεση (HPE) εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από το βάθος της εξεταζόμενης περιοχής, άρα προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$HPE = 1025 \text{ kg/m}^3 \text{ (πυκνότητα θαλασσινού νερού)} * 9.81 \text{ m/s}^2 * \text{βάθος (m)} \quad (5.3)$$

5.2.3. Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Αγωγού και Εδαφικών Ελατηρίων

Για τον υπολογισμό των εδαφικών ελατηρίων αξιοποιήθηκε η θεωρία των O'Rourke & Liu. Η θεωρία αυτή αναφέρεται σε υποθαλάσσιους αγωγούς όπως είναι και ο αγωγός που επρόκειτο να σχεδιαστεί στην παρούσα μελέτη. Ωστόσο, εκτός από τη συγκεκριμένη θεωρία ο προσδιορισμός των ελατηρίων μπορεί να υλοποιηθεί και από τον διεθνή κανονισμό ALA. Η διαφορά του διεθνή κανονισμού είναι ότι αναφέρεται σε χερσαίους αντί για υποθαλάσσιους αγωγούς, οι οποίοι βρίσκονται θαμμένοι κάτω από την επιφάνεια εδάφους. Όμως, με περισσότερη ακρίβεια οι υποθαλάσσιοι αγωγοί με το πέρας των ετών καλύπτονται από το έδαφος σε συγκεκριμένα σημεία. Αυτό οφείλεται σε διάφορες καταπονήσεις ιζημάτων, με αποτέλεσμα να θεωρηθεί ότι πρόκειται για ημιβυθισμένο υποθαλάσσιο αγωγό.

Προτού αναφερθεί η διαδικασία υπολογισμού των εδαφικών ελατηρίων, κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν ορισμένοι χρήσιμοι τύποι που σχετίζονται με τον αγωγό. Οι τύποι είναι οι εξής:

Συνολική διάμετρος αγωγού

$$D_{tot} = D_{out} + 2t_{armour} + 2t_{concrete} \quad (5.4)$$

Όπου,

D_{out} : εξωτερική διάμετρος αγωγού

t_{armour} : πάχος λεπτού στρώματος επένδυσης του αγωγού

$t_{concrete}$: πάχος επένδυσης του αγωγού από σκυρόδεμα

Συνολικός όγκος αγωγού

$$V_{tot} = \pi \times \left(\frac{D_{tot}}{2}\right)^2 \quad (5.5)$$

Εσωτερικός όγκος αγωγού

$$V_{in} = \pi \times \left(\frac{D - 2t_{pipe}}{2} \right)^2 \quad (5.6)$$

Όπου, t_{pipe} : πάχος αγωγού

Όγκος ως το τοίχωμα του αγωγού

$$V_{out} = \pi \times \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (5.7)$$

Όγκος αγωγού χωρίς στρώσεις

$$V_{pipe} = V_{out} - V_{in} \quad (5.8)$$

Όγκος επένδυσης κατά της διάβρωσης

$$V_{corrosion} = \pi \times \left(\frac{D + 2t_{armour}}{2} \right)^2 - V_{out} \quad (5.9)$$

Όγκος επένδυσης σκυροδέματος

$$V_{concrete} = V_{tot} - (V_{out} + V_{corrosion}) \quad (5.10)$$

Βάρος αγωγού χωρίς επένδυση

$$W_{pipe} = \bar{\gamma}_{steel} \times V_{pipe} \quad (5.11)$$

Όπου, $\bar{\gamma}_{steel}$: ειδικό βάρος χάλυβα $\rightarrow \bar{\gamma}_{steel} = 78.5 \text{ kN/m}^3$

Βάρος επένδυσης σκυροδέματος

$$W_{\text{concrete}} = \bar{\gamma}_{\text{concrete}} \times V_{\text{concrete}} \quad (5.12)$$

Όπου, $\bar{\gamma}_{\text{concrete}}$: ειδικό βάρος σκυροδέματος $\rightarrow \bar{\gamma}_{\text{concrete}} = 25 \text{ kN/m}^3$

Συνολικό βάρος επενδυμένου αγωγού

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{pipe}} + W_{\text{concrete}} \quad (5.13)$$

- Για το συνολικό βάρος του επενδυμένου αγωγού δε χρησιμοποιήθηκε το βάρος της στρώσης της εξωτερικής επένδυσης

Ανωση

$$A = V_{\text{tot}} \times \rho_{\text{seawater}} \times g \quad (5.14)$$

Όπου,

ρ_{seawater} : πυκνότητα θαλασσινού νερού $\rightarrow \rho_{\text{seawater}} = 1.025 \text{ Kg/m}^3$

g : επιτάχυνση βαρύτητας $\rightarrow g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Προσδιορισμός αξονικών εδαφικών ελατηρίων

Η μέγιστη αξονική δύναμη του εδάφους ανά μονάδα μήκους του αγωγού που μεταβιβάζεται σε αυτόν, δίνεται σύμφωνα με τον κανονισμό ALA από τον παρακάτω τύπο.

$$T_u = \pi \times D \times a \times c + \pi \times D \times H \times \bar{\gamma} \times \frac{1+K_0}{2} \times \tan \delta \quad (5.15)$$

Όπου,

D: εξωτερική διάμετρος του αγωγού $\rightarrow D = D_{\text{tot}} / 2$

c: συνοχή του εδαφικού υλικού

H: βάθος από την επιφάνεια του εδάφους έως το κέντρο του αγωγού

$\bar{\gamma}$: ενεργό ειδικό βάρος

Ko: συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων

α : συντελεστής συνοχής $\rightarrow \alpha = 0.608 - 0.123 \times c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1}$

δ : γωνία τριβής μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του εδάφους $\rightarrow \delta = f \times \varphi$

f: συντελεστής που εξαρτάται από την εξωτερική επένδυση του αγωγού που συσχετίζει τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους και τη γωνία τριβής μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και του εδάφους

Ο συντελεστής f επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με την εξωτερική επένδυση από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1: Συντελεστής f για διαφορετικές εξωτερικές επενδύσεις

Επένδυση αγωγού (εξωτερική)	f
Σκυρόδεμα	1.0
Πίσσα	0.9
Σκληρός χάλυβας	0.8
Μαλακός χάλυβας	0.7
Εποξειδικό υλικό (αστάρι και βαφή)	0.6
Πολυαιθυλένιο	0.6

Στην περίπτωση του ημιβυθισμένου αγωγού προκύπτει ότι το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους έως το κέντρο του αγωγού ισούται με το μηδέν, επομένως η σχέση 5.15 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$T_u = \pi \times D \times \alpha \times c \quad (5.16)$$

Προσδιορισμός οριζόντιων ελατηρίων

Σύμφωνα με τη θεωρία των O' Rourke & Liu, προσδιορίστηκαν οι δυνάμεις των οριζόντιων ελατηρίων. Συνεπώς, για αργιλικά εδάφη προκύπτει :

$$p_u = 0.2 \times w_s + 3 \times z \times \sqrt{D \times \bar{\gamma} \times S_u} \quad (5.17)$$

Όπου,

- $s_u=c$ (συνοχή αργίλου)
- $w_s= w_{tot} - A \rightarrow w_s$ (βυθισμένο βάθος), A (άνωση αγωγού)
- $z = D/2 \rightarrow z$ (το τμήμα του αγωγού που είναι βυθισμένο στο βυθό της θάλασσας)

Επιπλέον, η μετατόπιση για τη συγκεκριμένη δύναμη είναι:

$$y_u = 0.1 \times D \quad (5.18)$$

Προσδιορισμός κατακόρυφων ελατηρίων

Σύμφωνα με τη θεωρία των O' Rourke & Liu, προσδιορίστηκαν οι δυνάμεις των κατακόρυφων ελατηρίων. Για την κάθετη διεύθυνση υπάρχουν δύο είδη ελατηρίων, αυτά που ασκούν δύναμη στον αγωγό προς τα κάτω (downward) και αυτά που ασκούν δύναμη προς τα άνω (upward). Συνεπώς, για αργιλικά εδάφη προκύπτει :

Άσκηση δύναμης στον αγωγό προς τα πάνω (upward)

$$q_u = w_s + \alpha \times S_u \times D \times \sin\theta \quad (5.19)$$

Όπου, $\theta = \sin^{-1}(1 - 2 \times \frac{z}{D}) \leq 90^\circ$

Άσκηση δύναμης στον αγωγό προς τα κάτω (downward)

$$q_d = N \times D \times S_u \quad (5.20)$$

Όπου, $N = \pi + 2 = 5.14 \rightarrow N = 6$

Επιπλέον, η μετατόπιση για τη συγκεκριμένη δύναμη είναι :

$$\Delta q_d = 0.125 \times D \quad (5.21)$$

Συνεπώς, σύμφωνα με το τυπολόγιο αυτό και με δεδομένα τα στοιχεία που έχουν αναφερθεί στις παραπάνω ενότητες, καταλήγουμε στο αποτέλεσμα των αξονικών, οριζόντιων και κατακόρυφων εδαφικών ελατηρίων για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε. Συνοπτικά, τα δεδομένα που προκύπτουν είναι:

Πίνακας 5.2: Δεδομένα για τον προσδιορισμό εδαφικών ελατηρίων

Βάθος της προς εξέταση περιοχής		2562	m
γωνία διασταλτικότητας	ψ	0.20	
πυκνότητα υλικού	ρ	2	tn/m ³
μέτρο ελαστικότητας	E_o	10000	MPa
λόγος Poisson	ν	0.3	
Εσωτερική πίεση	PI	11000	kPa
Εξωτερική πίεση	HPE	25761.55	kPa
Εξωτερική διάμετρος αγωγού	D	0.6604	m
γωνία διάρρηξης ρήγματος	δ	60	μοίρες
Μετατόπιση κατά x	Δx	0.7626	m
Μετατόπιση κατά y	Δy	1.3208	m

Επομένως, για κάθε περίπτωση συνοχής c του εδαφικού υλικού προέκυψαν οι παρακάτω τιμές των εδαφικών ελατηρίων με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού φύλλου Excel.

Πίνακας 5.3: Δυνάμεις εδαφικών ελατηρίων ανά περίπτωση συνοχής του εδαφικού υλικού

Είδος ελατηρίου/ Δυνάμεις ελατηρίων (kN/m)	Συνοχή c (kPa)				
	15	35	55	75	95
Αξονικό (Δεξιά)	-18.5540	-42.1418	-62.1024	-75.8431	-83.5705
Αξονικό (Αριστερά)	18.5540	42.1418	62.1024	75.8431	83.5705
Οριζόντιο (κάτω)	-69.8760	-163.0440	-256.2120	-349.3800	-442.5480
Οριζόντιο (πάνω)	14.3851	29.4016	42.1089	50.8565	55.7759
Κατακόρυφο (προς τα άνω)	-13.0826	-19.7125	-24.5805	-28.6175	-32.1434
Κατακόρυφο (προς τα κάτω)	13.0826	19.7125	24.5805	28.6175	32.1434

Για την εξασφάλιση του λιγότερου δυνατού χρόνου, οι υπολογισμοί αυτοί καθώς και η εισαγωγή τους στο αντίστοιχο αρχείο εισόδου που αφορά το προσομοίωμα του αγωγού, αυτοματοποιήθηκαν με τη βοήθεια κώδικα στην Python. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην επόμενη υποενότητα.

5.2.4. Εφαρμογή Υπολογιστικού Εργαλείου – Αυτοματοποίηση διαδικασιών με χρήση Κώδικα (Python)

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου στο στάδιο αυτό. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η ανάλυση των δύο δισδιάστατων προσομοιωμάτων που επεξηγήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων, χρήσιμων για το επόμενο στάδιο της μελέτης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με σκοπό τη λήψη αποφάσεων για την ικανότητα διασταύρωσης του αγωγού με τον σεισμικό γεωκίνδυνο, το ρήγμα. Η υλοποίηση της ανάλυσης διεξάγεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, ABAQUS.

Αρχικά, διαμορφώνεται ένα αρχείο εισόδου με δεδομένα τους κόμβους από τους οποίους απαρτίζεται η κάθε ιζηματογενής στρώση, τις σταθερές τιμές του υλικού (αργιλικό) και των χαρακτηριστικών του (δηλαδή πυκνότητα, ελαστικότητα, γωνία διασταλτικότητας, λόγος Poisson) καθώς επίσης και τις μεταβαλλόμενες τιμές του πάχους της ιζηματογενούς στρώσης (H), της συνοχής του εδαφικού υλικού (c) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ). Συνεπώς, στο πρώτο προσομοίωμα αναπαρίστανται η καθίζηση της ιζηματογενής στρώσης λόγω της διάρρηξης ανάστροφου ρήγματος.

Το επόμενο κρίσιμο βήμα για την παρούσα μελέτη αποτέλεσε η αντιμετώπιση και διαχείριση του τεράστιου όγκου πληροφοριών, όπως επίσης και η εξοικονόμηση χρόνου για την εξαγωγή και εκτέλεση κάθε προσομοιώματος εντός του λογισμικού. Για το λόγο αυτό, διαμορφώθηκε ο κώδικας «Generate_Input_Files.py», ο οποίος τροποποιεί ένα βασικό αρχείο εισόδου δεδομένων και εκτελέστηκε εντός της γλώσσας προγραμματισμού Python. Συνεπώς, για κάθε συνδυασμό των H, ϕ και c που ορίζεται από τον χρήστη, διαμορφώνεται ένα νέο προσομοίωμα ρήγματος. Άρα, εξήχθησαν συνολικά 150 προσομοιώματα για τη συγκεκριμένη μελέτη, τα οποία στη συνέχεια εισήχθησαν στο λογισμικό. Οι συνδυασμοί που προκύπτουν είναι για τα εξής δεδομένα:

- **Πάχος ιζηματογενούς στρώσης H:** 30,45,60,105,120 και 135 m
- **Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ :** 8°,16°,24°,32° και 40°
- **Συνοχή εδαφικού υλικού c:** 15,35,55,75 και 95 kPa

Παρακάτω παρουσιάζεται το παράθυρο εκτέλεσης του κώδικα που αξιοποιήθηκε εντός της γλώσσας προγραμματισμού Python.

```

What's the input file name? i.e. enter name without extension .inp
'init'
init.inp! got it.

Minimum H? i.e. sediments stratum - Enter numeric value in (m), e.g 5 for 5m
30
30m! got it.

Maximum H? i.e. sediments stratum - Enter numeric value in (m), e.g 5 for 5m
135
135m! got it.

Step H? i.e. sediments stratum - Enter numeric value in (m), e.g 5 for 5m
15
15m! got it.

Minimum a? i.e. angle of internal friction - Enter numeric value in (DEG), e.g 5 for 5 DEG
8
8DEG! got it.

Maximum a? i.e. angle of internal friction - Enter numeric value in (DEG), e.g 5 for 5 DEG
40
40DEG! got it.

Step a? i.e. angle of internal friction - Enter numeric value in (DEG), e.g 5 for 5 DEG
8
8DEG! got it.

Minimum c? i.e. cohesion - Enter numeric value in (kPa), e.g 5 for 5 kPa
15
15kPa! got it.

Maximum c? i.e. cohesion - Enter numeric value in (kPa), e.g 5 for 5 kPa
95
95kPa! got it.

Step c? i.e. cohesion - Enter numeric value in (kPa), e.g 5 for 5 kPa
20
20kPa! got it.

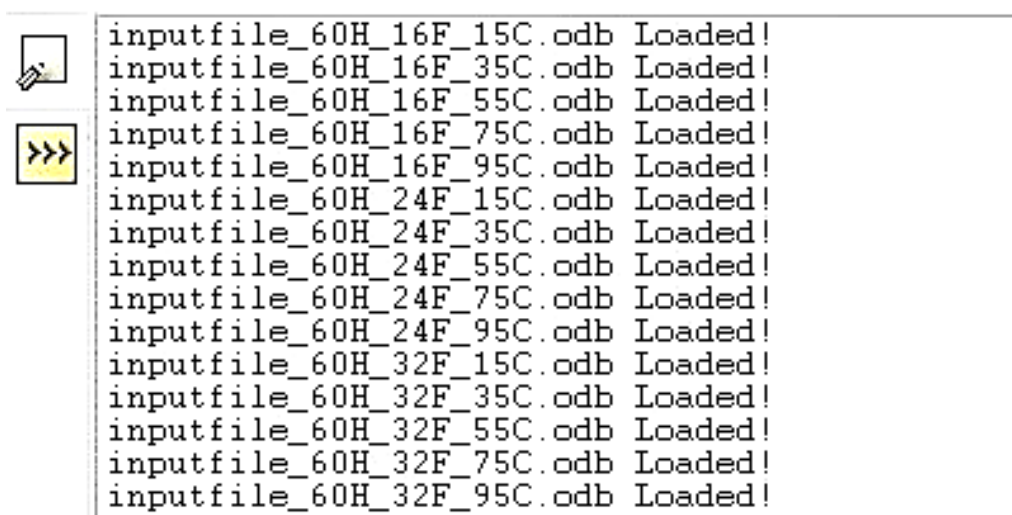
Writting Input file: H= 30, a= 8, c= 15
Writting Input file: H= 30, a= 8, c= 35
Writting Input file: H= 30, a= 8, c= 55
Writting Input file: H= 30, a= 8, c= 75
Writting Input file: H= 30, a= 8, c= 95
Writting Input file: H= 30, a= 16, c= 15
Writting Input file: H= 30, a= 16, c= 35

```

Εικόνα 5.3: Εκτέλεση κώδικα δημιουργίας προσομοιωμάτων ρήγματος

Επομένως, η εκτέλεση κάθε προσομοιώματος στο λογισμικό ABAQUS, οδήγησε στην εξαγωγή των μετατοπίσεων που δέχεται η επιφάνεια ιζηματογενούς στρώσης λόγω της διάρρηξης του ρήγματος. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αφορούν τις μετατοπίσεις κατά την οριζόντια διεύθυνση (U1) και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (U2). Ομοίως με προηγουμένως, η διαδικασία αυτή περατώθηκε με χρήση του κώδικα «Get_U_md1.py», ο οποίος συμβάλλει στην εξαγωγή των ελάχιστων και μέγιστων

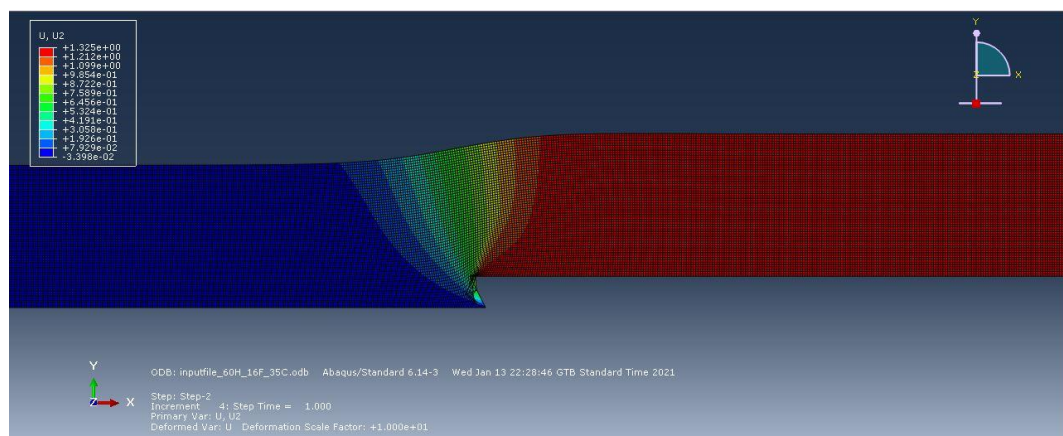
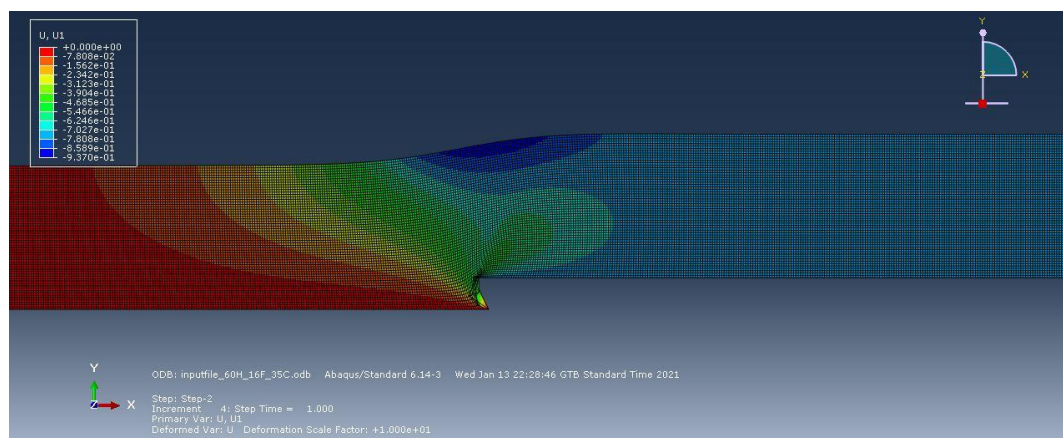
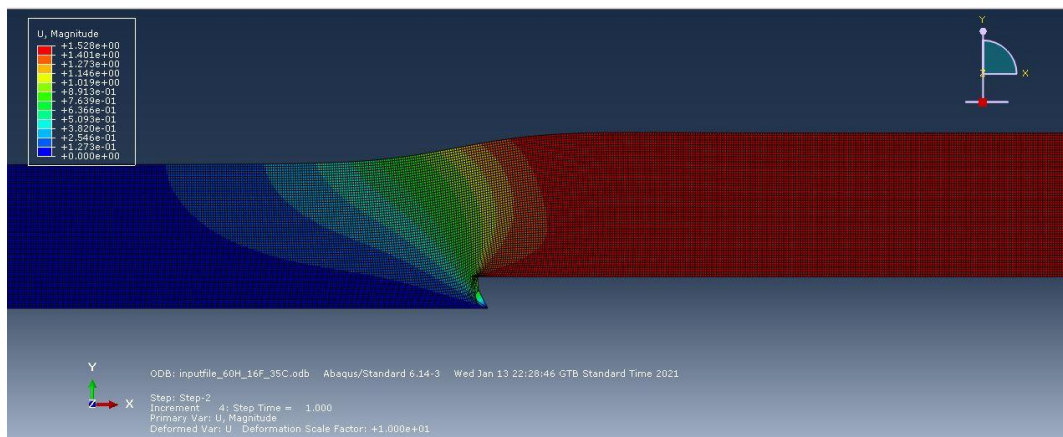
μετατοπίσεων U1,U2 κάθε περίπτωσης προσομοιώματος, οι οποίες στη συνέχεια εισάγονται αυτόματα σε ένα φύλλο επεξεργασίας excel για τη διευκόλυνση μελλοντικών αναλύσεων. Σημαντικό να αναφερθεί ότι ο κώδικας αυτός εκτελέστηκε εντός του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του ABAQUS το οποίο διαθέτει μια ενσωματωμένη γραμμή εντολών της γλώσσας Python. Η εκτέλεση του συγκεκριμένου κώδικα απεικονίζεται στην εικόνα 5.4.



```
inputfile_60H_16F_15C.odb Loaded!  
inputfile_60H_16F_35C.odb Loaded!  
inputfile_60H_16F_55C.odb Loaded!  
inputfile_60H_16F_75C.odb Loaded!  
inputfile_60H_16F_95C.odb Loaded!  
inputfile_60H_24F_15C.odb Loaded!  
inputfile_60H_24F_35C.odb Loaded!  
inputfile_60H_24F_55C.odb Loaded!  
inputfile_60H_24F_75C.odb Loaded!  
inputfile_60H_24F_95C.odb Loaded!  
inputfile_60H_32F_15C.odb Loaded!  
inputfile_60H_32F_35C.odb Loaded!  
inputfile_60H_32F_55C.odb Loaded!  
inputfile_60H_32F_75C.odb Loaded!  
inputfile_60H_32F_95C.odb Loaded!
```

Εικόνα 5.4: Απόσπασμα εκτέλεσης κώδικα εξαγωγής μεγίστων και ελαχίστων μετατοπίσεων U1,U2 κάθε προσομοιώματος

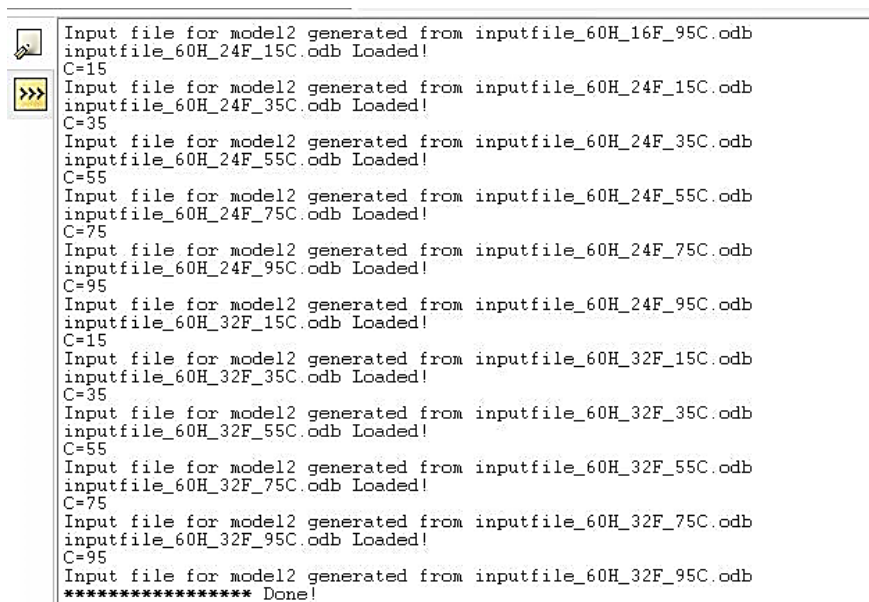
Επίσης, ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα που εξήχθησαν στο περιβάλλον του ABAQUS για μια περίπτωση προσομοιώματος, με δεδομένα το πάχος ιζηματογενούς στρώσης $H=60\text{m}$, τη γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=16^\circ$ και τη συνοχή εδαφικού υλικού $c=35\text{ kPa}$.



Εικόνα 5.5: Απεικόνιση προσομοιώματος διάρρηξης ρήγματος για πάχος ιζηματογενούς στρώσης 60m (γωνία διάρρηξης 60°)

Το επόμενο βήμα της μελέτης αποτέλεσε η ανάλυση του δεύτερου προσομοιώματος, που σχετίζεται με τον αγωγό. Στη συγκεκριμένη συνθήκη ήταν εξίσου σημαντική η χρήση ενός κώδικα έτσι ώστε να επιτευχθεί η διασύνδεση των δύο προσομοιωμάτων. Ειδικότερα, με δεδομένες τις εξαγόμενες μετατοπίσεις που δέχεται η επιφάνεια της ιζηματογενούς στρώσης λόγω της διάρρηξης του ρήγματος, σκόπιμο ήταν να

αναλυθούν οι παραμορφώσεις (e11) που δέχεται ο αγωγός στην περίπτωση που διαπεράσει τον συγκεκριμένο γεωκίνδυνο. Συνεπώς, δημιουργήθηκε ο κώδικας «Input2fileF.py», ο οποίος εκτελέστηκε εντός του ABAQUS. Σκοπός του συγκεκριμένου κώδικα είναι η αυτοματοποίηση της εισαγωγής των μετατοπίσεων κατά την οριζόντια και κάθετη διεύθυνση (U1,U2) του πρώτου προσομοιώματος στο δεύτερο προσομοίωμα του αγωγού για κάθε περίπτωση μελέτης. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική, διότι σε αντίθετη περίπτωση χειροκίνητα ο χρήστης θα έπρεπε να εξαγάγει τις μετατοπίσεις U1,U2 από το πρώτο προσομοίωμα των 105 αναλύσεων σε υπολογιστικό φύλλο excel, τις οποίες θα έπρεπε να επεξεργαστεί για την απόρριψη ορισμένων διπλότυπων τιμών και στη συνέχεια να τις εισάγει στο δεύτερο προσομοίωμα για κάθε περίπτωση. Επιπλέον, ο κώδικας συμβάλλει στην αυτοματοποίηση του υπολογισμού των εδαφικών ελατηρίων, που περιγράφονται στην ενότητα 5.2.3., καθώς επίσης και την ταυτόχρονη εισαγωγή τους στο κάθε αρχείο προσομοιώματος του αγωγού. Εύκολα λοιπόν, γίνεται αντιληπτή η εξοικονόμηση χρόνου που προσφέρεται από τον συγκεκριμένο κώδικα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η εκτέλεση του κώδικα διασύνδεσης των δύο προσομοιωμάτων.



```
Input file for model2 generated from inputfile_60H_16F_95C.odb
inputfile_60H_24F_15C.odb Loaded!
C=15
Input file for model2 generated from inputfile_60H_24F_15C.odb
inputfile_60H_24F_35C.odb Loaded!
C=35
Input file for model2 generated from inputfile_60H_24F_35C.odb
inputfile_60H_24F_55C.odb Loaded!
C=55
Input file for model2 generated from inputfile_60H_24F_55C.odb
inputfile_60H_24F_75C.odb Loaded!
C=75
Input file for model2 generated from inputfile_60H_24F_75C.odb
inputfile_60H_24F_95C.odb Loaded!
C=95
Input file for model2 generated from inputfile_60H_24F_95C.odb
inputfile_60H_32F_15C.odb Loaded!
C=15
Input file for model2 generated from inputfile_60H_32F_15C.odb
inputfile_60H_32F_35C.odb Loaded!
C=35
Input file for model2 generated from inputfile_60H_32F_35C.odb
inputfile_60H_32F_55C.odb Loaded!
C=55
Input file for model2 generated from inputfile_60H_32F_55C.odb
inputfile_60H_32F_75C.odb Loaded!
C=75
Input file for model2 generated from inputfile_60H_32F_75C.odb
inputfile_60H_32F_95C.odb Loaded!
C=95
Input file for model2 generated from inputfile_60H_32F_95C.odb
***** Done!
```

Εικόνα 5.6: Απόσπασμα εκτέλεσης κώδικα διασύνδεσης πρώτου και δεύτερου προσομοιώματος

Με τον τρόπο αυτόν δημιουργήθηκαν τα αρχεία εισόδου του δεύτερου προσομοιώματος του αγωγού, τα οποία στη συνέχεια εκτελέστηκαν εντός του περιβάλλοντος του ABAQUS. Κατόπιν ολοκλήρωσης της διαδικασίας αυτής εξήχθησαν οι ζητούμενες παραμορφώσεις (e11) που δέχεται ο αγωγός. Λόγω των αναλύσεων που θα γίνουν στη συνέχεια για τα νευρωνικά δίκτυα και με σκοπό τη διευκόλυνση του χρήστη δημιουργήθηκε ακόμη ένας τελευταίος κώδικας ο «Get_E_md12.py», ο οποίος εξάγει τις μέγιστες και ελάχιστες παραμορφώσεις (e11) του αγωγού σε ένα φύλλο επεξεργασίας excel και παρουσιάζεται η εκτέλεση του στην παρακάτω εικόνα.

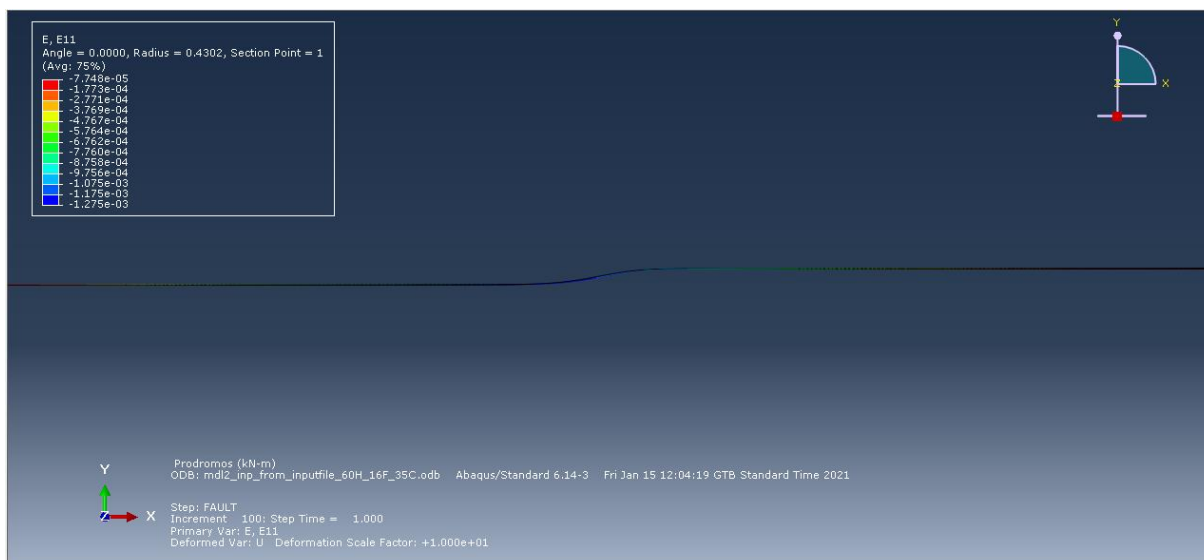
```

Min E @ element 431
Max E @ element 906
mdl2_inp_from_inputfile_60H_24F_15C.odt Loaded!
Min E @ element 465
Max E @ element 987
mdl2_inp_from_inputfile_60H_24F_35C.odt Loaded!
Min E @ element 448
Max E @ element 960
mdl2_inp_from_inputfile_60H_24F_55C.odt Loaded!
Min E @ element 430
Max E @ element 931
mdl2_inp_from_inputfile_60H_24F_75C.odt Loaded!
Min E @ element 430
Max E @ element 913
mdl2_inp_from_inputfile_60H_24F_95C.odt Loaded!
Min E @ element 430
Max E @ element 905
mdl2_inp_from_inputfile_60H_32F_15C.odt Loaded!
Min E @ element 465
Max E @ element 986
mdl2_inp_from_inputfile_60H_32F_35C.odt Loaded!
Min E @ element 448
Max E @ element 960
mdl2_inp_from_inputfile_60H_32F_55C.odt Loaded!
Min E @ element 430
Max E @ element 931
mdl2_inp_from_inputfile_60H_32F_75C.odt Loaded!
Min E @ element 430
Max E @ element 912
mdl2_inp_from_inputfile_60H_32F_95C.odt Loaded!
Min E @ element 430
Max E @ element 905

```

Εικόνα 5.7: Απόσπασμα εκτέλεσης κώδικα εξαγωγής μεγίστων και ελαχίστων παραμορφώσεων (e11) αγωγού κάθε προσομοιώματος

Επίσης, ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που εξήχθησαν στο περιβάλλον του ABAQUS για μια περίπτωση προσομοιώματος, με δεδομένα το πάχος ιζηματογενούς στρώσης $H=60m$, τη γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=16^\circ$ και τη συνοχή εδαφικού υλικού $c=35\text{ kPa}$.



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση παραμορφώσεων προσομοιώματος του αγωγού για πάχος ιζηματογενούς στρώσης 60m

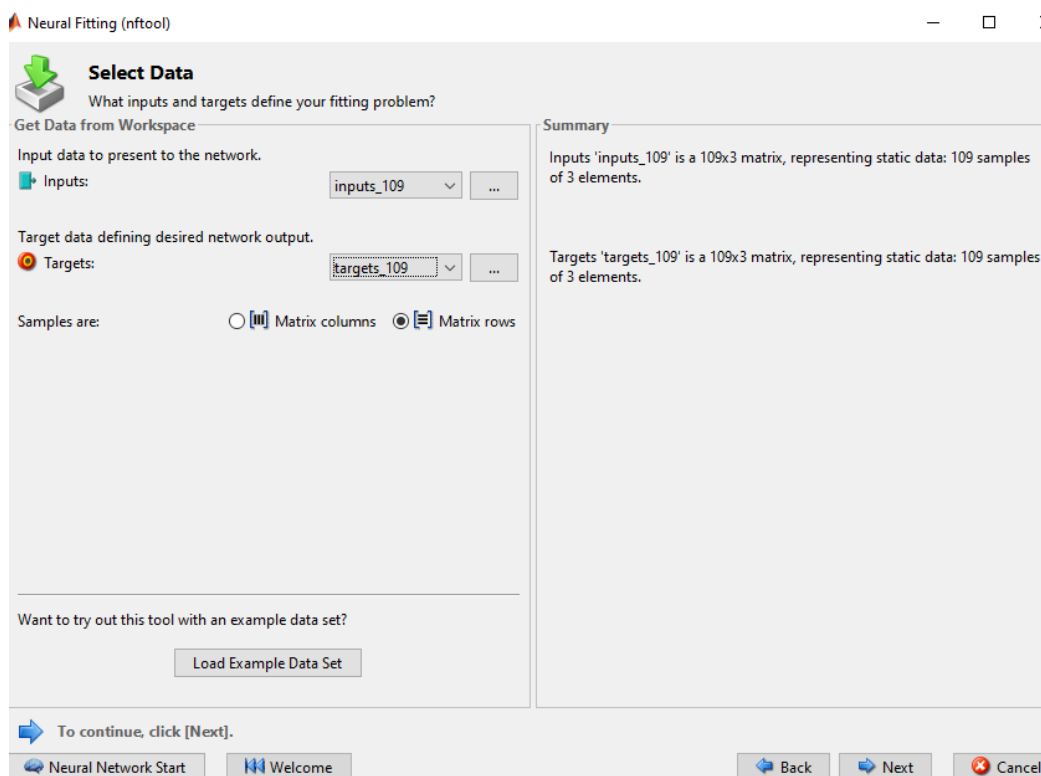
Τέλος, εφόσον περατώθηκε η συγκεκριμένη διαδικασία διαπιστώθηκε ότι ο αρχικός αριθμός αναλύσεων που προκύπτει από το συνδυασμό των δεδομένων (H,φ,c) διαφέρει από τις τελικές εξαγόμενες αναλύσεις. Συνεπώς, ολοκληρώθηκαν συνολικά 109 αναλύσεις για την εξαγωγή των παραμορφώσεων του αγωγού λόγω της αδύνατης εκτέλεσης ορισμένων προσομοιωμάτων εξαιτίας της αδυναμίας σύγκλισης τους. Τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακα σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

5.3. Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Τ.Ν.Δ)

Στην ενότητα αυτή τέθηκε η προσπάθεια εύρεσης μιας μεθόδου με την οποία αξιοποιώντας το σύνολο των αναλύσεων της προηγούμενης ενότητας, δηλαδή τις μετατοπίσεις της ιζηματογενούς στρώσης (U1,U2) και τις παραμορφώσεις του αγωγού (e11), να παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εξάγει τα αποτελέσματα αυτά για νέα δεδομένα ιζηματογενούς στρώσης, χωρίς να είναι αναγκαίο να προηγηθεί η προαναφέρουσα διαδικασία ανάλυσης των προσομοιωμάτων. Κατάλληλη μέθοδος για τη συγκεκριμένη προσπάθεια θεωρήθηκε η κατασκευή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, όπου για την υλοποίησή τους αξιοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB.

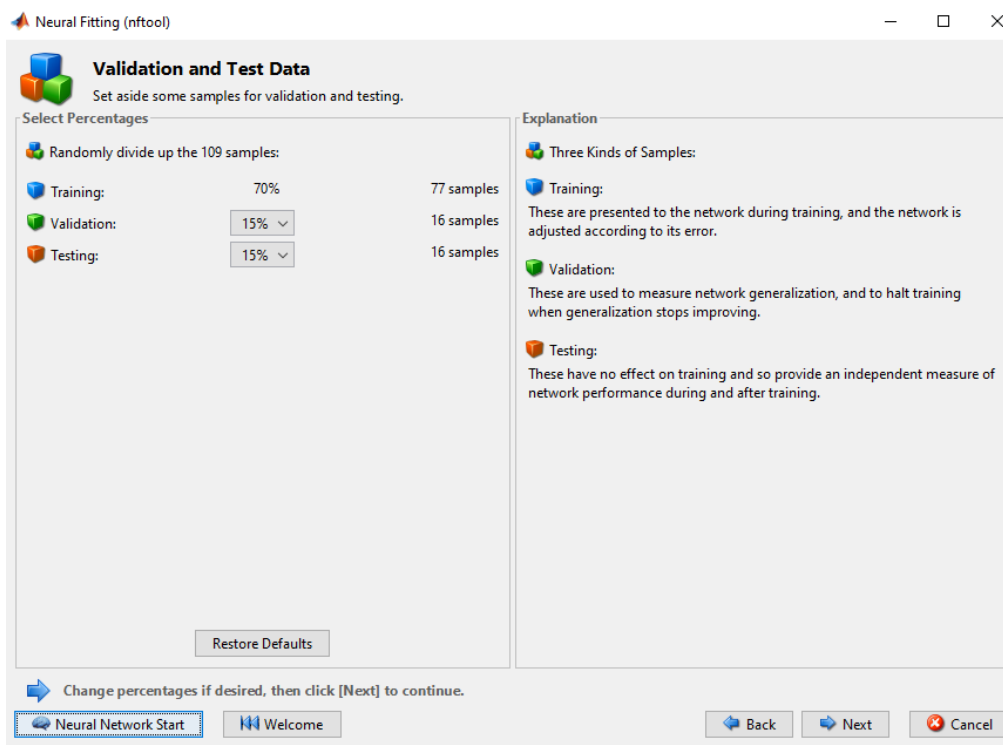
Αρχικά, διαμορφώθηκε ένα αρχείο εισόδου και ένα αρχείο στόχου για τα νευρωνικά δίκτυα σε υπολογιστικό φύλλο excel με βάση τις συνολικές αναλύσεις που προέκυψαν από τα δύο προσομοιώματα, στα οποία εμπεριέχονται σε μορφή πίνακα οι αντίστοιχες μεταβλητές εισόδου και εξόδου. Οι συνολικές αναλύσεις που ολοκληρώθηκαν με επιτυχία ανέρχονται στις 109, συνεπώς προκύπτει αντίστοιχος αριθμός μετατοπίσεων και παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, ως αρχείο εισόδου των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεταβλητές, τα χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς στρώσης, δηλαδή το πάχος της (H), η γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και η συνοχή του εδαφικού υλικού (c). Σε αντιστοιχία ως αρχείο στόχου, τέθηκαν οι μετατοπίσεις της ιζηματογενούς στρώσης για την οριζόντια (U1) και κατακόρυφη διεύθυνση (U2) και ως τρίτη μεταβλητή οι παραμορφώσεις (e11) που δέχεται ο αγωγός. Σημαντικό να αναφερθεί ότι οι επιλεγόμενες τιμές για τα αρχεία της κάθε περίπτωσης αφορούν τις μέγιστες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις, οι οποίες παράχθηκαν από τους αντίστοιχους κώδικες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Στη συνέχεια, τα αρχεία αξιοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του εργαλείου Neural Fitting (nftool) που βρίσκεται στην εργαλειοθήκη του λογισμικού MATLAB. Ειδικότερα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα έγινε η εισαγωγή των δεδομένων αυτών ως Inputs και Targets αντίστοιχα.



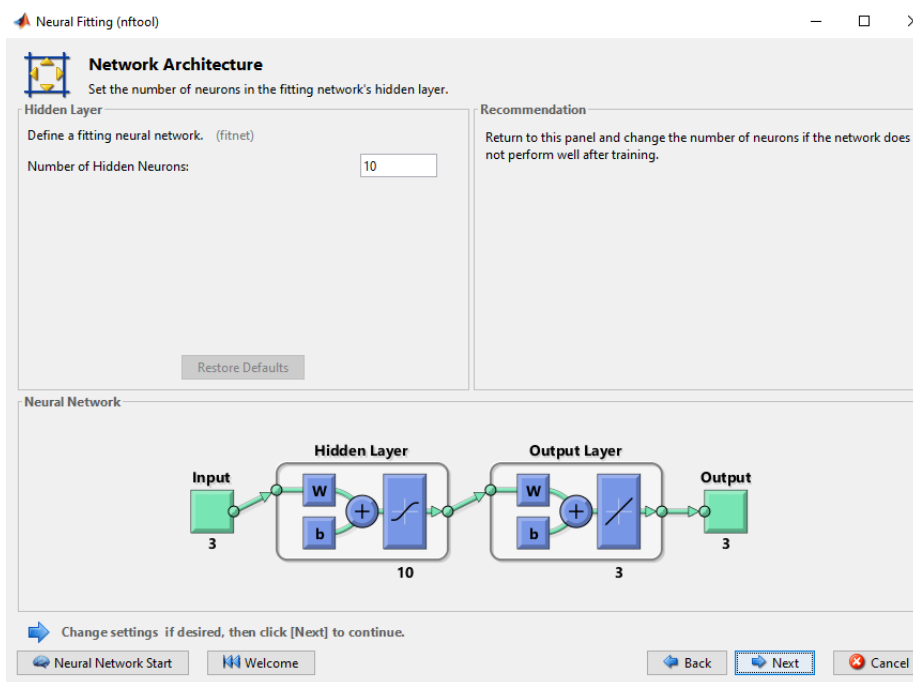
Εικόνα 5.9: Εισαγωγή δεδομένων στο εργαλείο του MATLAB, Neural Fitting

Το επόμενο βήμα αφορά τον ορισμό των δειγμάτων εκπαίδευσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται τα δείγματα εκπαίδευσης (training samples), τα δείγματα επικύρωσης (validation samples) και τα δείγματα ελέγχου (testing samples). Ειδικότερα, τα δείγματα εκπαίδευσης παρουσιάζονται στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και το δίκτυο προσαρμόζεται ανάλογα με το σφάλμα του, τα δείγματα επικύρωσης χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γενίκευσης δικτύου και για τη διακοπή της εκπαίδευσης όταν η γενίκευση σταματά να βελτιώνεται και τα δείγματα ελέγχου δεν έχουν καμία επίδραση στην εκπαίδευση και γι' αυτό παρέχουν ένα ανεξάρτητο μέτρο της απόδοσης του δικτύου κατά τη διάρκεια και μετά την εκπαίδευση. Συνεπώς, ορίστηκαν αρχικά τα καθορισμένα και συνηθισμένα ποσοστά που επιλέγονται από το εργαλείο, δηλαδή 70% για τα δείγματα εκπαίδευσης, 15% για τα δείγματα επικύρωσης και 15% για τα δείγματα ελέγχου. Ωστόσο, υλοποιήθηκαν ορισμένες τροποποιήσεις των ποσοστών αυτών με σκοπό την ανάλυση τυχόν διαφοροποιήσεων και βελτιώσεων του αποτελέσματος. Συγκεκριμένα, έγιναν δοκιμές για περιπτώσεις ποσοστών όπως π.χ. μια περίπτωση για 40%-30%-30% ή άλλη μια περίπτωση για 85%-5%-10%, σε αντιστοιχία με τη σειρά των δειγμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ακόμη ότι το ελάχιστο ποσοστό που μπορεί να οριστεί για ένα δείγμα εκπαίδευσης ανέρχεται στο 30%, ενώ για τα δείγματα επικύρωσης και ελέγχου κυμαίνονται στα 5% - 35%. Κατόπιν των δοκιμών αυτών, διαπιστώθηκε ότι οι αλλαγές που προκύπτουν είναι ελάχιστες και το σημαντικότερο ότι δε συμβάλλουν στη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το παράθυρο του εργαλείου για τον ορισμό των δειγμάτων.



Εικόνα 5.10: Ορισμός δειγμάτων εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου στο εργαλείο του MATLAB, Neural Fitting

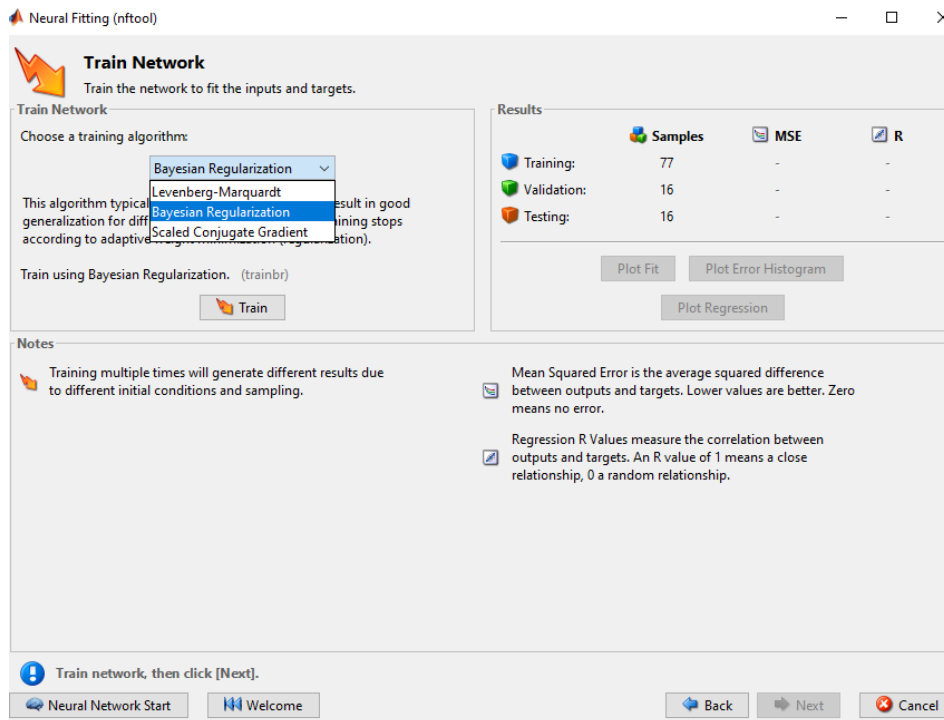
Στο επόμενο στάδιο διαμορφώθηκε η αρχιτεκτονική των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων (hidden layers). Το τυπικό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα δίκτυο τροφοδοσίας δύο επιπέδων (feed-forward), αξιοποιώντας ως συναρτήσεις ενεργοποίησης τη σιγμοειδή στο κρυφό επίπεδο και τη γραμμική στο επίπεδο εξόδου. Ως αρχική δοκιμή θεωρήθηκε η προεπιλεγμένη τιμή του εργαλείου η οποία ανέρχεται στα 10 κρυφά επίπεδα, ενώ στη συνέχεια κρίθηκε αναγκαίο να γίνει τροποποίηση της τιμής τους με απώτερο σκοπό τη βελτίωση του σφάλματος και την εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, έγιναν δοκιμές για 50 και 150 κρυφά επίπεδα των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια της ενότητας. Ωστόσο, σύμφωνα με το άρθρο του Saurabh Karsoliya διαπιστώνεται ότι αρκετές έρευνες δεν παρέχουν τον ακριβή και ιδανικό αριθμό των κρυφών επιπέδων (hidden layers) καθώς και τον αριθμό των νευρώνων σε κάθε στρώμα. Συνεπώς, ο αριθμός τους αποτελεί μια αυθαίρετη δοκιμή, ενώ παράλληλα απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην υπερβεί τα όρια προκαλώντας ως αποτέλεσμα την υπερπροσαρμογή του δικτύου (Overfitting). Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται το αντίστοιχο τμήμα του εργαλείου μελέτης για την ενδεικτική τιμή των 10 κρυφών επιπέδων.



Εικόνα 5.11: Ορισμός κρυφών επιπέδων για τη δομή της αρχιτεκτονικής του Τ.Ν.Δ. στο εργαλείο του MATLAB, Neural Fitting

Για την ολοκλήρωση της κατασκευής του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το σημαντικότερο στάδιο είναι οι αλγόριθμοι κατά τους οποίους θα επιτευχθεί η εκπαίδευση του. Συγκεκριμένα, οι προσφερόμενοι αλγόριθμοι εκπαίδευσης είναι ο Levenberg-Marquardt (LM), ο Bayesian Regularization (BR) και ο Scaled Conjugate Gradient (SCG).

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε ξεχωριστά ο κάθε αλγόριθμος και εξήχθησαν για κάθε περίπτωση τα διαγράμματα αποδοτικότητας και γραμμικής παλινδρόμησης καθώς επίσης και το ιστόγραμμα σφαλμάτων. Αρχικά, η εκπαίδευση περατώθηκε για τις προκαθορισμένες τιμές του εργαλείου δηλαδή για 70% δείγματα εκπαίδευσης, 15% δείγματα επικύρωσης και 15% δείγματα ελέγχου και όσον αφορά την αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου ορίστηκαν 10 κρυφά επίπεδα. Για κάθε επιλεγόμενη εκπαίδευση το παράθυρο ελέγχου (εικόνα 5.13) της συμβάλλει στην εξαγωγή των προαναφερόμενων αποτελεσμάτων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αξιολόγηση της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Παρακάτω, γίνεται μια γενικότερη, πιο αναλυτική επεξήγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και μετέπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης αλγορίθμου.



Εικόνα 5.12: Επιλογή αλγόριθμου εκπαίδευσης του Τ.Ν.Δ. στο εργαλείο του MATLAB, Neural Fitting



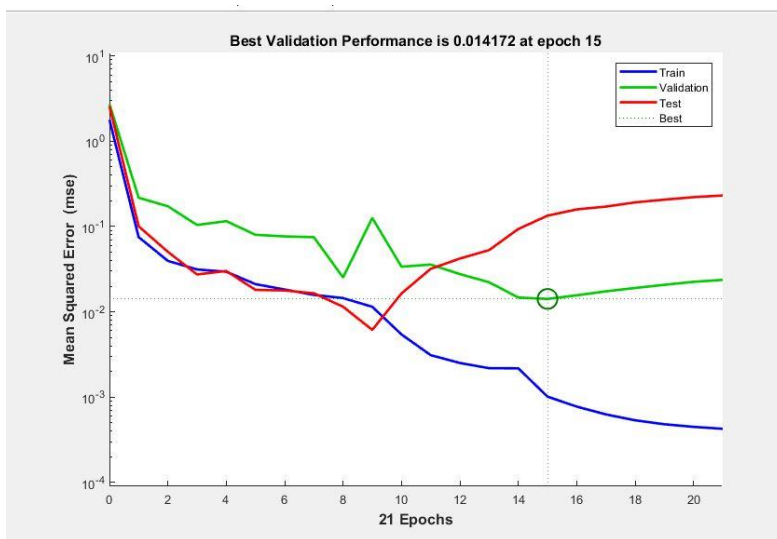
Εικόνα 5.13: Ενδεικτικό παράθυρο ελέγχου εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Συνεπώς, όσον αφορά το διάγραμμα απόδοσης αλγορίθμου πρόκειται για μια γραφική παράσταση των σφαλμάτων εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) αντιστοιχίζεται στον κατακόρυφο άξονα της, το οποίο είναι το μέσο τετράγωνο της διαφοράς μεταξύ των μεταβλητών εξόδου και των στόχων. Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η τιμή του σφάλματος τόσο μεγαλύτερη και η αποδοτικότητα των δειγμάτων. Επίσης, στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχίζονται οι εποχές ή κύκλοι της εκπαίδευσης. Στα νευρωνικά δίκτυα ανέρχονται συνολικά στην τιμή των 1000, η οποία εξασφαλίζεται μόνο στην περίπτωση που το σφάλμα βελτιώνεται σε κάθε κύκλο. Ένας κύκλος εκπαίδευσης ισοδυναμεί με ένα πρόσθιο πέρασμα συν ένα πέρασμα από πίσω προς τα εμπρός όλων των δειγμάτων εκπαίδευσης. Γενικά, το σφάλμα μειώνεται με τις περισσότερες εποχές εκπαίδευσης, αλλά ενδέχεται να αρχίσει να αυξάνεται το σύνολο δεδομένων επικύρωσης καθώς το δίκτυο αρχίζει να υπερβαίνει τα δεδομένα εκπαίδευσης.

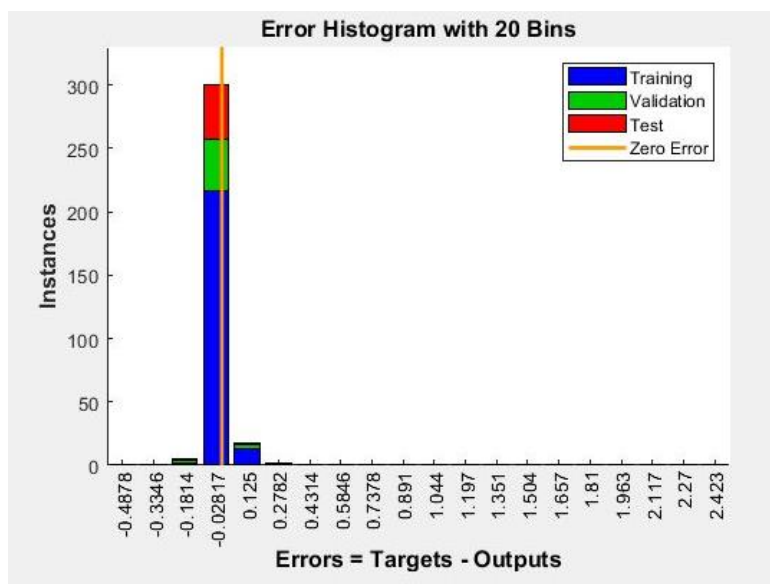
Τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης που εξάγονται εμφανίζουν τις εξόδους του νευρωνικού δικτύου για εκπαίδευση, επικύρωση και έλεγχο. Ειδικότερα, απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ των στόχων και των εξόδων για κάθε περίπτωση δείγματος η οποία θεωρείται βέλτιστη όταν τα δεδομένα βρίσκονται κατά μήκος μιας γραμμής 45 μοιρών, που σημαίνει ότι οι έξοδοι του δικτύου ταυτίζονται με τους στόχους. Επομένως, προκύπτει υψηλή συσχέτιση όταν ο συντελεστής ισούται με τη μονάδα, ενώ αρκετά χαμηλή συσχέτιση όταν ισούται με το μηδέν. Γενικότερα, η προσαρμογή μπορεί να ερμηνευτεί ως αρκετά καλή για όλα τα σύνολα δεδομένων για τιμές του συντελεστή R σε κάθε περίπτωση άνω του 0.93 ($R > 0.93$). Συνεπώς, τα διαγράμματα αυτά αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για το νευρωνικό δίκτυο καθώς μέσω των αποτελεσμάτων τους αποφασίζεται η επανεκπαίδευση του.

Το ιστόγραμμα σφαλμάτων αποτελείται από μπάρες που σχετίζονται με τα δεδομένα εκπαίδευσης, τα δεδομένα επικύρωσης και τα δεδομένα ελέγχου. Το ιστόγραμμα δίνει τη πληροφορία των ακραίων τιμών, τα οποία είναι σημεία δεδομένων όπου η προσαρμογή είναι σημαντικά χειρότερη από την πλειονότητα των δεδομένων. Επιπλέον, το πλήθος των κατακόρυφων μπαρών ονομάζονται διαστήματα σφαλμάτων (bins), τα οποία αντιπροσωπεύουν τις επιμέρους περιοχές σφαλμάτων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα εξαγόμενα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση αλγόριθμου εκπαίδευσης.

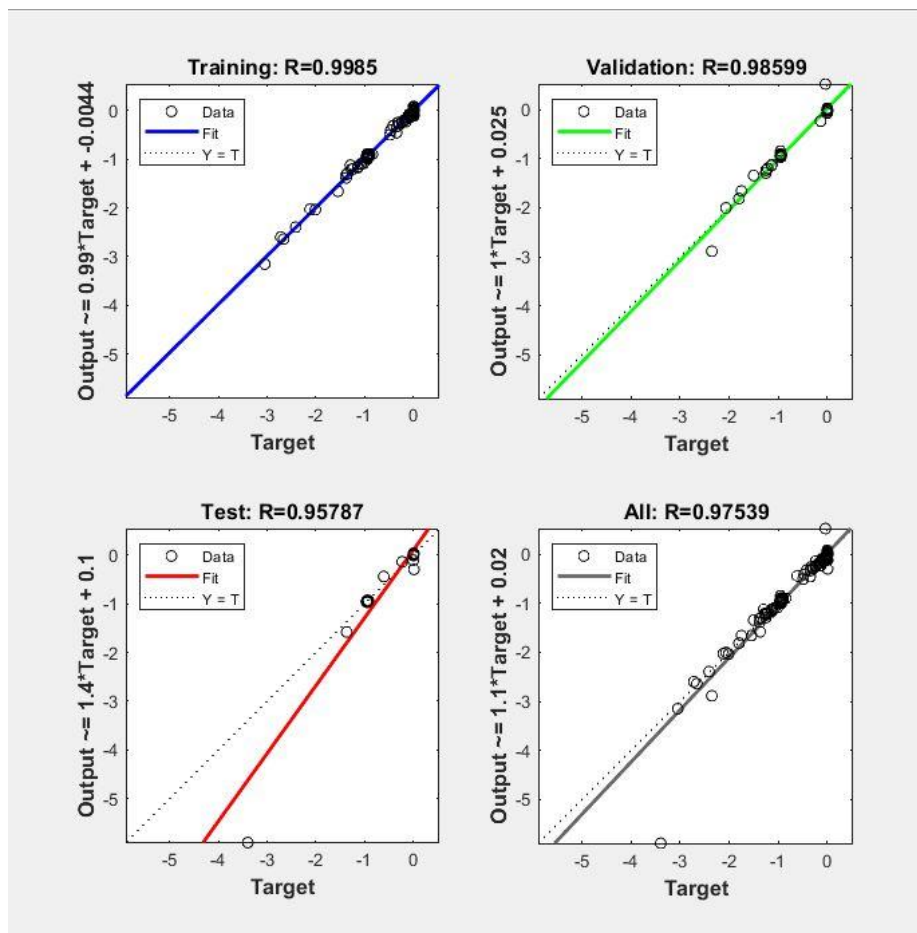
Ο αλγόριθμος **Levenberg-Marquardt (LM)** απαιτεί συνήθως περισσότερη μνήμη αλλά λιγότερο χρόνο. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου στο συγκεκριμένο αλγόριθμο σταματά αυτόματα όταν διακοπεί η βελτίωση της γενίκευσης, γεγονός που υποδεικνύεται από την αύξηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος των δειγμάτων επικύρωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πρώτη περίπτωση δοκιμών.



Εικόνα 5.14: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο LM



Εικόνα 5.15: Ιστόγραμμα σφαλμάτων για τον αλγόριθμο LM

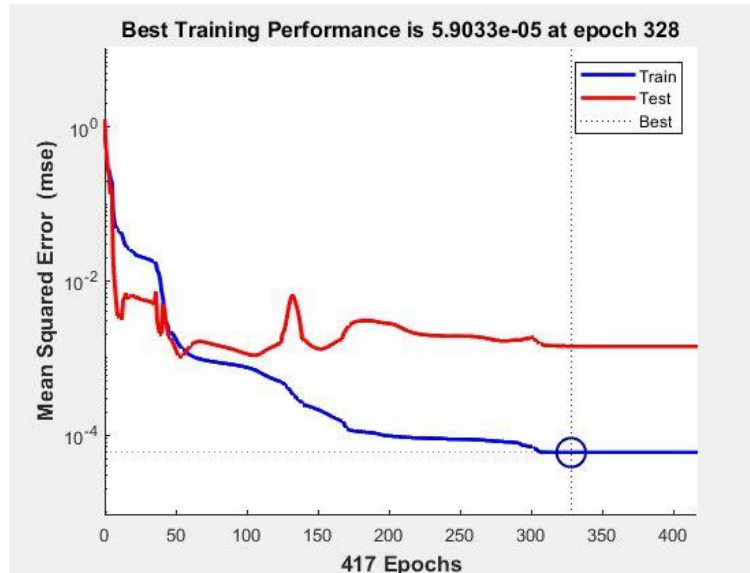


Εικόνα 5.16 Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο LM

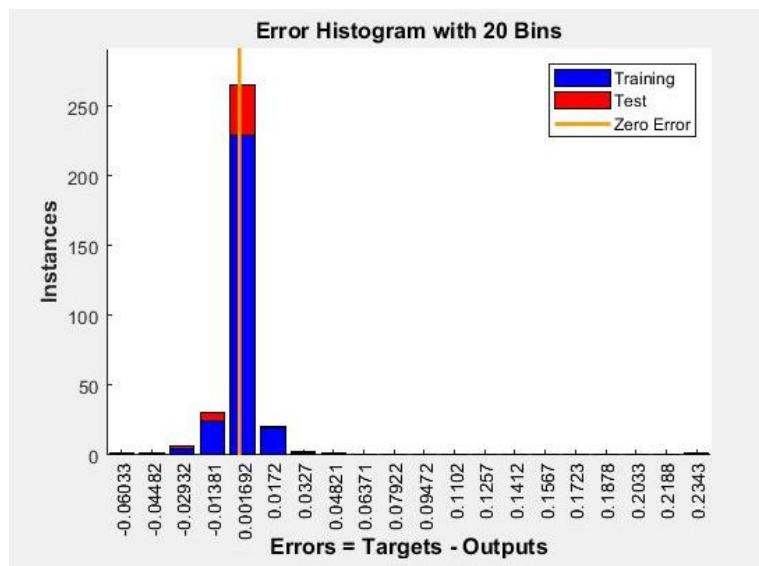
Συνοπτικά, από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 21 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων επικύρωσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα 0.014172 στην 15^η εποχή. Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται το εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.1814 έως 0.2782. Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα εκπαίδευσης και επικύρωσης πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα, ωστόσο εξίσου καλά συσχετισμένα είναι και τα δείγματα ελέγχου καθώς και το σύνολο των δειγμάτων, εφόσον $R > 0.93$ ο οποίος είναι αποδεκτός.

Ο αλγόριθμος **Bayesian Regularization (BR)** απαιτεί συνήθως περισσότερο χρόνο, αλλά έχει τη δυνατότητα να εξάγει αποτελέσματα και να επιτευχθεί καλή γενίκευση αυτών για δύσκολα, μικρά ή θορυβώδη σύνολα δεδομένων. Η εκπαίδευση του

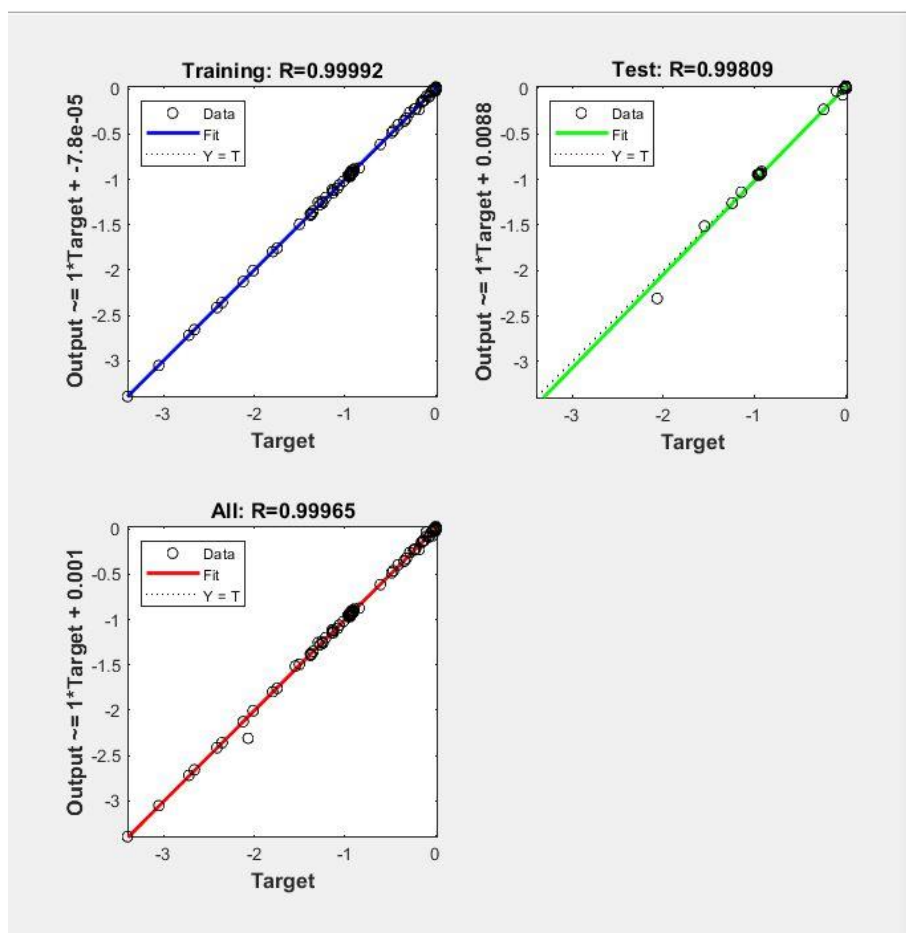
νευρωνικού δικτύου σταματά σύμφωνα με την προσαρμοστική ελαχιστοποίηση του βάρους (κανονικοποίηση). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πρώτη περίπτωση δοκιμών.



Εικόνα 5.17: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο BR



Εικόνα 5.18: Ιστόγραμμα σφαλμάτων για τον αλγόριθμο BR

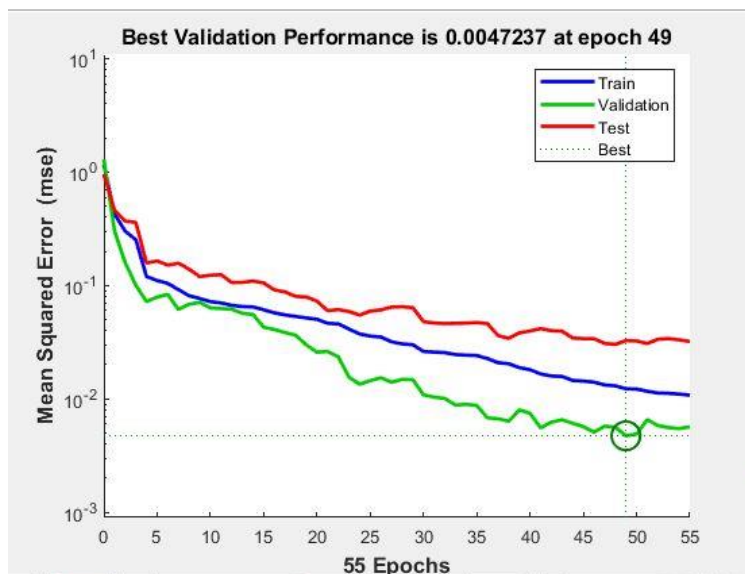


Εικόνα 5.19: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο BR

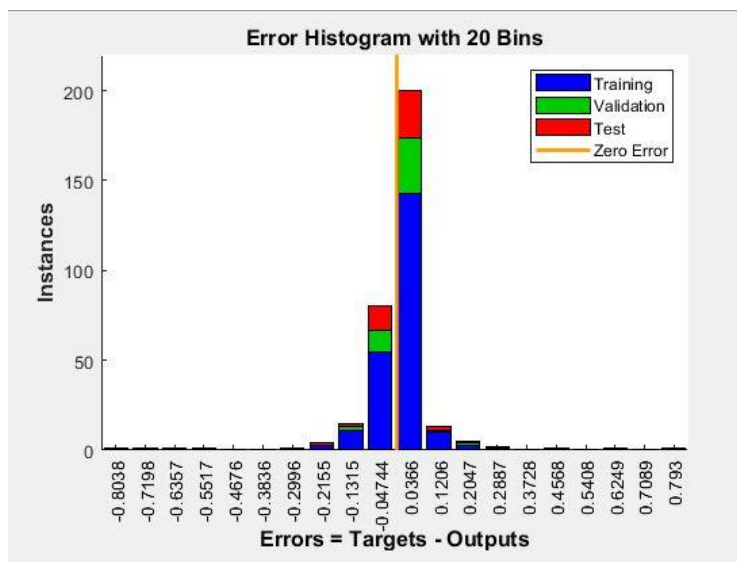
Συνοπτικά, από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 417 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων εκπαίδευσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα $5.9033 \cdot 10^{-5}$ στην 328^η εποχή. Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται το εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.06033 έως 0.04821, με μία ακραία τιμή σφάλματος 0.2343. Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα και στις τρεις περιπτώσεις εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα.

Ο αλγόριθμος **Scaled Conjugate Gradient (SCG)** απαιτεί λιγότερη μνήμη. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου στο συγκεκριμένο αλγόριθμο σταματά αυτόματα όταν διακοπεί η βελτίωση της γενίκευσης, γεγονός που υποδεικνύεται από την αύξηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος των δειγμάτων επικύρωσης. Παρακάτω

παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου για την πρώτη περίπτωση δοκιμών.



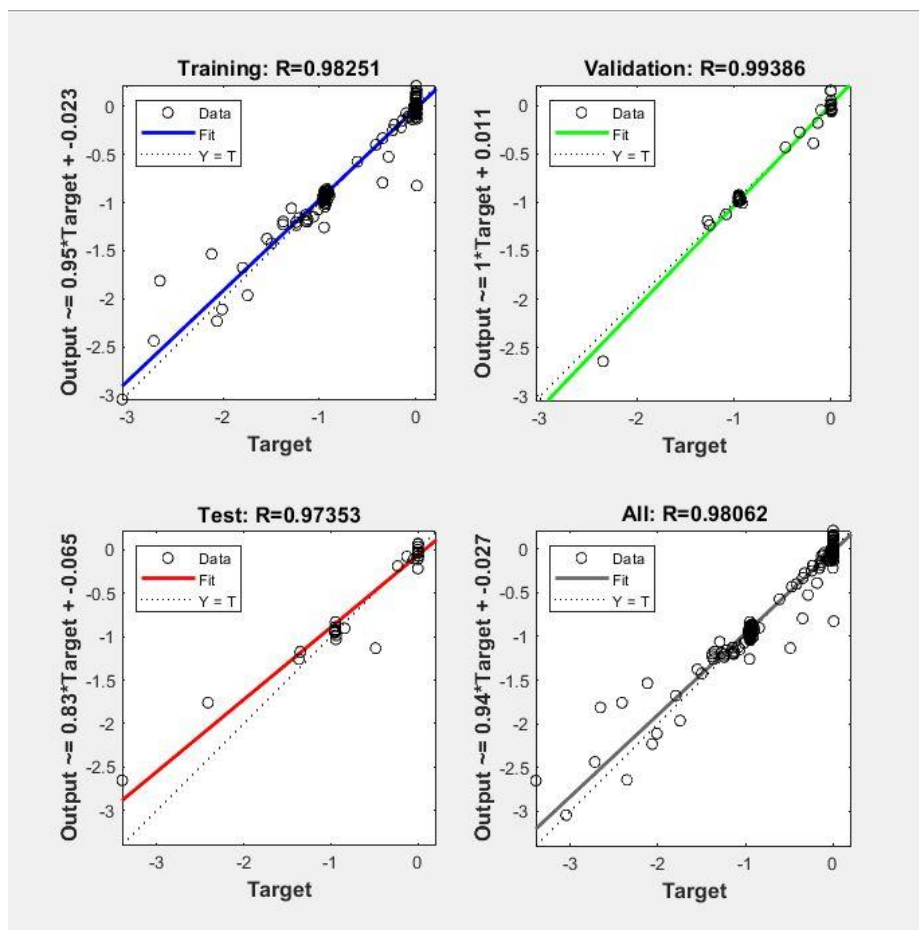
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο SCG



Εικόνα 5.21: Ιστόγραμμα σφαλμάτων για τον αλγόριθμο SCG

Συνοπτικά, από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 55 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων επικύρωσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα 0.0047237 στην 49^η εποχή.

Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται το εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.8038 έως 0.793.



Εικόνα 5.22: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο SCG

Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα εκπαίδευσης και επικύρωσης πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα, ωστόσο εξίσου καλά συσχετισμένα είναι και τα δείγματα ελέγχου καθώς και το σύνολο των δειγμάτων, εφόσον $R > 0.93$ ο οποίος είναι αποδεκτός.

Το επόμενο βήμα, εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία εκπαίδευσης με τους τρεις αλγόριθμους, είναι ο έλεγχος της ικανότητας πρόβλεψης δεδομένων της κάθε περίπτωσης νευρωνικού δικτύου. Για το λόγο αυτό εκτελέστηκαν ακολουθώντας τη διαδικασία που αναφέρεται στην ενότητα 5.2 ένα σύνολο 5 αναλύσεων με σκοπό την εξαγωγή μετατοπίσεων της ιζηματογενούς στρώσης και παραμορφώσεων του αγωγού, για τα εξής χαρακτηριστικά του πάχους ιζηματογενούς στρώσης (H), γωνίας εσωτερικής τριβής (ϕ) και συνοχή (c):

H	ϕ	c
45	16	20
50	12	20
60	10	30
75	20	50
100	30	40

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν αποτελούν διαφορετικούς συνδυασμούς από αυτούς που έχουν ήδη μελετηθεί στις 109 αναλύσεις, ωστόσο ανήκουν εντός των ορίων των τιμών τους. Στη συνέχεια, για τα ίδια δεδομένα εξήχθησαν μέσω του λογισμικού MATLAB, τα αποτελέσματα σύμφωνα με το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για κάθε περίπτωση αλγόριθμου εκπαίδευσης, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το σφάλμα πρόβλεψης μεταξύ της αρχικής τιμής που προέκυψε από το περιβάλλον του ABAQUS και της τελικής από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.4: Δεδομένα ελέγχου της ικανότητας πρόβλεψης των αλγόριθμων εκπαίδευσης του Νευρωνικού Δικτύου

ABAQUS							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	training	70%
45	16	20	-0.9405	-0.0279	0.0008	validation	15%
50	12	20	-0.9351	-0.1929	0.0008	testing	15%
60	10	30	-0.9224	-0.3662	0.0011	hidden layer	10
75	20	50	-0.9499	0.0007	0.0016		
100	30	40	-0.9527	0.0032	0.0013		

Αλγόριθμος Levenberg-Marquardt (LM)							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1 (%)	σφάλμα e11 (%)
45	16	20	-0.8956	-0.0618	0.0015	4.78	82.68
50	12	20	-0.8967	-0.1189	0.0013	4.11	59.29
60	10	30	-0.9203	-0.2625	0.0016	0.23	41.16
75	20	50	-0.9376	0.0013	0.0017	1.29	6.78
100	30	40	-0.9519	0.0100	0.0014	0.09	7.21

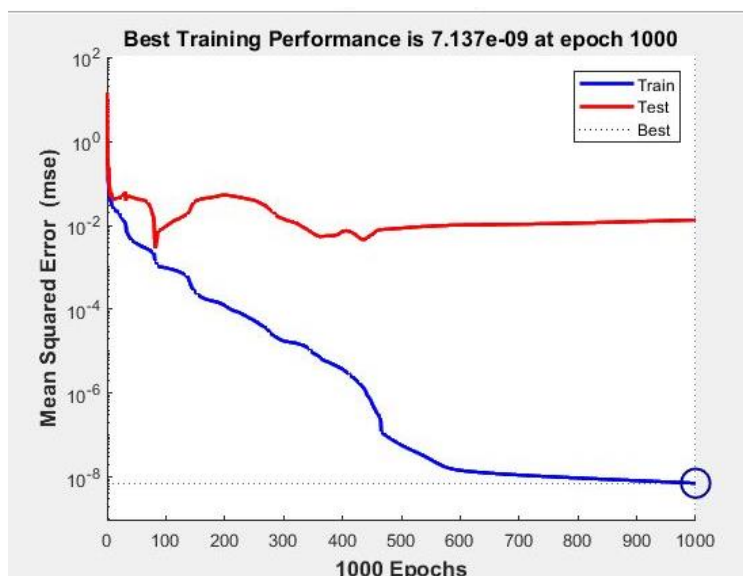
Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR)							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1 (%)	σφάλμα e11 (%)
45	16	20	-0.9355	-0.0178	0.0014	0.54	70.50
50	12	20	-0.9243	-0.0595	0.0014	1.16	71.55
60	10	30	-0.9248	-0.2064	0.0015	0.26	32.34
75	20	50	-0.9529	-0.0011	0.0014	0.32	12.06
100	30	40	-0.9538	0.0043	0.0013	0.11	0.44

Αλγόριθμος Scaled Conjugate Gradient (SCG)							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1 (%)	σφάλμα e11 (%)
45	16	20	-0.9339	-0.0925	0.0010	0.70	20.98
50	12	20	-0.9400	-0.0869	0.0011	0.53	30.17
60	10	30	-0.9770	-0.2438	0.0010	5.92	11.83
75	20	50	-0.9559	0.0044	0.0002	0.64	88.97
100	30	40	-0.9441	-0.0281	-0.0002	0.91	117.12

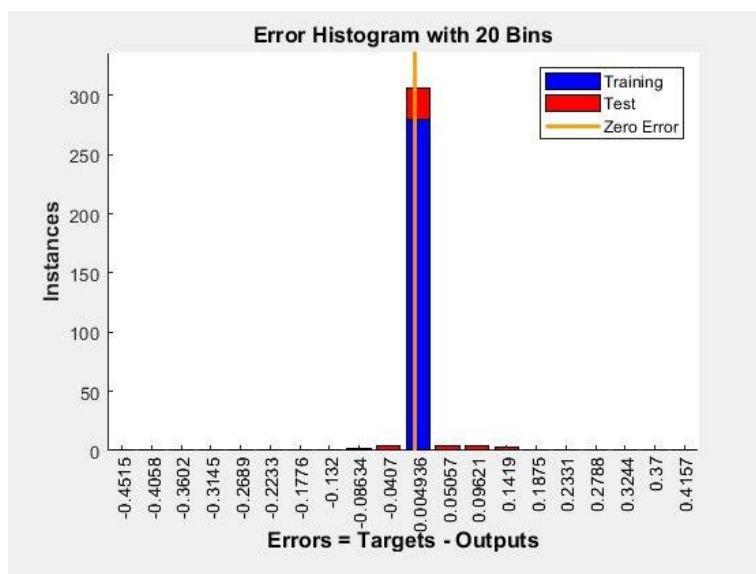
Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω στοιχεία καθώς επίσης και με αναφορές σχετικές στο θεωρητικό κεφάλαιο που σχετίζεται με τους αλγόριθμους εκπαίδευσης, διαπιστώνουμε ότι ο αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR) θεωρείται ως μια από τις καλύτερες προσεγγίσεις για να ξεπεραστεί το σύνηθες πρόβλημα των νευρωνικών δικτύων, το οποίο είναι η βέλτιστη λύση να οδηγήσει σε υπερπροσαρμογή (over-fitting). Συγκριτικά με τους υπόλοιπους αλγόριθμους απαιτεί περισσότερο χρόνο εκπαίδευσης, αλλά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε δύσκολες, μικρές ή ακόμη και «θορυβώδεις» ομάδες δεδομένων. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η προσέγγιση του ως προς την οριζόντια μετατόπιση (U1) είναι αρκετά καλή έχοντας ελαχιστοποιήσει σε αρκετά μεγάλο βαθμό το σφάλμα. Όσον αφορά τα σφάλματα των παραμορφώσεων είναι σχετικά μεγάλα όμως συγκριτικά με τους άλλους δύο αλγόριθμους παρουσιάζει σε σύνολο καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, σημαντικό να αναφερθεί ότι και στις τρεις περιπτώσεις υπάρχει μια αδυναμία προσέγγισης για την κατακόρυφη μετατόπιση (U2), γι' αυτό κρίθηκε σωστό να μην προσδιοριστούν στη μελέτη τα αντίστοιχα σφάλματα διότι δε θα βοηθούσαν σε ορθά συμπεράσματα. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι εφόσον ο Bayesian Regularization (BR) εξάγει όσο το δυνατό καλύτερα αποτελέσματα τότε δόκιμο είναι με δεδομένο τον συγκεκριμένο αλγόριθμο να τροποποιηθούν ορισμένοι παράμετροι για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων με σκοπό την προσπάθεια βελτίωσης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε αρχικά τροποποίηση στην αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου και επιλέχθηκαν δύο τιμές αρκετά μεγαλύτερες από την αρχική καθορισμένη, τα 50 και στη συνέχεια τα 150 κρυφά επίπεδα. Διατηρώντας ωστόσο τις καθορισμένες τιμές στα δείγματα (70%-15%-15%). Στη συνέχεια, τροποποιήθηκαν τα δείγματα αυτά και υλοποιήθηκαν δύο διαφορετικές δοκιμές, μια σχετικά κοντά στις αρχικές εκτιμήσεις και μια στα όρια των επιτρεπόμενων τιμών τους. Η πρώτη δοκιμή υλοποιήθηκε για δείγματα εκπαίδευσης 40%, δείγματα επικύρωσης 30% και δείγματα ελέγχου 30% ενώ η δεύτερη δοκιμή για ποσοστά 85%, 5% και 10% σε αντιστοιχία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατόπιν εκπαίδευσης του κάθε νευρωνικού δικτύου.

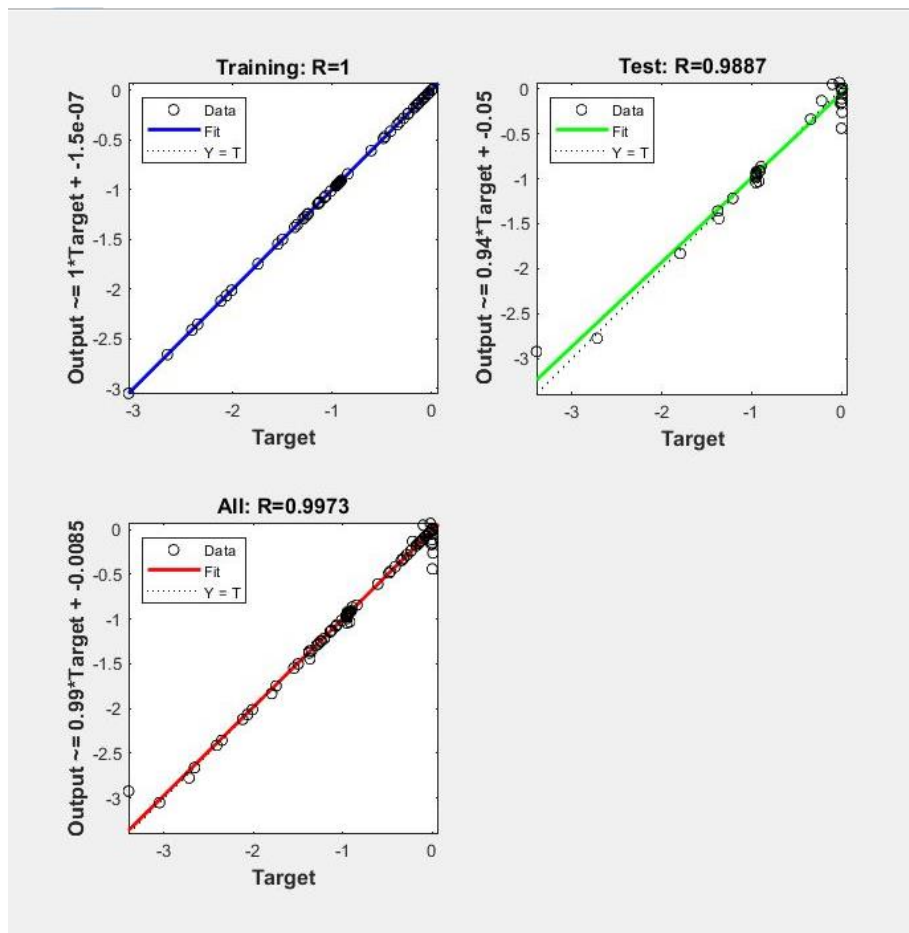
Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR) – 50 κρυφά επίπεδα



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο BR- 50 hidden layers



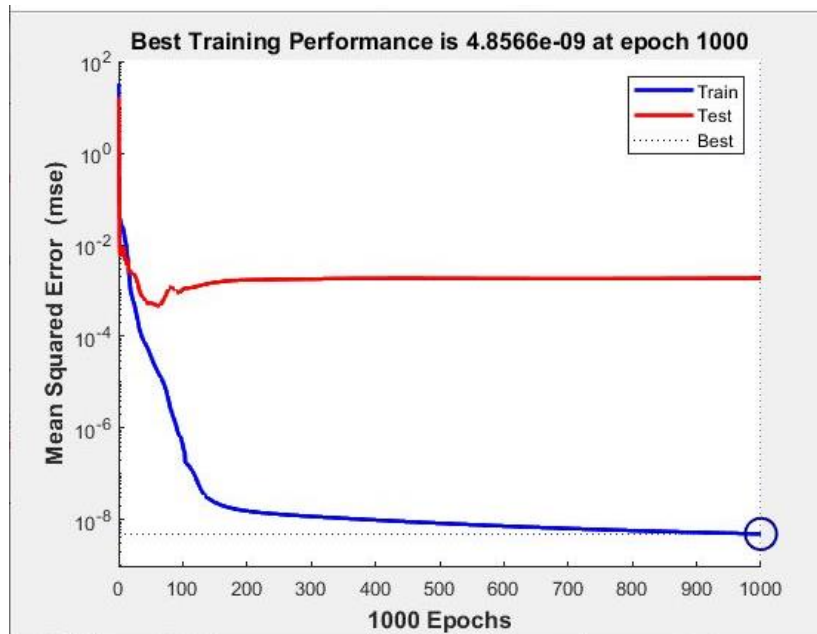
Εικόνα 5.24: Ιστόγραμμα σφαλμάτων για τον αλγόριθμο BR-50 hidden layers



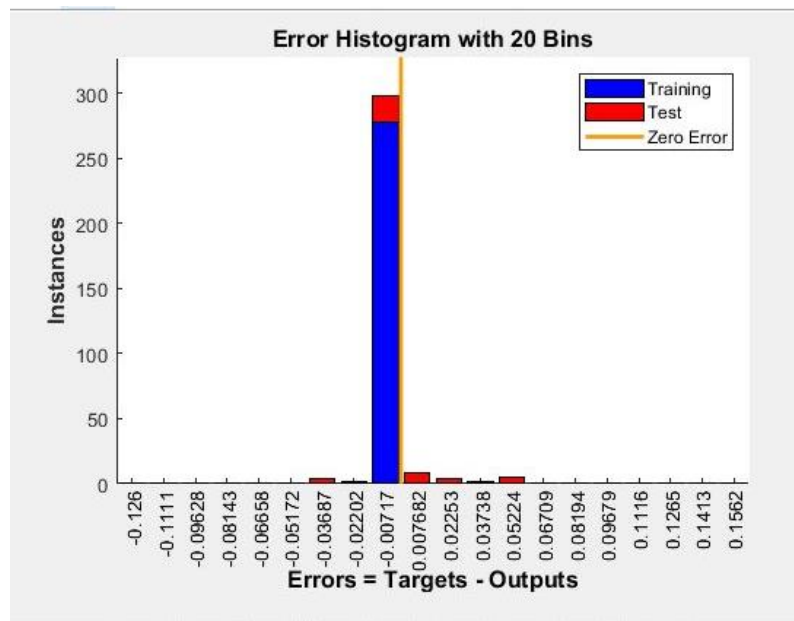
Εικόνα 5.25: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο BR-50 hidden layers

Συνοπτικά, από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 1000 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων εκπαίδευσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα $7.137 * 10^{-9}$ στην 1000^η εποχή. Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται το εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.08634 έως 0.1419. Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα και στις τρεις περιπτώσεις πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα.

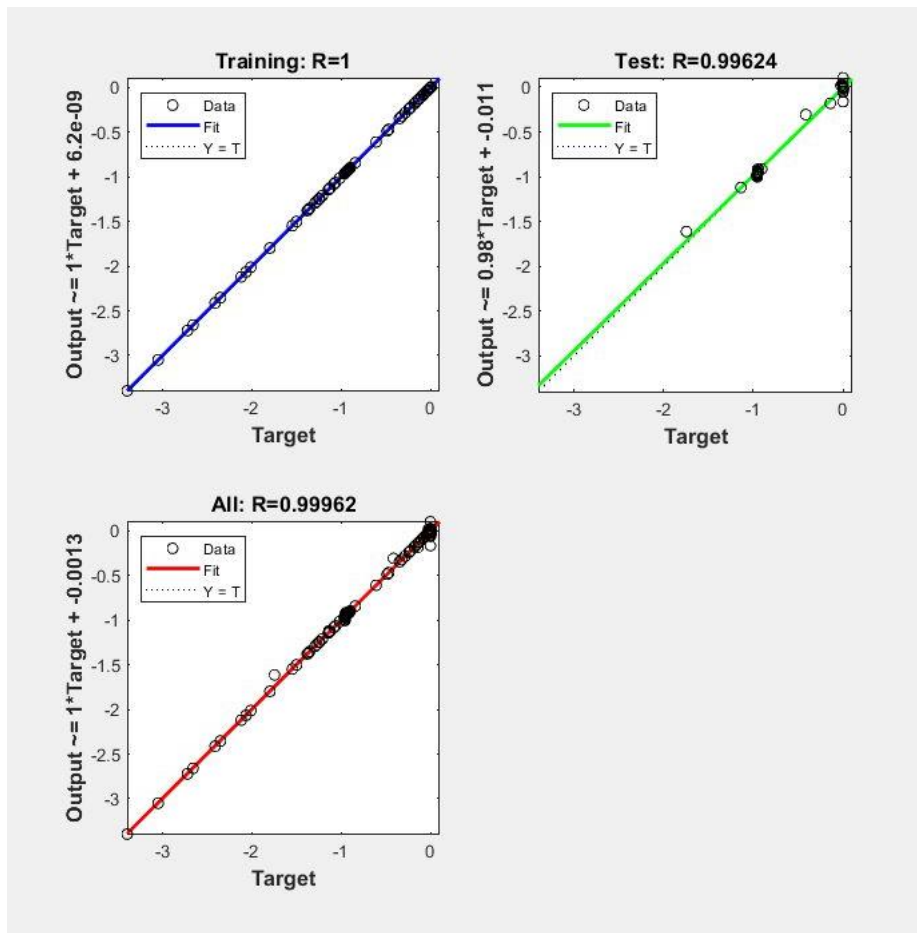
Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR) – 150 κρυφά επίπεδα



Εικόνα 5.26: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο BR- 150 hidden layers



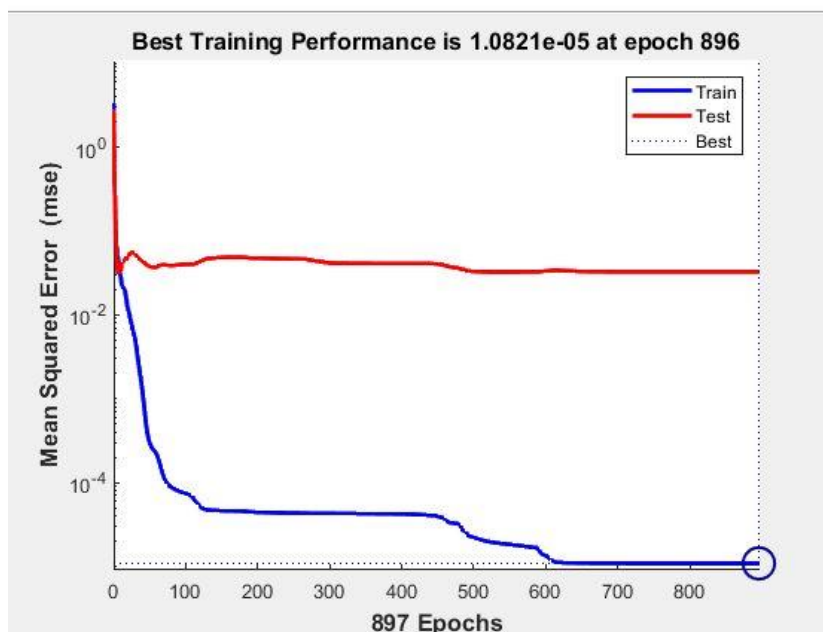
Εικόνα 5.27: Ιστόγραμμα σφαλμάτων για τον αλγόριθμο BR-150 hidden layers



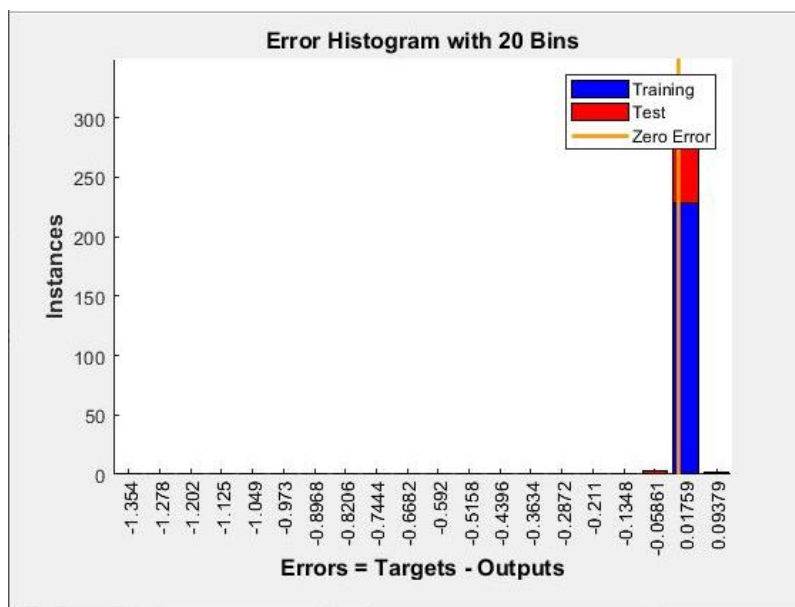
Εικόνα 5.28: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο BR-150 hidden layers

Από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 1000 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων εκπαίδευσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα $4.8566 \cdot 10^{-9}$ στην 1000^η εποχή. Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται το εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.3687 έως 0.05224. Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα και στις τρεις περιπτώσεις πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα.

Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR) – ποσοστά δειγμάτων (40/30/30)



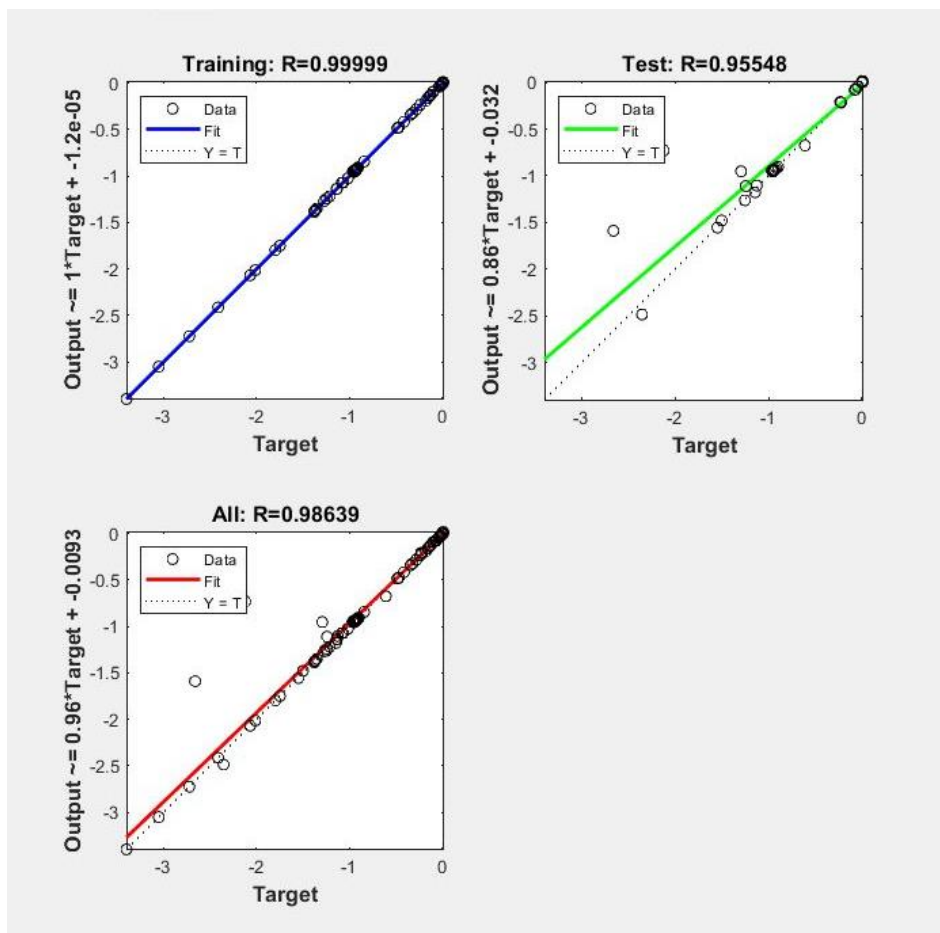
Εικόνα 5.29: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο BR - training:40%, validation: 30%, testing: 30%



Εικόνα 5.30: Ιστογράμμο σφαλμάτων για τον αλγόριθμο BR - training:40%, validation: 30%, testing: 30%

Από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 897 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων

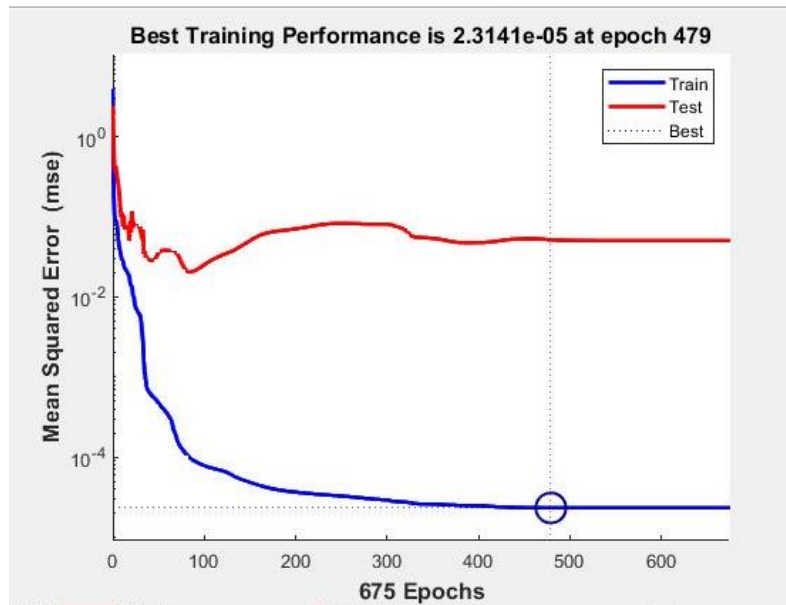
εκπαίδευσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα $1.0821 \cdot 10^{-5}$ στην 896^η εποχή. Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται ο εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.05861 έως 0.09379.



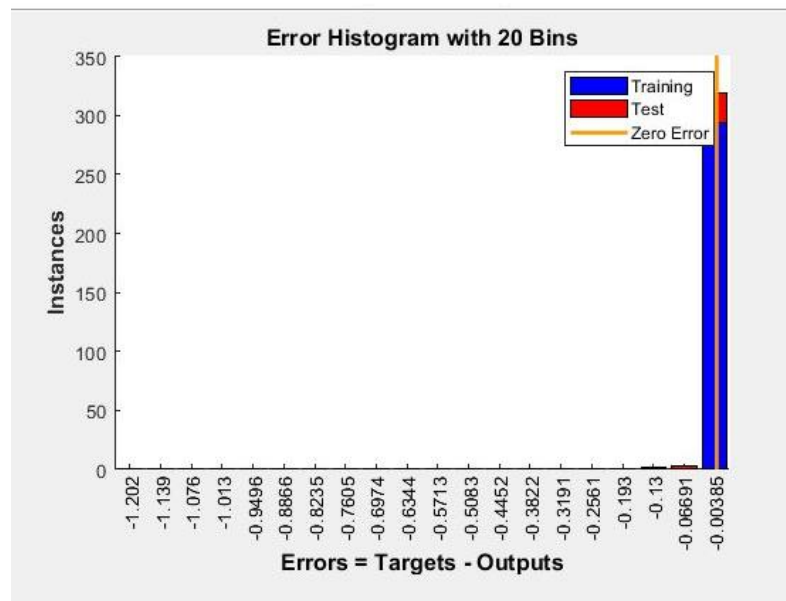
Εικόνα 5.31: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο BR - training:40%,validation: 30%, testing: 30%

Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα και στις τρεις περιπτώσεις πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα.

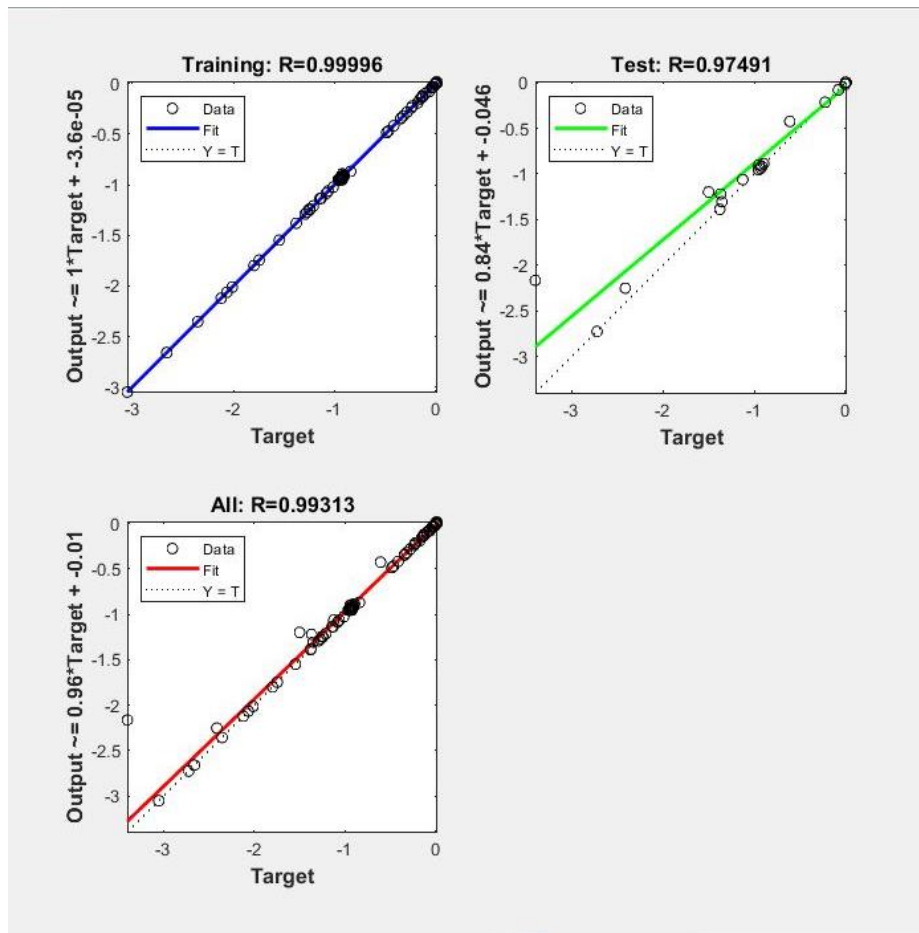
Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR) – ποσοστά δειγμάτων (85/5/10)



Εικόνα 5.32: Διάγραμμα αποδοτικότητας για τον αλγόριθμο BR - training:85%, validation: 5%, testing: 10%



Εικόνα 5.33: Ιστογράμμο σφαλμάτων για τον αλγόριθμο BR - training:85%, validation: 5%, testing: 10%



Εικόνα 5.34: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης για τον αλγόριθμο BR - training:85%,validation: 5%, testing:10%

Από τα διαγράμματα αυτά αντιλαμβανόμαστε ότι το βέλτιστο σφάλμα στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε στις 675 εποχές, όπου και σταμάτησε η διαδικασία εκπαίδευσης. Ωστόσο, η μέγιστη αποδοτικότητα των δειγμάτων εκπαίδευσης σύμφωνα με το διάγραμμα απέδωσε σφάλμα $2.3141 * 10^{-5}$ στην 479^η εποχή. Στη συνέχεια, στο ιστόγραμμα απεικονίζεται το εύρος σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων στόχου και τις τελικές εξόδους, το σφάλμα αυτό κυμαίνεται από -0.0385 έως -0.13. Τέλος, από τα διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει ότι τα δείγματα και στις τρεις περιπτώσεις πλησιάζουν τη βέλτιστη συσχέτιση εφόσον ο συντελεστής τους (R) ισούται με τιμές αρκετά κοντά στη μονάδα.

Συνεπώς, για τις περιπτώσεις αυτές εφόσον ολοκληρώθηκε η εκπαίδευση τους, εκτελέστηκαν ομοίως με προηγουμένως τα ίδια δεδομένα εισόδου των H,φ,c στο λογισμικό MATLAB, με σκοπό τη σύγκριση των σφαλμάτων που προκύπτουν ανάμεσα

στις τιμές αυτές και των αρχικών τιμών που εξήχθησαν από το περιβάλλον του ABAQUS.

Πίνακας 5.5: Δεδομένα ελέγχου της ικανότητας πρόβλεψης του αλγόριθμου Bayesian Regularization

ABAQUS					
H	ϕ	c	U1	U2	E11
45	16	20	-0.9405	-0.0279	0.0008
50	12	20	-0.9351	-0.1929	0.0008
60	10	30	-0.9224	-0.3662	0.0011
75	20	50	-0.9499	0.0007	0.0016
100	30	40	-0.9527	0.0032	0.0013

Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR)-50 HL							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1(%)	σφάλμα e11(%)
45	16	20	-0.9378	-0.0206	0.0008	0.29	2.57
50	12	20	-0.9524	-0.1515	0.0008	1.85	1.97
60	10	30	-0.9403	-0.3663	0.0010	1.94	11.78
75	20	50	-0.9378	-0.0597	0.0017	1.27	6.78
100	30	40	-0.9356	0.1086	0.0014	1.80	7.21

Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR)-150 HL							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1(%)	σφάλμα e11(%)
45	16	20	-0.9401	-0.0287	0.0008	0.05	2.57
50	12	20	-0.9287	-0.1202	0.0008	0.68	1.97
60	10	30	-0.9169	-0.3255	0.0011	0.60	2.95
75	20	50	-0.9489	-0.0096	0.0017	0.10	6.78
100	30	40	-0.948	0.0127	0.0015	0.50	14.87

Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR)- TR:40%, VAL:30%, TEST:30%							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1(%)	σφάλμα e11(%)
45	16	20	-0.9355	-0.0341	0.0016	0.54	94.86
50	12	20	-0.9406	0.0587	0.0015	0.59	83.80
60	10	30	-0.9527	-0.0396	0.0014	3.28	23.51
75	20	50	-0.9281	-0.3086	0.0014	2.29	12.06
100	30	40	-0.9532	0.0053	0.0013	0.05	0.44

Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR)- TR:85%, VAL:5%, TEST:10%							
H	ϕ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1(%)	σφάλμα e11(%)
45	16	20	-0.9338	-0.0336	0.0014	0.72	70.50
50	12	20	-0.9182	-0.1956	0.0014	1.81	71.55
60	10	30	-0.9238	-0.4071	0.0013	0.15	14.69
75	20	50	-0.9512	0.0044	0.0014	0.14	12.06
100	30	40	-0.951	0.0034	0.0014	0.18	7.21

Συμπερασματικά, για την πρώτη περίπτωση δοκιμών, τροποποιώντας την αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου, διαπιστώθηκε ότι υπήρξε αύξηση του χρόνου εκπαίδευσης. Ωστόσο, δε θεωρήθηκε ιδιαίτερα σημαντική ώστε να αντιμετωπιστεί πρόβλημα για την επιτυχή διεξαγωγή της εκπαίδευσης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του πίνακα αποδεικνύουν ότι οι τροποποιήσεις αυτές βοήθησαν σημαντικά στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Ειδικότερα, με την μεγαλύτερη αύξηση των κρυφών επιπέδων, δηλαδή 150 κρυφά επίπεδα, παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα του νευρωνικού δικτύου εξήχθησαν με μικρές διαφορές συγκριτικά με τις αρχικές τιμές στο ABAQUS. Όσον αφορά την οριζόντια μετατόπιση τα σφάλματα κυμαίνονται από 0.05% έως 0.68%, διαμορφώνοντας ένα αρκετά καλό αποτέλεσμα, ενώ σχετικά με τις παραμορφώσεις του αγωγού τα σφάλματα κυμαίνονται σε ένα ανεκτό εύρος από 1.97% έως 6.78%, με μια τιμή μόνο πιο υψηλή για την τελευταία περίπτωση της τάξεως του 15%. Η ανταπόκριση της τροποποίησης αυτής οδήγησε στη δοκιμή της αύξησης στα 200 κρυφά επίπεδα, ωστόσο κατόπιν περάτωσης της εκπαίδευσης δε διαπιστώθηκε βελτίωση στα αποτελέσματα, αντιθέτως στις τιμές των μετατοπίσεων υπήρξε χειροτέρευση γεγονός που πιθανά οφείλεται στην υπερ-προσαρμογή των δεδομένων (overfitting).

Στη συνέχεια, για τη δεύτερη περίπτωση δοκιμών τροποποιώντας τα ποσοστά των δειγμάτων, δε διαπιστώθηκαν σημαντικές αλλαγές συγκριτικά με την πρώτη απόπειρα του αλγορίθμου με τις καθορισμένες τιμές. Τα ποσοστά σφάλματος παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα επομένως δε θεωρήθηκε αναγκαία οποιαδήποτε άλλη τροποποίηση.

Τελικό βήμα με σκοπό τον ολοκληρωμένο έλεγχο της απόδοσης των νευρωνικών δικτύων, ήταν η δοκιμή για την ικανότητα πρόβλεψης τους για δεδομένα τα οποία δεν ανήκουν στα όρια των δειγμάτων εισόδου των 109 αναλύσεων. Για την υλοποίηση ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με προηγουμένως. Ειδικότερα, προσδιορίστηκαν οι ζητούμενες τιμές μέσω του λογισμικού ABAQUS και στη συνέχεια εξήχθησαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα αξιοποιώντας το ήδη εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, με χρήση του ικανότερου αλγόριθμου εκπαίδευσης Bayesian Regularization (BR) και 150 κρυφά επίπεδα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 5.6: Δεδομένα ελέγχου (εκτός των ορίων των δειγμάτων εισόδου του T.N.Δ.) της ικανότητας πρόβλεψης του αλγόριθμου Bayesian Regularization με 150 κρυφά επίπεδα

ABAQUS					
H	φ	c	U1	U2	E11
300	24	35	-0.9133	0.0571	0.0009
600	24	35	-0.8114	0.3132	0.0010
900	24	35	-0.7672	0.6424	0.0010

Αλγόριθμος Bayesian Regularization (BR)-150 HL							
H	φ	c	U1	U2	E11	σφάλμα u1(%)	σφάλμα e11(%)
300	24	35	-0.9783	1.3195	0.0030	7.12	219.32
600	24	35	-1.1499	-1.0659	0.0020	41.71	106.56
900	24	35	-1.3176	-2.0451	0.0017	71.75	76.85

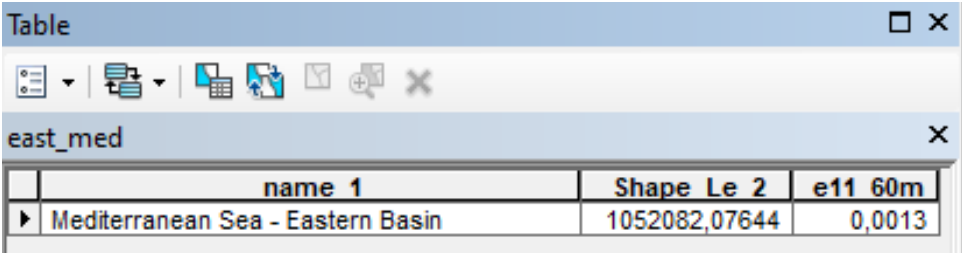
Παρατηρούμε λοιπόν, ότι το νευρωνικό δίκτυο αδυνατεί να προβλέψει δεδομένα τα οποία βρίσκονται εκτός των ορίων των δεδομένων εισόδου. Τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν είναι αρκετά μεγάλα και ειδικότερα στην περίπτωση των παραμορφώσεων του αγωγού. Συνεπώς, αντιλαμβανόμαστε ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι χρήσιμα για την πρόβλεψη δεδομένων που βρίσκονται εντός του εύρους των δεδομένων εκπαίδευσης.

5.4. Έλεγχος Έγκρισης Διασταύρωσης Αγωγού με Γεωκίνδυνο

Τελικό στάδιο της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος της επιτρεπόμενης ή μη διασταύρωσης του αγωγού με τον υπό μελέτη ανά περίπτωση γεωκίνδυνο. Έπειτα λοιπόν, από την εξαγωγή των μέγιστων παραμορφώσεων (e11) που υπόκεινται ο αγωγός κατόπιν καταπονήσεως του, αναγκαία θεωρήθηκε η εισαγωγή τους στο λογισμικό ArcMap με σκοπό τον έλεγχο τους. Πιο συγκεκριμένα, το επιτρεπόμενο όριο για τις παραμορφώσεις των αγωγών ανέρχεται στο 0.5%, άρα γίνεται αντιληπτό ότι οι εξαγόμενες παραμορφώσεις πρέπει να δίνουν τιμές κάτω του 0.005 ώστε να μπορεί να επιτραπεί να διαπεράσει ο αγωγός τον γεωκίνδυνο χωρίς να υποστεί μεγάλη επιβάρυνση. Συνεπώς, ανατρέχοντας στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας όπου παρατίθενται το σύνολο των 109 αναλύσεων, διαπιστώνεται ότι όλες οι παραμορφώσεις τηρούν τον περιορισμό αυτόν. Επομένως, για την απόδειξη της συγκεκριμένης εφαρμογής μέσω του ArcMap, επιλέχθηκε μια ενδεικτική περίπτωση για πάχος ιζηματογενούς στρώσης H=60 m, γωνία εσωτερικής τριβής φ=16° και

συναχγή $c=35$ kPa, η οποία εξήγαγε ως μέγιστη παραμόρφωση αγωγού την τιμή $e_{11}=0.0013$.

Αρχικά, για την υλοποίηση της διαδικασίας έγκρισης της διασταύρωσης στο ArcMap, έγινε εισαγωγή της μέγιστης παραμόρφωσης στον Attribute Table του ρήγματος, ο οποίος απεικονίζεται στην εικόνα.

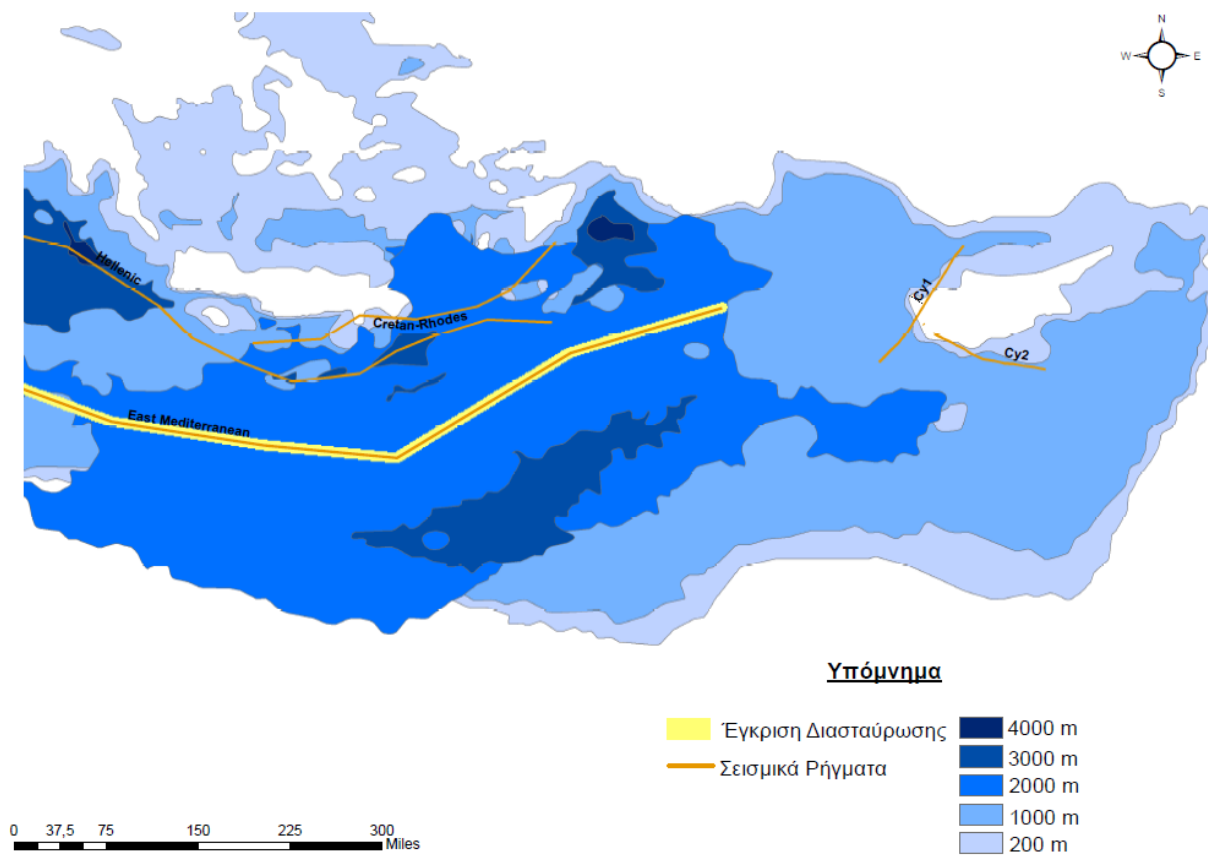


	name 1	Shape Le 2	e11 60m
▶	Mediterranean Sea - Eastern Basin	1052082,07644	0,0013

Εικόνα 5.35: Εισαγωγή παραμόρφωσης αγωγού στον Attribute table του γεωκινδύνου East Mediterranean

Στη συνέχεια, διαμορφώθηκε μια ζώνη γύρω από τον επιμέρους γεωκίνδυνο με χρήση του εργαλείου Buffer, η οποία συνέβαλε στην πορεία στην απεικόνιση της έγκρισης με το αντίστοιχο χρώμα. Το επόμενο βήμα ήταν η αξιοποίηση του εργαλείου Raster Calculator μέσω του οποίου διαμορφώθηκε μια συνθήκη ελέγχου με χρήση της συνάρτησης συγκρίσεων Con. Στη συνθήκη αυτή υλοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ της προκείμενης παραμόρφωσης του αγωγού με το αντίστοιχο επιτρεπόμενο όριο 0.005, δίνοντας το δικαίωμα εξαγωγής δύο περιπτώσεων, μία για την έγκριση με κίτρινο χρώμα και μια για την απόρριψη με μαύρο χρώμα. Συνεπώς, η παραμόρφωση έγινε αποδεκτή για το γεωκίνδυνο όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.

Τέλος, σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαδικασία περατώθηκε για έναν γεωκίνδυνο, τον East Mediterranean, όπως επίσης και για μια ενδεικτική τιμή παραμόρφωσης αγωγού. Ωστόσο, για κάθε περίπτωση ακολουθείται όμοια διαδικασία μέσω της οποίας διαπιστώθηκε ότι για όλους τους συνδυασμούς ο αγωγός μπορεί να διασχίσει και τους πέντε μελετώμενους γεωκινδύνους, εφόσον οι παραμορφώσεις του δε δύναται να οδηγήσουν σε καταστροφικά αποτελέσματα γι' αυτόν.



Εικόνα 5.36: Απεικόνιση έγκρισης διασταύρωσης αγωγού με το ρήγμα *East Mediterranean*

6. Γενικά Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις

Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία είναι ότι η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών αποτελεί επιτακτική ανάγκη σήμερα και θεωρείται σκόπιμο να κατασκευαστούν περισσότεροι αγωγοί στο άμεσο μέλλον. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των υποθαλάσσιων αγωγών είναι οι γεωκίνδυνοι που συναντώνται κατά τη δημιουργία της χάραξης τους. Συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης της Μεσογείου θάλασσας αποτελείται από ένα μεγάλο σύνολο σεισμικών φαινομένων και ειδικότερα ενεργών σεισμικών ρηγμάτων. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη μελέτη έγινε κατανοητή η διάρρηξη ενός ανάστροφου ρήγματος με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων και μετέπειτα η καταπόνηση του υποθαλάσσιου αγωγού κατόπιν διασταύρωσης με το προκείμενο ρήγμα, εξάγοντας τις προκαλούμενες παραμορφώσεις του. Σύμφωνα με την εργασία αυτή το συμπέρασμα που προέκυψε από το τελευταίο κεφάλαιο είναι η ικανότητα διάσχισης του αγωγού από τους μελετώμενους γεωκινδύνους χωρίς να προκαλείται επιβλαβής επιβάρυνση σε αυτόν.

Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας που σχετίζεται με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα αποδείχθηκε η ικανότητα πρόβλεψης των αποτελεσμάτων ενός εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου για δεδομένα εντός των ορίων των αναλύσεων της ιζηματογενούς στρώσης. Ωστόσο, για δεδομένα εκτός των ορίων αυτών προέκυψε ως συμπέρασμα η αδυναμία πρόβλεψής τους. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι λόγω αδυναμίας σύγκλισης ορισμένων αναλύσεων, ο μικρότερος αριθμός δεδομένων εισαγωγής των Νευρωνικών Δικτύων οδήγησε στην αύξηση του εξαγόμενου σφάλματος σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Επιπρόσθετα, από τη διαδικασία εκπαίδευσης συμπεραίνουμε ότι η τροποποίηση της αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου, δηλαδή των κρυφών επιπέδων, διαδραματίζει σημαντικό παράγοντα. Σύμφωνα με θεωρητικές έννοιες έγινε αντιληπτό ότι δεν υπάρχει ιδανική τιμή για τον ορισμό τους. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ωστόσο, ότι η λογική αύξηση τους εξάγει καλύτερα αποτελέσματα, σε αντίθεση με την υπερβολική τους αύξηση η οποία καταλήγει στην υπερπροσαρμογή του δικτύου. Επίσης, όσον αφορά τα δείγματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου διαπιστώθηκε ότι η τροποποίηση τους δε συμβάλει σημαντικά στη βελτιστοποίηση του σφάλματος. Σχετικά με τους αλγόριθμους εκπαίδευσης κρίθηκε αποτελεσματικότερος ο Bayesian Regularization (BR), ανεξάρτητα από την ελάχιστη πρόσθετη χρονική διάρκεια της υλοποίησής του, η οποία δεν αποτέλεσε παράγοντα απόρριψής του.

Ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα αρχικά ως προς το πρώτο μέρος της μελέτης που σχετίζεται με το ArcGIS είναι η εύρεση μιας μεθόδου ώστε να επιτευχθεί η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυτής. Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένα τα στοιχεία της αρχής και του πέρατος του υπό μελέτη αγωγού και των γεωκινδύνων, να δοθεί η δυνατότητα στο χρήστη αυτόματα να εξάγει τις προτεινόμενες χαράξεις. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μελέτη θα μπορούσε να υλοποιηθεί και για άλλο είδος γεωκινδύνου εκτός από τα ρήγματα όπως για παράδειγμα για τις κατολισθήσεις. Όσον αφορά τη μελέτη των δύο προσομοιωμάτων θα ήταν εφικτό και χρήσιμο σε μια επόμενη μελέτη να διερευνηθούν τα αποτελέσματα που εξάγονται έχοντας κανονικό ρήγμα κι όχι ανάστροφο όπως στην παρούσα εργασία. Επίσης, θα μπορούσαν να μελετηθούν διαφορετικά χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων όπως για παράδειγμα διαφορετικές ιδιότητες των υλικών. Τέλος, ως προς τα Νευρωνικά δίκτυα αρκετά σημαντική θεωρείται η δημιουργία ενός ακόμη κώδικα, μέσω του οποίου θα δίνεται η δυνατότητα αυτοματοποίησης της εισαγωγής και ταυτόχρονης εκτέλεσης των προσομοιωμάτων εντός του περιβάλλοντος του ABAQUS. Ακόμη, θα ήταν ενδιαφέρον να υλοποιηθούν επιπλέον τροποποιήσεις ως προς την αρχιτεκτονική του Νευρωνικού Δικτύου ή ως προς άλλων παραμέτρων του.

7. Βιβλιογραφία

- Jia Yonggang, Zhu Chaoqi, Liu Liping and Wang Dong, 2016, Marine Geohazards: Review and Future Perspective
- Qiang Bai, Yong Bai, 2014, Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation
- Mark J. Kaiser, 2020, The Offshore Pipeline Construction Industry
- Boyun Guo, Shanhong Song, Ali Ghalambor, Tian Ran Lin, 2014, Offshore Pipelines Design, Installation, and Maintenance
- American Bureau of Shipping, Subsea Pipeline Systems
- Ashish Payal, C.S. Rai, B.V.R. Reddy, 2013, Comparative Analysis of Bayesian Regularization and Levenberg-Marquardt Training Algorithm for Localization in Wireless Sensor Network
- Talha Ahmed Khan, Muhammad Alam, Zeeshan Shahid, M.S Mazliham, 2019, Comparative Performance Analysis of Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization and Scaled Conjugate Gradient for the Prediction of flash Floods
- Kasthurirangan Gopalakrishnan, 2010, Effect of training algorithms on neural networks aided pavement diagnosis
- Andrey Shichkin, Alexander Buevich, Alexander Sergeev, Elena Baglaeva, Irina Subbotina, Julian Vasilev, and Maria Kehayova-Stoycheva, Training algorithms for artificial neural network in predicting of the content of chemical elements in the upper soil layer
- Murat Kayri, 2016, Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data
- Daniel Graupe, 2013, Principles of Artificial Neural Networks (3rd edition)
- Leif Solberg and Erling Gjertviet, Statoil, 2007, Constructing the World's Longest Subsea Pipeline, Langeded Gas Export
- Neural Network Toolbox™ 7, User's Guide
- Neural Network Toolbox For Use with MATLAB
- Saurabh Karsoliya, 2012, Approximating Number of Hidden layer neurons in Multiple Hidden Layer BPNN Architecture
- ABAQUS/CAE User's Manual
- ABAQUS/CAE User's Guide

- Jianhua Wan, Guanghui Qi, Zhe Zeng, Shujuan Sun, The Application of AHP in Oil and Gas Pipeline Route Selection
- Abdul-Lateef Balogun, A Fuzzy-MCDM based GIS Model for Subsea Oil Pipeline Route Optimization: An Integrated Approach
- A. N. Matori, H. Y. Lee, 2016, Suitability Analysis of Subsea Pipeline Route using GIS
- Michael J. O'Rourke, (Jack) X. Liu, 2012, Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines
- D. T. M. Dominey-Howes, G. A. Papadopoulos, A. G. Dawson, 2000, Geological and Historical Investigation of the 1650 Mt. Columbo (Thera Island) Eruption and Tsunami, Aegean Sea, Greece
- Mark Randolph, Susan Gourvenec, 2011, Offshore Geotechnical Engineering
- Marc Spiller, Claudia Agudelo, 2011, Mapping diversity of urban metabolic functions – a planning approach for circular urban metabolism
- J S Wilburn, ARCO China Inc, Miao Yuan Fei, P.M. Roberts, 1995, Technical Challenges of the Yacheng 13-1, Pipelines Design and Construction
- Andrew C. Palmer and Roger A. King, Subsea Pipeline Engineering (2nd edition),
- Hideyuki O-tani, Muneo Hori and Lalith Wijerathne, 2018, Automated Model Construction for Seismic Disaster Assessment of Pipeline Network in Wide Urban Area,
- Κ. Σπυράκος, Ε. Τουτουδάκη, Βασικές Έννοιες Σεισμολογίας
- Μαρίνος Κάβουρας, Μαργαρίτα Κόκλα, Εισαγωγή στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών
- Κωνσταντίνος Μπούτικας, Χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων για το Βέλτιστο Σχεδιασμό Υποθαλάσσιων Ενεργειακών Δικτύων έναντι Γεωκινδύνων
- Χρίστος Χαλκιάς, Γεωγραφική Ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής
- Μαρίνος Κάβουρας, Αθανασία Δάρρα, Σοφία Κονταξάκη, Ελένη Τομαή, Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας- Αρχές και Τεχνολογίες
- Αθανασία Σκέντου, Νικόλαος Μάργαρης, Μαρία Γ. Δουβίκα, Ελισάβετ Βιντζηλαίου, Κωνσταντίνος Χ. Ρεπάπης, Βασίλειος Μώκος, Παναγιώτης Γ. Αστέρης, Εκτίμηση της Θλιπτικής Αντοχής του Σκυροδέματος με Χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

- Νικόλαος Μακράκης, Ανάπτυξη και Εφαρμογή Υπολογιστικού Εργαλείου για τη βελτιστοποίηση της χάραξης υποθαλάσσιων αγωγών και καλωδίων που υπόκεινται σε γεωκινδύνους
- Γεωργούλη Κατερίνα, 2015, Τεχνητή Νοημοσύνη (Μια εισαγωγική προσέγγιση)
- Ευστάθιος Αντωνίου, Νευρωνικά Δίκτυα στο MATLAB

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- racce.nhmc.uoc.gr
- www.marineregions.org
- www.natureearthdata.com
- info.nopsema.gov.au/offshore_projects
- www.gebco.net
- www.ngdc.noaa.gov
- www.britannica.com
- www.arcgis.com
- geodata.gov.gr
- www.data.gov.cy
- www.offshore-energy.biz
- ec.europa.eu
- en.wikipedia.org
- www.esri.com
- desktop.arcgis.com
- www.tap-ag.com

8. Παράρτημα

Αποτελέσματα πρώτου και δεύτερου προσομοιώματος

(μετατοπίσεις ιζηματογενούς στρώσης (U1,U2) , παραμορφώσεις αγωγού (e11))

H	φ	c	U1	U2	E11
30	8	15	-0.842178762	-0.125225753	0.00065953
30	16	15	-0.906623542	-0.009550454	0.000653823
30	24	15	-0.930996239	0.000000062	0.000651625
30	24	35	-0.922971308	0.000000066	0.001337571
30	32	15	-0.964564621	0.000000068	0.000648771
30	32	35	-0.942240834	0.000000071	0.001333781
30	40	15	-0.96288687	0.000000072	0.000648231
30	40	35	-0.946327925	0.000000073	0.001332184
45	8	15	-0.925159991	-0.321529955	0.000642344
45	8	35	-0.896652043	-0.221285507	0.001315392
45	8	55	-0.907399714	-0.139697134	0.001705117
45	8	75	-0.916562796	-0.076764688	0.001881419
45	8	95	-0.923179924	-0.032570835	0.001974748
45	16	15	-0.948281825	-0.043075919	0.000640575
45	16	35	-0.931484699	-0.002017894	0.001308223
45	16	55	-0.93478477	0.00001133	0.00170316
60	8	15	-0.946328104	-0.608596385	0.000630088
60	8	35	-0.911396086	-0.467156857	0.001283384
60	8	55	-0.915067613	-0.344374359	0.001709155
60	8	75	-0.922794998	-0.240247056	0.001884818
60	8	95	-0.928443909	-0.154858336	0.001976373
60	16	15	-0.950300813	-0.100600511	0.000629285
60	16	35	-0.936964631	-0.023843043	0.001275072
60	16	55	-0.942258477	0.000146743	0.001705694
60	16	75	-0.944744408	0.000147749	0.001883817
60	16	95	-0.946141541	0.000148591	0.001976413
60	24	15	-0.956492603	0.000149903	0.00062765
60	24	35	-0.948954582	0.000150801	0.001270295
60	24	55	-0.949314773	0.000151037	0.001705814
60	24	75	-0.949598074	0.000151218	0.00188428
60	24	95	-0.949830949	0.000151364	0.001976843
60	32	15	-0.955801308	0.000151765	0.000627236
60	32	35	-0.95070684	0.000151982	0.001269351
60	32	55	-0.950782001	0.000152048	0.001705919
60	32	75	-0.950887382	0.000152104	0.001884445
60	32	95	-0.950972617	0.000152145	0.001976996
60	40	15	-0.955412269	0.000152686	0.000627011
60	40	35	-0.951738358	0.000152512	0.001269009

60	40	55	-0.951515257	0.000152525	0.001705879
60	40	75	-0.951576531	0.000152553	0.001884416
60	40	95	-0.951633692	0.000152577	0.001976953
105	8	15	-1.131954193	-2.011769772	0.000597597
105	8	35	-1.13777411	-1.746784568	0.001191807
105	8	55	-1.124940634	-1.500437856	0.001603408
105	8	75	-1.080705881	-1.2727319	0.001874331
105	8	95	-1.015190125	-1.063766003	0.001951507
105	16	15	-0.954075158	-0.414444774	0.000595135
105	16	35	-0.941606164	-0.230648562	0.001175865
105	16	55	-0.943669319	-0.099347532	0.001589839
105	16	75	-0.948591113	-0.021369142	0.001869003
105	16	95	-0.950620055	0.003948635	0.001957211
105	24	15	-0.952596068	0.00399431	0.000592247
105	24	35	-0.952414393	0.003994978	0.001171305
105	24	55	-0.952460766	0.003995883	0.001588038
105	24	75	-0.952500582	0.003996633	0.001870982
105	24	95	-0.952537894	0.003997318	0.001959034
105	32	15	-0.953194737	0.004004579	0.00059205
105	32	35	-0.952895463	0.004004314	0.001170899
105	32	55	-0.952914834	0.004004635	0.00158768
105	32	75	-0.952934265	0.004004955	0.001871259
105	32	95	-0.952953577	0.004005271	0.001959443
105	40	15	-0.953686416	0.004011782	0.000591917
105	40	35	-0.953264534	0.004011306	0.001170632
105	40	55	-0.953282416	0.004011593	0.001587409
105	40	75	-0.953299403	0.004011871	0.001871415
105	40	95	-0.953316391	0.004012145	0.001959762
120	8	15	-1.241888165	-2.659643412	0.000588906
120	8	35	-1.250249982	-2.353482008	0.001165231
120	8	55	-1.244874358	-2.065960407	0.001569943
120	8	75	-1.210069537	-1.797074199	0.0018286
120	8	95	-1.14363122	-1.546931505	0.001951452
120	16	35	-0.93599683	-0.345347852	0.001140445
120	16	55	-0.941565096	-0.178920925	0.001545089
120	16	75	-0.947236955	-0.06534075	0.001815889
120	16	95	-0.950345099	-0.004516654	0.001949424
120	24	15	-0.952471077	0.006907643	0.000580308
120	24	35	-0.952463865	0.006908511	0.001139494
120	24	55	-0.952489316	0.006909411	0.001545311
120	24	75	-0.952513814	0.006910236	0.001813309
120	24	95	-0.95253545	0.006910946	0.001951524
120	32	15	-0.952930987	0.006921278	0.000580126
120	32	35	-0.95284301	0.006921473	0.001139182
120	32	55	-0.952859223	0.006921985	0.001544915
120	32	75	-0.952875555	0.006922497	0.001812843
120	32	95	-0.952891946	0.006923006	0.001951947

120	40	15	-0.953339934	0.006932115	0.000579983
120	40	35	-0.953149855	0.006931835	0.001138901
120	40	55	-0.953161061	0.006932164	0.001544628
120	40	75	-0.953172207	0.00693249	0.001812507
120	40	95	-0.953183353	0.006932812	0.001952293
135	8	15	-1.367616773	-3.397674322	0.00058326
135	8	35	-1.378662348	-3.050343752	0.001146536
135	8	55	-1.377459288	-2.721642017	0.001547308
135	8	75	-1.351517916	-2.411584139	0.001789938
135	8	95	-1.292631507	-2.120258808	0.001923824
135	16	35	-0.942115188	-0.484691054	0.001110712
135	16	55	-0.943220019	-0.282439739	0.001504685
135	16	75	-0.944899559	-0.132607818	0.001760199
135	16	95	-0.949062943	-0.03622172	0.001906008
135	24	15	-0.952066839	0.010536803	0.000568337
135	24	55	-0.95210582	0.010538971	0.001504535
135	24	75	-0.952123582	0.010539914	0.001758861
135	32	15	-0.952415764	0.010554834	0.000568184
135	32	35	-0.95241797	0.010555453	0.001108214
135	32	75	-0.952441275	0.010556584	0.00175849
135	32	95	-0.952453017	0.01055715	0.001902462
135	40	15	-0.952732325	0.010568275	0.000568072
135	40	35	-0.952667892	0.010568368	0.001107995
135	40	95	-0.952689648	0.010569299	0.001902303