



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

## Τρισδιάστατη μοντελοποίηση και οπτικοποίηση του ενεργού ρήγματος της Νέας Αγχιάλου

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

**Βασίλης Σαλταγιάννης**

Επιβλέπων: Βύρωνας Νάκος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Ιούνιος 2022

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Γεωεπιστήμες στις οποίες ανήκει και ο κλάδος της Γεωλογίας, είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένες με την επιστήμη της Γεωπληροφορικής, η οποία παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για επεξεργασία, ανάλυση, ταξινόμηση, συσχέτιση και οπτικοποίηση των δεδομένων της. Από τις 2 διαστάσεις του γεωλογικού χάρτη μεταβαίνουμε στις 3 διαστάσεις ενός ψηφιακού γεωλογικού μοντέλου, το οποίο παρέχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες αναπαράστασης και ερμηνείας του εσωτερικού της Γης. Η έως τώρα αντίστοιχη αναλογική αναπαράσταση, αποδίδεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και παρέχει πολλαπλές δυνατότητες προσέγγισης τρισδιάστατων σωμάτων και επιφανειών όπως και τη συσχέτιση τους, σύνολο που εννοιολογικά περιγράφει τη γεωλογική δομή μιας περιοχής. Στο παρόν πόνημα γίνεται μοντελοποίηση και αναπαράσταση του ενεργού ρήγματος της Νέας Αγχιάλου του Ν. Μαγνησίας της Θεσσαλίας, αξιοποιώντας πρωτογενή δεδομένα από εργασίες υπαίθρου και ερμηνείες σεισμικών δεδομένων. Το οπτικοποιημένο αποτέλεσμα προκύπτει από παρεμβολή και συμβολισμό, μέσω Σ.Γ.Π.

## SUMMARY

Geosciences, to which the branch of Geology belongs, are now inextricably linked with the science of Geoinformatics, which provides the necessary tools for processing, analysis, classification, correlation and visualization of its data. The tools that Geoinformatics provides us, which from the field of applied mathematics, meet until now analog methods of representing and visualizing the geology of an area in two or three dimensions. From the visualization of a geological map, we move to the three and even four dimensions of a digital geological model, which provides much greater possibilities for representing and interpreting the Earth's interior. The corresponding analog representation until now is more accurately rendered and provides multiple possibilities for approaching three-dimensional bodies and surfaces as well as their correlation, a set that conceptually describes the geological structure of an area. In this work, the active fault of Nea Aghchialos, N. Magnesia, Thessaly, is modeled and represented, using primary data from field work and interpretations of seismic data. The methodology followed has elements from advanced methods applied today, adapted to the few but important data we have, utilizing them in such a way that the result results only from known causes, excluding unknown ones. The lack of knowledge of the exact geometry of the fault surface is thus taken into account, as we proceed in depth. The study and modeling of active and seismic faults, brings multiple benefits in the prevention of natural disasters, in technical projects, as well as in safer residential development. The visualized result comes from calculation of known points of the fault surface and after that, with 2 types of interpolation, comparing the final products. The 3D modelling visualization and symbolization, completed using ESRI'S ArcMap and ArcScene.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u><a href="#">ΕΙΣΑΓΩΓΗ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 3</a></u>
Ευχαριστίες .....	Σελ 4
<u><a href="#">1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 4</a></u>
1.1 Δομή της Γης .....	Σελ 5
1.2 Δομή και κίνηση των πλακών .....	Σελ 7
1.3 Γενικά στοιχεία Δυναμικής και Τεκτονικής Γεωλογίας .....	Σελ 10
1.4 Γεωδυναμικό καθεστώς ελλαδικού χώρου .....	Σελ 12
1.5 Γενικό πλαίσιο ρηξηγενούς τεκτονικής της ευρύτερης περιοχής .....	Σελ 15
<u><a href="#">2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ 3D ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 16</a></u>
2.1 Γεωλογική μοντελοποίηση .....	Σελ 16
2.2 Δεδομένα που αξιοποιούνται στην 3D μοντελοποίηση της Γεωλογίας .....	Σελ 19
2.3 Παρεμβολές, εξαγωγή επιφανειών .....	Σελ 21
2.4 Δεδομένα από την σεισμολογική και γεωφυσική ανάλυση .....	Σελ 24
2.5 Δεδομένα από την γεωμορφολογική και τεκτονική ανάλυση .....	Σελ 30
<u><a href="#">3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 33</a></u>
3.1 Συλλογή πρωτογενών χωρικών δεδομένων κλίσης .....	Σελ 33
3.2 Ψηφιοποίηση ίχνους ρήγματος .....	Σελ 34
3.3 Εφαρμογή μεθοδολογίας .....	Σελ 36
3.4 Δομή των δεδομένων στη γεωβάση .....	Σελ 41
3.5 Εξαγωγή επιφάνειας βάσει των σημείων κλίσης Dip με παρεμβολή Kriging .....	Σελ 47
3.6 Εξαγωγή επιφάνειας βάσει ισαριθμητικών καμπύλων με Topo to Raster .....	Σελ 49
3.7 Πύκνωση ισαριθμητικών καμπύλων και οπτικοποίηση επιφάνειας .....	Σελ 58
3.8 Προβλήματα στην οπτικοποίηση της επιφάνειας με Raster αρχείο .....	Σελ 60
3.9 Τελική οπτικοποίηση με TIN και αντιμετώπιση προβλημάτων .....	Σελ 61
3.10 Εξαγωγή επιφάνειας με πύκνωση σημείων και παρεμβολή Kriging .....	Σελ 64
<u><a href="#">4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 68</a></u>
4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθοδολογίας .....	Σελ 68
4.2 Προβλήματα και ζητήματα που αντιμετωπίστηκαν .....	Σελ 69
4,3 Περαιτέρω επισημάνσεις, προβληματισμοί και μελλοντική διερεύνηση .....	Σελ 71
<u><a href="#">5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 72</a></u>
<u><a href="#">6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</a></u> .....	<u><a href="#">Σελ 73</a></u>

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η διερεύνηση της δομής και σύστασης της επιφάνειας, όπως και του εσωτερικού της Γης, πραγματοποιείται μέσω διαφόρων μεθόδων, προερχόμενων από αρκετά επιστημονικά πεδία. Στον τομέα της Γεωλογίας, αξιοποιούνται δεδομένα από εργασίες υπαίθρου, τα οποία μπορούν να ποικίλλουν σε είδος, όπως πετρογραφικά, ορυκτολογικά, ραδιοχρονολόγησης, χημικά, υδρογεωλογικά, βαρυτικά, ηλεκτρικά και πολλά άλλα. Το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η χωρική διάσταση, κατ' ουσίαν η απόλυτη και η σχετική θέση τους στο χώρο. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων παρέχει το πρωτογενές υλικό για την εξαγωγή γνώσης και συμπερασμάτων. Μπορεί να λαμβάνουν τη μορφή μιας χημικής ανάλυσης ύδατος ή ρευστών, μιας ορυκτολογικής και πετρογραφικής ταξινόμησης, μιας παλαιοντολογικής και ηλικιακής κατάταξης, με κοινή συνιστώσα την συγκεκριμένη θέση στο χώρο.

Η γνώση αυτή αφού έχει αξιοποιηθεί και ταξινομηθεί, οπτικοποιείται υπό τη μορφή ενός γεωλογικού ή υδρογεωλογικού χάρτη, γεωφυσικών διασκοπήσεων και τομών, πίνακα ταξινόμησης πετρωμάτων. Όπως επίσης μέσω τηλεσκοπικών αναλύσεων και ορθοφωτοχαρτών προκύπτουν χάρτες γεωμορφών και ρηγμάτων. Όλα αυτά αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για τους γεωεπιστήμονες.

Ο περαιτέρω συσχετισμός τους δίνει την τελική λύση ενός ζητούμενου ή μια βαθύτερη και συνολικότερη γνώση όπως για παράδειγμα την λιθοστρωματογραφική στήλη μιας γεωτεκτονικής ενότητας. Σε κάθε περίπτωση η οπτικοποίηση των δεδομένων, όπως και η ανάλυσή τους μέσω των μεθόδων της γεωλογικής έρευνας, βρίσκει ολοένα και αυξανόμενη εφαρμογή στην επιστήμη της Γεωπληροφορικής.

Τα εργαλεία που παρέχονται από τα σύγχρονα λογισμικά, βασίζονται σε προχωρημένες μεθόδους μαθηματικής και γεωμετρικής ανάλυσης σε συνδυασμό με την εξέλιξη της πληροφορικής και των βάσεων δεδομένων. Ο σχεδιασμός, η ταξινόμηση, οι υπολογισμοί στο επίπεδο και τον χώρο, οι παρεμβολές, η χρήση προχωρημένων μεθόδων και αλγόριθμων τηλεπισκόπησης, ερμηνείας δορυφορικών δεδομένων, είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένα με το σύνολο των γεωεπιστημών. Η εξέλιξή τους όπως η χρήση sFm, υψηλής ανάλυσης DEM, DSM, οι αλγόριθμοι εξαγωγής 3D επιφανειών και σωμάτων, δημιουργεί ακόμα και νέα πεδία έρευνας τα οποία προέρχονται από το συνδυασμό Γεωεπιστημών και Γεωπληροφορικής. Μερικοί εξ αυτών είναι οι αντικειμενοστραφείς αναλύσεις, οι διαδικτυακές εφαρμογές που αλληλοεπιδρούν με τους χρήστες, οι τρισδιάστατες απεικονίσεις και η εξαγωγή γεωλογικών μοντέλων στο χώρο και το χρόνο.

Η Γεωλογία ως Γεωεπιστήμη εξετάζει τα φαινόμενα σε 3 και 4 διαστάσεις - μαζί με το χρόνο. Κατά συνέπεια η αυξανόμενη μετάβαση από την 2D απεικόνιση ενός χάρτη στην 3D απεικόνιση, της γεωλογίας μιας περιοχής, διαθέτει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Αξιοποιεί ήδη υπάρχουσες αναλογικές μεθόδους, με πολύ μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια, το σημαντικότερο, με λίγα δεδομένα μπορεί να προβλέψει πως εξελίσσεται η γεωμετρία στο χώρο. Σε προχωρημένες της μορφές, η ανάπτυξη τοπολογίας σε 3 διαστάσεις, και η χρήση κανόνων και σύνθετων αλγόριθμων προβλέπει σύνθεση ενός γεωλογικού μοντέλου στο χώρο και το χρόνο, με την αξιοποίηση της γεωλογικής γνώσης.

Το παρόν πόνημα αφορά στη μοντελοποίηση και αναπαράσταση του ενεργού ρήγματος της Νέας Αγχιάλου του Ν. Μαγνησίας, σε 3 διαστάσεις. Τα πρωτογενή δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν προέρχονται από εργασία υπαίθρου των ερευνητών γεωλόγων Δρ. Δημήτρη Γαλανάκη, Δρ. Ricardo Carito και τις ερμηνείες σεισμολογικών και γεωφυσικών δεδομένων των σεισμολόγων Δρ. Παπαζάχου Βασίλη, Δρ. Καραστάθη Βασίλη και Δρ. Ευαγγελίας Καρακώστα, οι οποίες αποτελούν πολύτιμα δευτερογενή δεδομένα τα οποία αξιοποιούνται σαν πρωτογενή.

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται βασίστηκε στις μεθόδους τρισδιάστατης μοντελοποίησης που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα από τους ερευνητές και τα πονήματα που αναφέρονται στη

βιβλιογραφία, προσαρμοσμένη στα υπάρχοντα δεδομένα. Ο μικρός αριθμός επιφανειακών μετρήσεων και έλλειψη δεδομένων βάθους, καλύπτεται μέσω αξιοποίησης των υπάρχοντων συσχετίζοντας την θέση, τη γεωμετρία, όπως και την λογική τους σχέση, εξάγοντας μια πιθανή επιφάνεια, μέσω παρεμβολής. Η εξεργασία, ανάλυση και οπτικοποίηση γίνεται μέσω του λογισμικού ArcGis και ειδικότερα ArcMap & ArcScene.

## **Ευχαριστίες**

Θερμές ευχαριστίες στο Ελληνικό Κτηματολόγιο Α.Ε. για την παραχώρηση πρόσβασης στα δεδομένα του ψηφιακού υπόβαθρου της περιοχής μελέτης, από το ΕΠΨΣ 2007-13 και το ΕΠΑΝΕΚ2014-20.

Θερμές ευχαριστίες στους ερευνητές Δρ. Γαλανάκη Δημήτρη, γεωλόγο ΕΑΓΜΕ και Δρ. Σωτήρη Σμπώρα, γεωλόγο για την συμβολή τους στα θέματα που σχετίζονται με τη δομή και γεωμετρία των ρηγμάτων καθώς και για την καθοδήγηση στην αναζήτηση υλικού και βιβλιογραφίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον καθηγητή μου Δρ. Βύρωνα Νάκο, τοπογράφο μηχανικό, ο οποίος ως υπεύθυνος της παρούσας εργασίας, με κατηύθυνε σε όλα τα στάδια της, δίνοντάς μου λύσεις και πολύτιμη βοήθεια, κυρίως δε για τον άριστο τρόπο συνεργασίας.

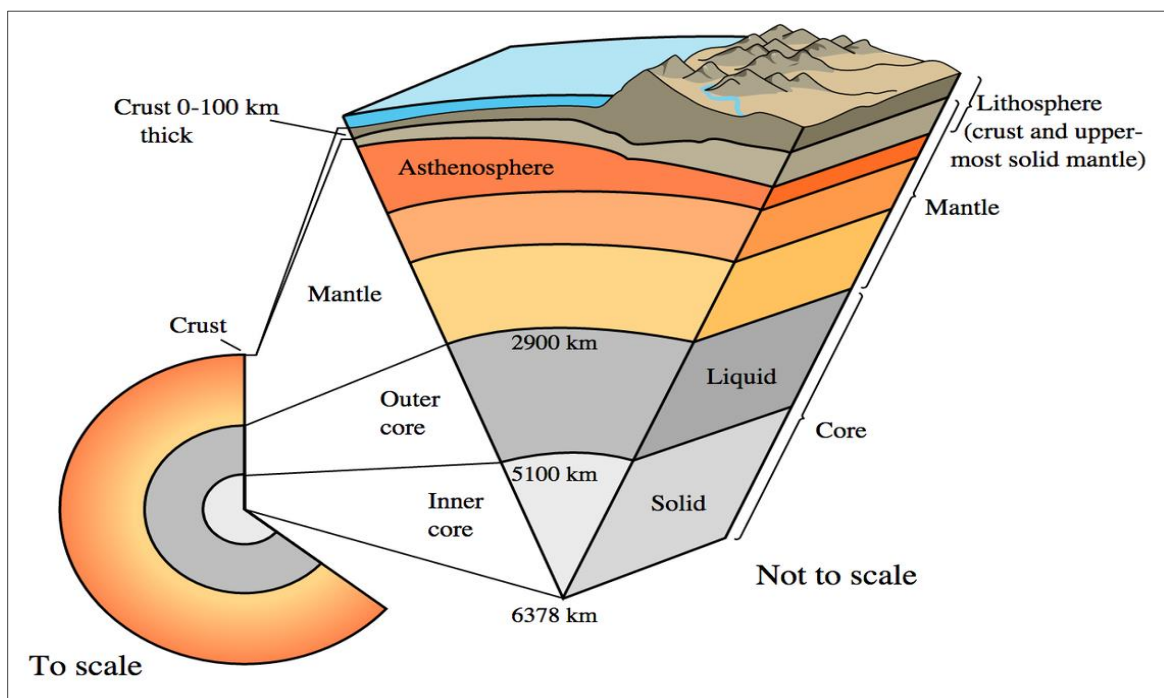
# 1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

## 1.1 Δομή της Γης

Η σύσταση της Γης, είναι ένα σύνολο συνδυασμών υλικών προερχόμενων από το ηλιακό μας σύστημα τα οποία πυκνώθηκαν χάνοντας θερμική ενέργεια από τη διάπυρη αρχική τους κατάσταση και στερεοποιήθηκαν, πριν περίπου 4.5 δισεκατομμύρια έτη.

Η δομή της Γης είναι σύνθεση των παραπάνω συνδυασμών και παρουσιάζει στη σημερινή της μορφή διαφορετική συμπίκνωση κατά «σφαιρικά» στρώματα από την επιφάνεια προς τον πυρήνα της. Αυτό προκύπτει τόσο από τη διαφορεική μετάβαση προς την στερεή κατάσταση, όσο και από την διατήρηση μέρους των αρχικών κινήσεων κατά τη δημιουργία της, όπως η περιστροφή, η περιφορά και η μετατόπιση των αξόνων. Το συνολικό αποτέλεσμα των παραπάνω κινήσεων, αλλά και της διασποράς της αρχικής θερμικής ενέργειας προς το υπόλοιπο σύμπαν συμπλήρωσε η δράση των βαρυτικών δυνάμεων οι οποίες έφεραν τα βαρύτερα υλικά προς το κέντρο της. Οι τελευταίες, επηρεάζονται τόσο από της σύσταση της Γης και τις προαναφερθείσες κινήσεις, όσο και από την περιφορά της Σελήνης, τουλάχιστον σε ότι αφορά στο φλοιό της, και περισσότερο στα αρχικά στάδια δημιουργίας της όπου ήταν πλησιέστερα σε αυτή.

Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύχθηκε στην Γη έχει άξονα σχεδόν ίδιας διεύθυνσης με τον άξονα περιστροφής της, και αποτελεί προϋπόθεση για την ύπαρξη ζωής. Η φυγόκεντρες δυνάμεις σε συνδυασμό τη βαρύτητα δημιουργούν μια πλάτυνση στο επίπεδο του Ισημερινού, δίνοντας το σχήμα του πεπλατυσμένου σφαιροειδούς, με διαφορά στην ακτίνα περίπου 24 km. Οι παραπάνω ενεργοί παράγοντες, επιδρούν και καθορίζουν την διαφοροποίηση της πυκνότητας και το διαχωρισμό της γήινης σφαίρας σε 3 μεγάλες ζώνες: τον φλοιό, τον μανδύα και τον πυρήνα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 [6].



Εικ. 1 Η δομή της Γης, όπου διακρίνονται διαδοχικά: ο Φλοιός (*Crust*) όπου μαζί με την Ασθενόσφαιρα (*Asthenosphere*) αποτελούν τη Λιθόσφαιρα (*Lithosphere*). Εσωτερικότερα ο Κατώτερος Μανδύας (*Mantle*), ο Εξωτερικός και ο Εσωτερικός Πυρήνας (*Outer Core & Inner Core*) (Πηγή: USGS)

Ο φλοιός είναι το εξωτερικό περίβλημα της Γης, του οποίου το πάχος κάτω από μια ήπειρο μπορεί να φτάσει τα 80 km, ενώ στους ωκεανούς 4-8 km. Στο σύνολο του αντιστοιχεί στο 1% του όγκου και περίπου το 05 % της μάζας της Γης. Διακρίνονται δύο στοιβάδες: Η ανώτερη αποτελείται κυρίως από πυριτικά και αργιλικά υλικά και ονομάζεται *Sial* εκ των αρχικών Si και Al αντίστοιχα. Η βαθύτερη ονομάζεται *Sima* (από τα αρχικά Si & Ma) αποτελούμενη κυρίως από ενώσεις του πυριτίου και του μαγνησίου. Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις πιστοποιούν διαφοροποιήσεις στη σύσταση και την πυκνότητα των δύο αυτών στρωμάτων. Ο παράγοντας αυτός της ανομοιογενούς κατανομής της σύστασης επιδρά στις εσωτερικές διεργασίες και δυνάμεις οι οποίες καθορίζουν τη δημιουργία και καταστροφή των τεκτονικών πλακών. Τα όρια τους βρίσκονται στις ζώνες υποβύθισης της μιας πλάκας κάτω από την άλλη και της διάνοιξης και δημιουργίας νέου φλοιού στις μεσοωκεάνειες ράχες. Καθορίζεται δε η δομή τους και από τα εγκάρσια ρήγματα μετασχηματισμού.

Ο τεκτονικές πλάκες που στο σύνολό τους αποτελούν το φλοιό της Γης, «κολυμπάνε» πάνω στην ασθενόσφαιρα - αλλιώς στρώμα Gutenberg - το οποίο είναι το ανώτερο τμήμα του Εξωτερικού μανδύα, το πρώτο δηλαδή εσωτερικό στρώμα ρευστού μάγματος έως το βάθος των 200 km. Παρουσιάζει την μικρότερη ταχύτητα σεισμικών κυμάτων και ενώ επικρατούν συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών όπου τα υλικά τήκονται, οι παράλληλες υψηλές πιέσεις τα διατηρούν σε συνεκτική κατάσταση, επιτρέποντάς τους να ρέουν ενώ είναι στερεά, παρόμοια με τα υλικά των παγετώνων. **[6.]** Αυτή η συνθήκη επιτρέπει και την κίνηση των πλακών.

Όλα τα προηγούμενα καλύπτουν το στρώμα Goltisyn, το οποίο βρίσκεται έως τα 900 km, όπου οι πιέσεις αυξάνονται πάρα πολύ και όλα τα υλικά κρυσταλλώνονται. Μαζί με το στρώμα Gutenberg αποτελούν τον ανώτερο μανδύα. Αυτός καλύπτει τον εσωτερικό ή κατώτερο μανδύα έως τα 2900 km με ομαλά αύξουσες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Ο συνολικός όγκος και η μάζα του μανδύα αποτελεί το 83% και το 67% της Γης, αντίστοιχα.

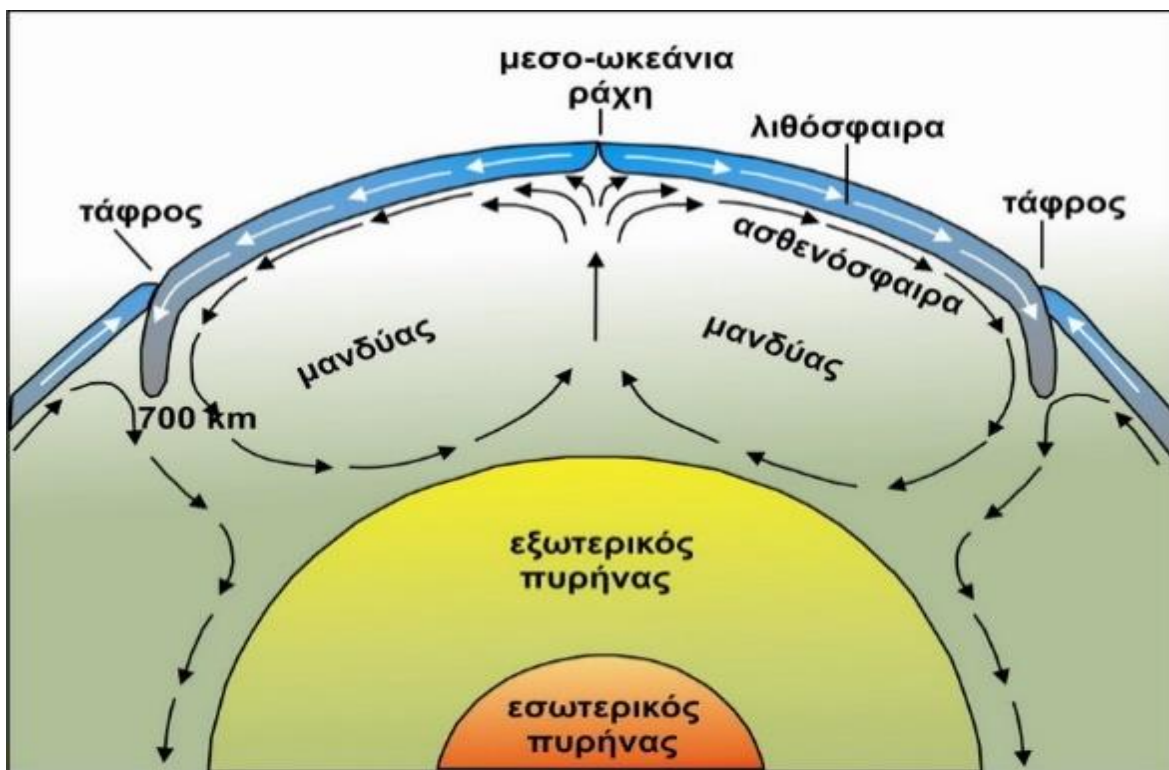
Εσωτερικότερα βρίσκεται ο πυρήνας της Γης, διακρινόμενος σε εξωτερικό έως τα 5000 Km και εσωτερικό έως το κέντρο, όπου οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας αλλάζουν δραματικά με 1,4 ατμόσφαιρες και 3,7 αντίστοιχα και μέση πυκνότητα μεγαλύτερη από 11,5 gr/cm. Οι ακριβείς συνθήκες και η κατάσταση των υλικών δεν είναι ξεκάθαρη **[6]**.

## 1.2 Δομή και κίνηση των πλακών

Το σύνολο του στερεού φλοιού και της ασθενόσφαιρας αποτελεί τη λιθόσφαιρα, της οποίας το πάχος εκτείνεται στα 150 km περίπου. Είναι το «θέατρο» όλων των διεργασιών και των κύκλων της επιφάνειας της Γης, όπως των τεκτονικών κινήσεων, του κύκλου των πετρωμάτων, του κύκλου της ατμόσφαιρας, του νερού και άλλων. Η μελέτη τους αποδεικνύει ότι είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι και αυτό είναι φανερό από τη σύσταση και δομή των πετρωμάτων, την εξέλιξη των ειδών πανίδας και χλωρίδας. Αποτελούν δε παράγοντα διαμόρφωσης της ανθρωπογεωγραφίας, από τα πρώιμα στάδια παρουσίας μας στην πλανήτη.

Η κατανόηση τους καταδεικνύει ότι η γεωλογία και γεωμορφολογία καθορίζει την εξέλιξη του πολιτισμού, όπως και επιβεβαιώνει τις ξεχωριστές ισορροπίες που είναι απαραίτητες για τη συνέχιση, αλλά και την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Εν γένει η δομή της Γης και η ύπαρξη και μορφή της Ζωής σε αυτή, εξαρτάται από τη θέση και την κίνησή της μέσα στο ηλιακό σύστημα, όπως και την απόσταση της από τον Ήλιο, τους πλανήτες και τη Σελήνη. Όπως και από την ύπαρξη του μαγνητικού της πεδίου, το οποίο λειτουργεί σαν ασπίδα φιλτράροντας το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας, σχετικό με τη δομή και σύσταση της Γης.

Οι τεκτονικές κινήσεις προκαλούνται από ρεύματα του ανώτερου μανδύα, τα οποία συμπαρασύρουν τις πλάκες βυθίζοντάς τις ή φέροντάς τις σε σύγκρουση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Ταυτόχρονα η διάνοιξη ωκεάνιων πλακών και η γέννηση φλοιού από την ψύξη μάγματος έχει αποτέλεσμα τη δημιουργία καινούριων πυριγενών πετρωμάτων. Αυτά τα υλικά όταν ανυψώνονται και έρχονται στην επιφάνεια, μετατρέπονται σε κλαστικά ιζηματα, μέσα από τις διεργασίες διάβρωσης και απόθεσης. Μαζί με οργανικά υπολείμματα όπως κελύφη και σκελετούς θαλάσσιων όντων, τα οποία επανατίθενται στις ιζηματογενείς λεκάνες δημιουργούνται νέα ιζηματογενή πετρώματα.

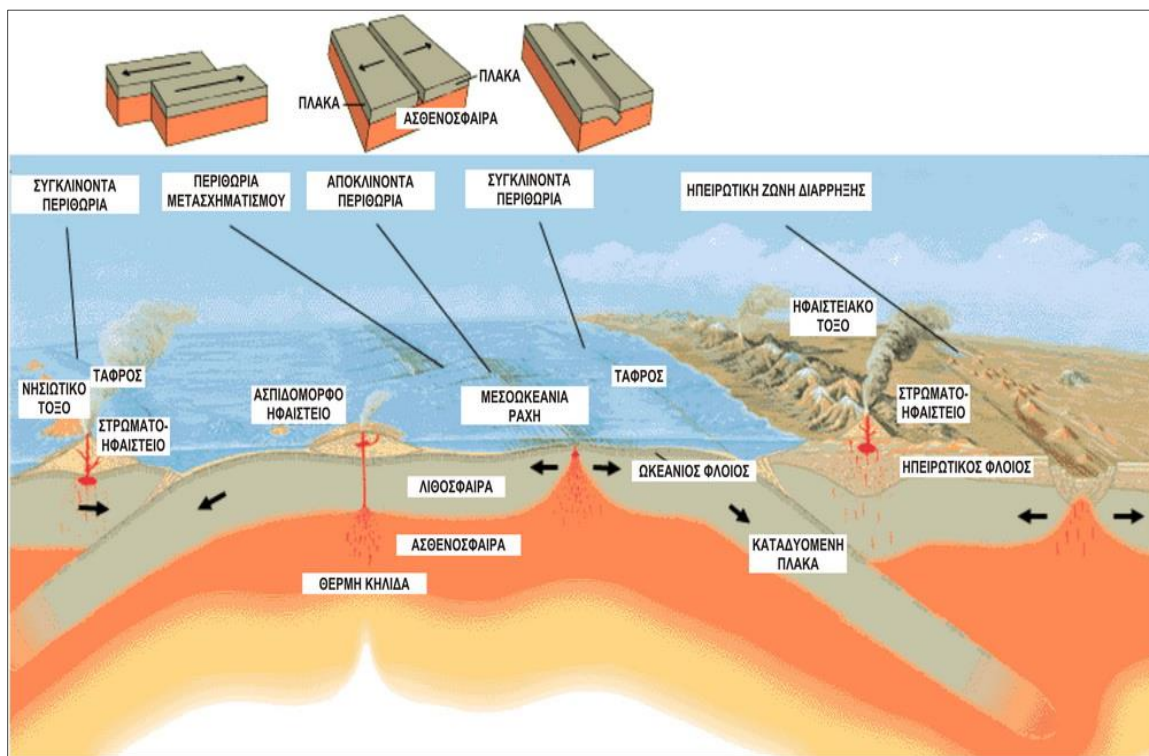


Εικ. 2 Ρεύματα μεταφοράς στο μανδύα (Πηγή: geo.auth.gr)



Κατά τη διαδικασία της υποβύθισης, οι ιζηματογενείς και οι πυριγενείς αναδυμένες σειρές πετρωμάτων, εισέρχονται σε περιβάλλον πολύ υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, επανακρυσταλλοποιούνται, πολυπτυχώνονται και αποκτούν νέες εσωτερικές γραμμικές δομές με τις οποίες ασχολείται ο κλάδος της Μικροτεκτονικής. Τα πετρώματα που προκύπτουν καλούνται μεταμορφωσιγενή, ενώ σε συνθήκες βάθους η τήξη δημιουργεί νέα πλουτώνια πετρώματα, τα οποία στερεοποιούνται εντός του φλοιού, όπως οι γρανίτες.

Η μακροδομές που λαμβάνουν χώρα σε αυτές τις διαδικασίες εξαφάνισης ή συρρίκνωσης του φλοιού είναι οι ζώνες υποβύθισης και σύγκρουσης. Εκεί λαμβάνει χώρα ορογένεση όπως η οροσειρά των Άνδεων και των Ιμαλαίων αντίστοιχα και η δημιουργία τα νησιωτικών τόξων, όπως το ελληνικό. Παράλληλα, η δημιουργία των ηφαιστειακών τόξων, «ανταποδίδει» ένα μέρος του λιωμένου φλοιού πίσω από τις ζώνες υποβύθισης, υπό μορφή ηφαιστειακών και πλουτώνιων πετρωμάτων. Στις ζώνες δημιουργίας νέου φλοιού, όπως η Μέσο Ατλαντική ράχη, η προηγούμενη διαδικασία συμβαίνει σε πολύ μεγάλη κλίμακα και η μακροδομή αυτή είναι αυτή που κατά το μεγαλύτερο ποσοστό «κινεί» τις πλάκες σαν τις κυλιόμενες σκάλες, πάνω στον ρευστό Μανδύα. Κατά μήκος των εγκάρσιων σε αυτή ρηγμάτων μετασχηματισμού που δημιουργούνται γίνεται επιπλέον εκτόνωση της κίνησης κατά μήκος της ράχης. Στην Εικόνα 3 απεικονίζονται όλα τα παραπάνω.



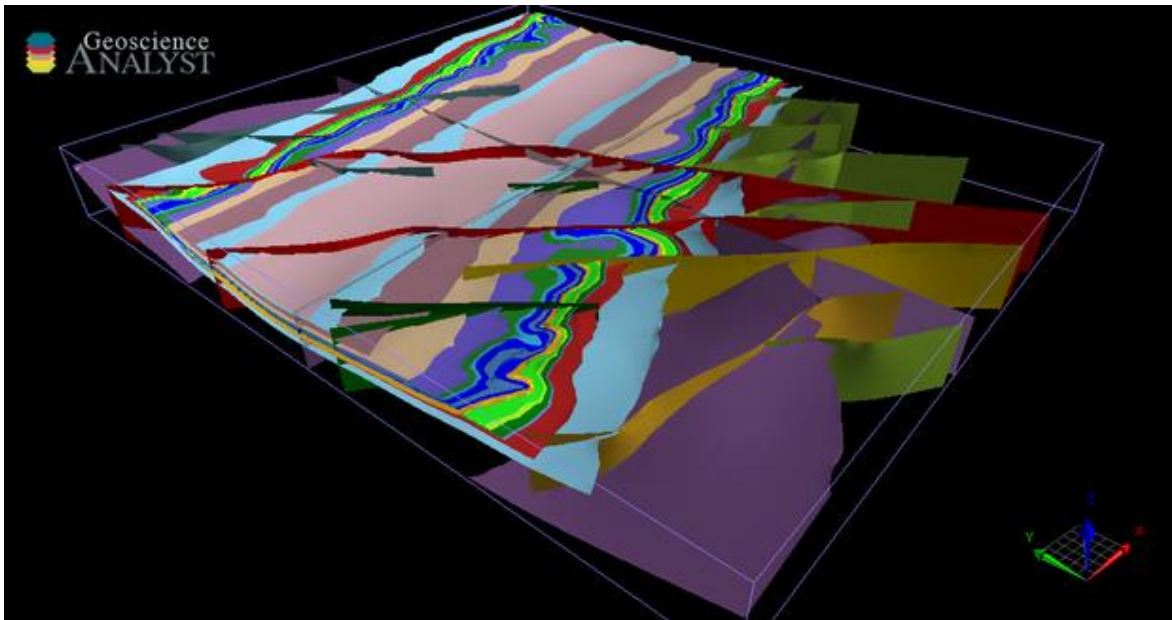
Εικ. 3 Κίνηση των πλακών: Υποβύθιση, δημιουργία και ηφαιστειότητα (Πηγή: geo.auth.gr)

Τις διεργασίες αυτές δεν μπορούμε να αντιληφθούμε στον ανθρώπινο χρόνο παρά μόνο μέσα από τις σύγχρονες αποθετικές ή διαβρωτικές επιφανειακές παρατηρήσεις, όπως και την προσωρινή μεταβολή της στάθμης της θάλασσας. Έτσι καθίσταται σαφές ότι μόνο μέσα από βαθιά γνώση και συστηματικές μεθόδους συσχετισμού και αναπαραστάσεων μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το παρελθόν.

Οι μεσαίες και μικρές τεκτονικές δομές, όπως επωθήσεις, εφιππεύσεις και ρήγματα, είναι επιφάνειες με τέτοια εσωτερική γεωμετρία, η οποία γίνεται κατανοητή πλήρως μόνο σε τρεις διαστάσεις. Όπως εν συνεχεία θα αναπτυχθεί, πολύτιμα εργαλεία αντλούνται από τις εξελιγμένες μεθόδους τρισδιάστατης μοντελοποίησης και αναπαράστασης του εσωτερικού, έως και μερικά χιλιόμετρα κάτω από την επιφάνεια της Γης.

Καθώς όσο προχωράμε βαθύτερα, υπάρχει ένας αυξανόμενος βαθμός ασάφειας σε ότι αφορά στο είδος και στη γεωμετρία των σχηματισμών, δημιουργούνται πιθανά εναλλακτικά σενάρια για την ιστορία και γεωλογική δομή. Αυτά εξάγονται τόσο από τη βέλτιστη προσέγγιση του μαθηματικού και γεωμετρικού μοντέλου που τα περιγράφει στο χώρο, όσο και από την «ιστορία» γένεσης και τεκτονικής παραμόρφωσης των πετρωμάτων. Δηλαδή την γεωλογική γνώση του τι είναι πιο πιθανό να υπάρχει σε βάθος και να συμβαίνει ανά γεωλογική περίοδο, όπως και τη σημερινή.

Η σύγχρονη προσέγγιση στα παραπάνω γίνεται μέσω εξειδικευμένων λογισμικών της γεωπληροφορικής, τα οποία εκτός από πολλαπλά γεωχωρικά δεδομένα εισόδου, χρησιμοποιούν πολυσύνθετες τοπολογικές δομές και τοπολογικούς κανόνες για την εξαγωγή Γεωμοντέλων, όπως αναπαρίστανται στην παρακάτω Εικόνα 3.1 .

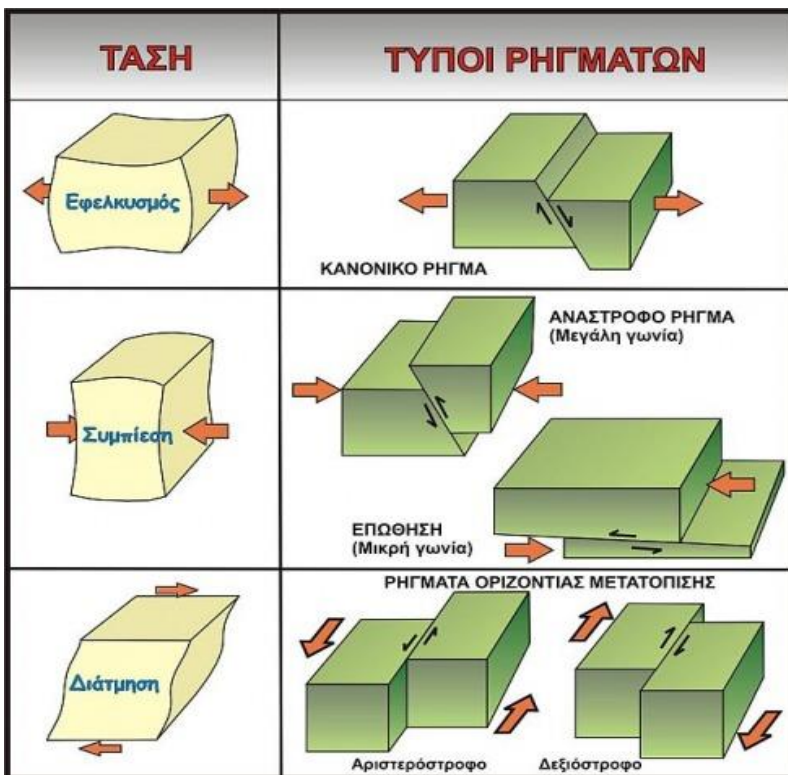


**Εικ. 3. 1** Στρώματα και ρήγματα από το Mount Brockman σε ένα 3D Γεωμοντέλο (Πηγή: Geological Survey of Western Australia - GSWA)

### 1.3 Γενικά στοιχεία Δυναμικής και Τεκτονικής Γεωλογίας

Τα ρήγματα αποτελούν ασυνέχειες του φλοιού της Γης, υπό μορφή διαρρήξεων κατά μήκος των οποίων απελευθερώνεται η ενέργεια ενός σεισμικού γεγονότος. Ο μεγαλύτερος αριθμός των περισσότερο καταστροφικών σεισμών σχετίζεται με αυτά όταν είναι ενεργά, όπως η περίπτωση που θα μελετηθεί. Ανήκουν στην ευρύτερη ομάδα των τεκτονικών επαφών, επιφανειών δηλαδή που προκύπτουν όχι από συνθήκες δημιουργίας πετρωμάτων αλλά από τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, εξ αιτίας των σύνθετων κινήσεων των πλακών.

Οι κατηγορία των *επιπεύσεων* αφορά ανάστροφα ρήγματα μεγάλης κλίμακας, με αρκετά μεγάλη κλίση και μεγάλη μετατόπιση, μέσα στην ίδια γεωτεκτονική ενότητα. Πολλές φορές έχουν περισσότερο ακανόνιστο σχήμα από ένα απλό ρήγμα. Οι *επωθήσεις* είναι πολύ μεγαλύτερες δομές, οι οποίες υποδεικνύουν υποβύθιση μιας γεωτεκτονικής ζώνης κάτω από μια άλλη και ανύψωση. Είναι πιο ακανόνιστες επιφάνειες και μπορεί να έχουν πολύ μεγάλη έκταση, ακόμα και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Ίδιας τάξης μπορεί να είναι και οι αποστάσεις μετακίνησης των σχηματισμών. Για παράδειγμα οι ασβεστόλιθοι ηλικίας άνω Κρητιδικού 60 εκ. ετών περίπου της περιοχής του λεκανοπεδίου της Αττικής, προέρχονται από μια εσωτερικότερη περιοχή 200 και πλέον χιλιομέτρων ΒΔ, κατά τη διάρκεια της οριζόντιας μεταφοράς της Υποπελαγονικής ζώνης που ανήκουν γεωτεκτονικά, επάνω στην μεταμορφωμένη ενότητα που εμφανίζεται στην ανατολική Αττική [15]. Κατά τη διαδικασία αυτή εκτός από τις μεγαλύτερες δομές δημιουργούνται ρήγματα, τα οποία εκτονώνουν σε διάφορα σημεία του φλοιού τις τάσεις που δημιουργούνται. Στην παρακάτω Εικόνα 4, απεικονίζονται οι 4 βασικές κατηγορίες ρηγμάτων.



Εικ. 4 Βασικές κατηγορίες ρηγμάτων σύμφωνα με την κινηματική και την γεωμετρία τους, απόρροια των τάσεων που επικρατούν. (Πηγή: [www.geodifhs.com](http://www.geodifhs.com))

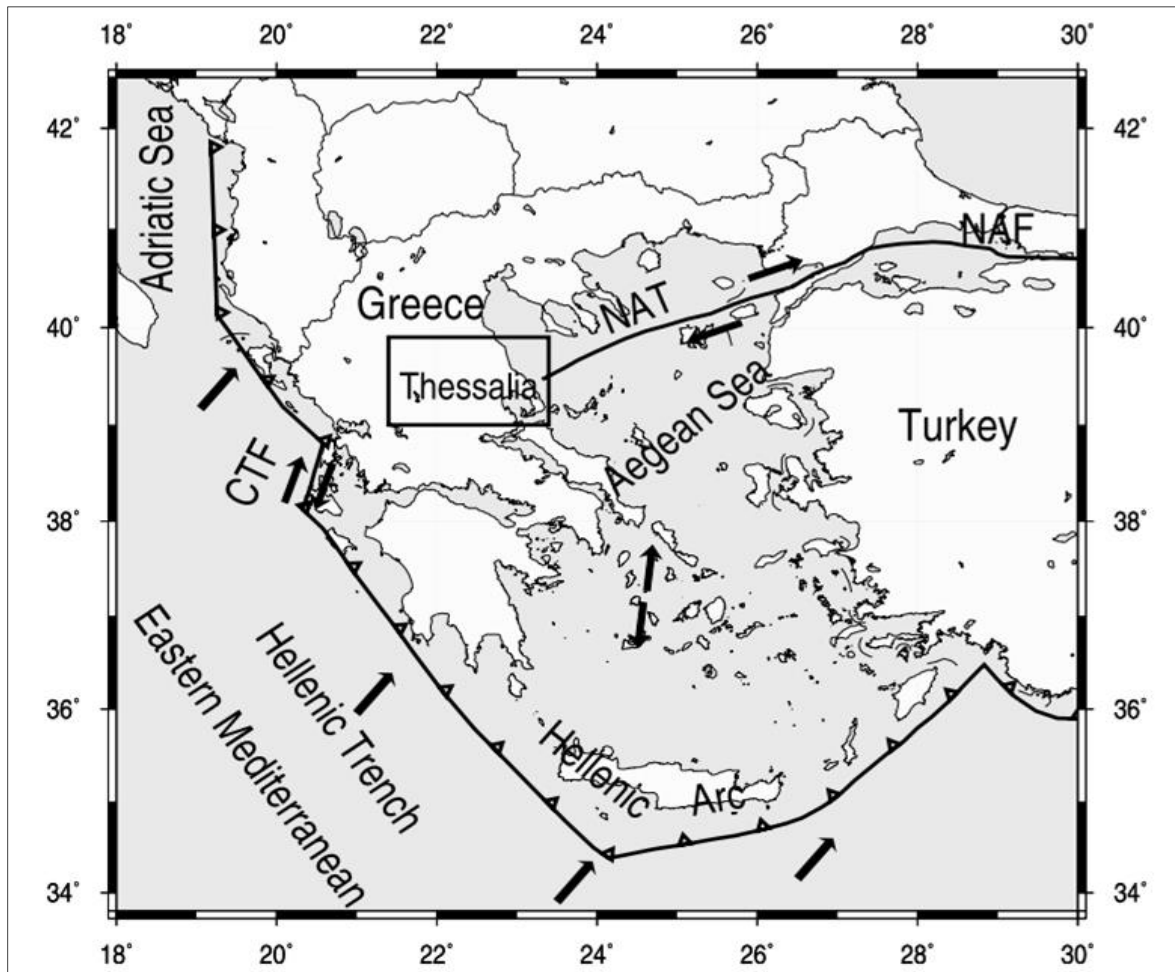
Τα ρήγματα διακρίνονται σε κανονικά, ανάστροφα και οριζόντιας μετατόπισης. Στα κανονικά και στα ανάστροφα ρήγματα, τα δύο δημιουργούμενα τεμάχια πετρωμάτων, μετακινούνται προς τα κάτω ή προς τα πάνω αντίστοιχα κατά μήκος της επιφάνειας διάρρηξης, απόρροια των εφελκυστικών ή συμπιεστικών τάσεων που επικρατούν. Σε ένα ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης, η διάρρηξη γίνεται κατακόρυφα, ενώ τα δύο τεμάχια των πετρωμάτων κινούνται αντιθέτως οριζόντια και οι τάσεις που επικρατούν είναι διατμητικές.

Μια άλλη σημαντική κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων αφορά στη διάκριση μεταξύ ενεργών και μη ενεργών ρηγμάτων. Τα ενεργά ρήγματα είναι όσα έχουν προκαλέσει τουλάχιστον ένα σεισμό κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 10.000 χρόνων (Ολόκαινο). Η ιστορική και η παλαιο-σεισμολογική έρευνα βοηθούν στο χρονικό καθορισμό του τελευταίου μεγάλου σεισμού που προήλθε ένα ρήγμα. Στις σεισμολογικές μελέτες, πολύ μεγάλο ρόλο παίζει η χαρτογράφηση των ζωνών δημιουργίας των ρηγμάτων. Αυτές είναι πιθανές περιοχές όπου είναι πιθανό να συμβούν μελλοντικοί μεγάλοι σεισμοί. Οι μεγάλοι σεισμοί λαμβάνουν μέρος σε βαθιές ζώνες διάρρηξης, όπως η υπό μελέτη περιοχή της Νέας Αγκιάλου.

Η συστηματική μελέτη των ενεργών σεισμικών ρηγμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι δυνατό να αντλήσουμε δεδομένα και πολύτιμες πληροφορίες για τη δυναμική τους και κατά συνέπεια να εκτιμήσουμε τον σεισμικό τους κίνδυνο. Γνωρίζοντας το συνολικό μήκος της ρηξηγενούς ζώνης και άλλα στοιχεία για την γεωμετρία της, μπορούμε βάσει μαθηματικών τύπων, να προσδιορίσουμε το ανώτατο μέγεθος του σεισμού που μπορεί να προκαλέσει και την επιτάχυνση που αυτός θα έχει, καθώς και τη φορά με την οποία θα διαχυθεί η ενέργειά του.

#### 1.4 Γεωδυναμικό καθεστώς ελλαδικού χώρου

Το σημερινό Γεωτεκτονικό καθεστώς του Αιγαίου και του ελληνικού τόξου, είναι αποτέλεσμα συνδυασμού τάσεων και κινήσεων. Προέρχονται από την υποβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από τον χώρο του Αιγαίου, την σύγκρουσή της στα δυτικά στην περιοχή του Ιονίου και την ώθηση μαζί με μετασχηματισμό κίνησης στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου, που διοχετεύεται μέσω του ρήγματος της Ανατολίας (NAF). Το καθεστώς αυτό δημιουργεί στα όρια της υποβύθισης και της σύγκρουσης τάσεις συμπίεσης. Παράλληλα, με την ανύψωση και την εκτόνωση αυτών περιφερειακά δημιουργούνται εφελκυστικές τάσεις εσωτερικότερα, όπως στην περιοχή του Νότιου Αιγαίου, με παράλληλη λέπτυνση του φλοιού και ενεργή ηφαιστειότητα. [4]



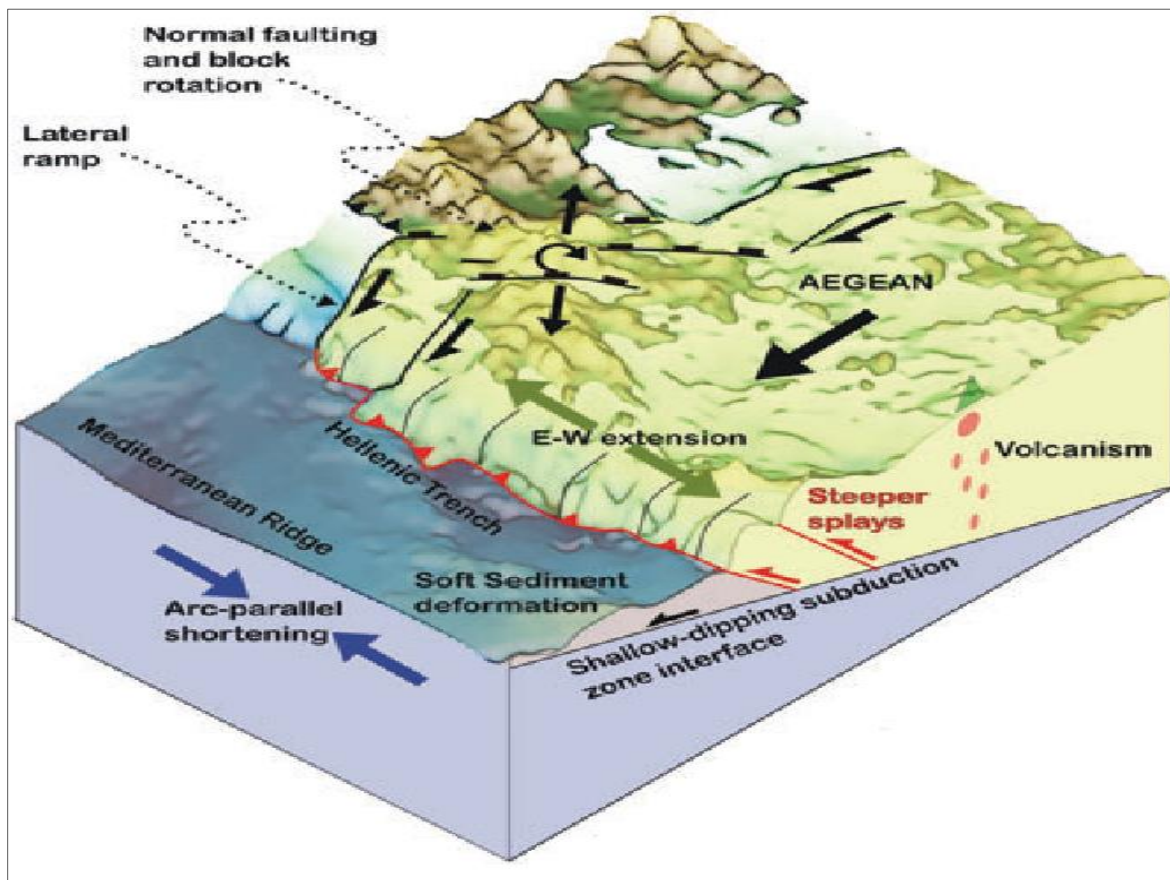
Εικ. 5 Κύρια Σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Αιγαίου και πέριξ αυτής (Πηγή: Παπαδημητρίου Ε. - Καρακώστας Β. [4])

Η ευρύτερη περιοχή του Παγασητικού κόλπου που βρίσκεται το ρήγμα της Αγκιάλου, ανήκει στο Οπισθοτόξο της περιοχής Αιγαίου, μία από τις πιο ενεργές τεκτονικές περιοχές της ζώνης Ζώνης Άλπων – Ιμαλαΐων, όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 5. Το πιο σημαντικό τεκτονικό της χαρακτηριστικό να είναι η καταβύθιση της λιθόσφαιρας της Ανατολικής Μεσογείου κάτω από το Αιγαίο κατά μήκος του Ελληνικού Τόξου όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Η σεισμικότητα είναι

πολύ υψηλή σε όλη την έκταση το τόξου, στο οποίο κυριαρχούν ανάστροφες λεπιώσεις (εμφιπεύσεις), με διεύθυνση του άξονα μέγιστης συμπίεσης ΒΑ – ΝΔ [4].

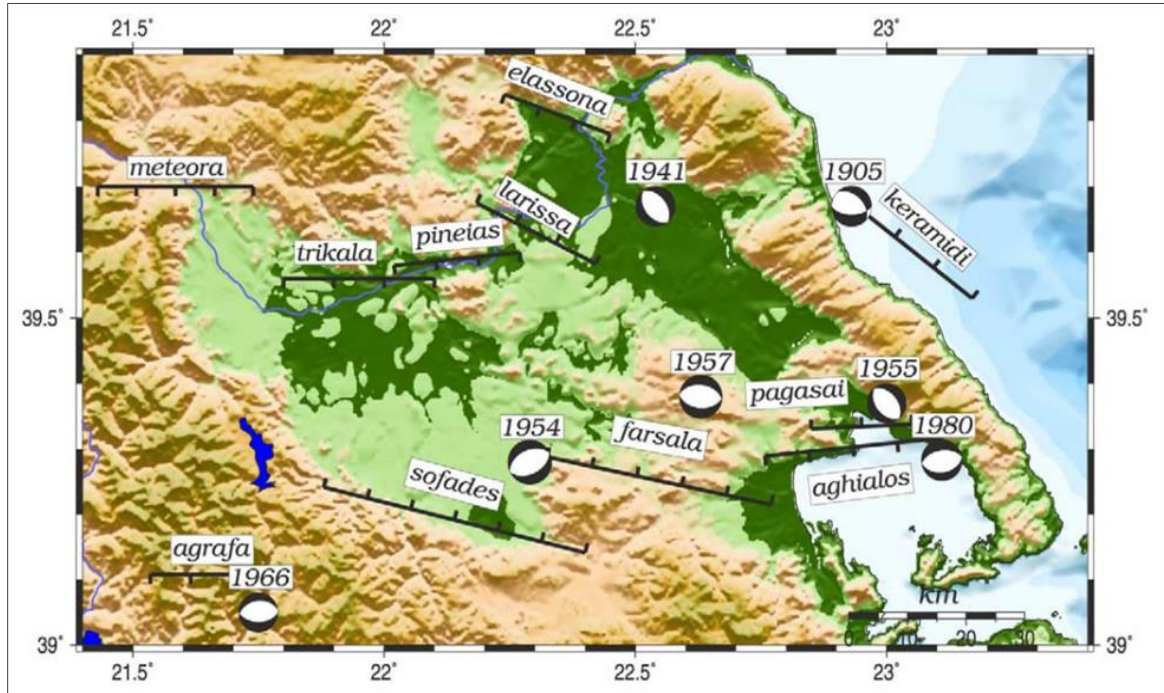
Μια τέτοια ζώνη υπάρχει κατά μήκος των νοτιοδυτικών ακτών της Γιουγκοσλαβίας, συνεχίζει νότια κατά μήκος των παράκτιων περιοχών της Αλβανίας και της βορειοδυτικής Ελλάδας και προέκυψε από την ηπειρωτική σύγκρουση μεταξύ των Εξωτερικών Ελληνίδων και των μικροπλάκα της Αδριατικής. Η διεύθυνση του άξονα μέγιστης συμπίεσης είναι σχεδόν κάθετη προς τη διεύθυνση εμφάνισης της Αδριατικό-Ιονίου γεωλογικής ζώνης. Ενώ, μεταξύ της ηπειρωτικής σύγκρουσης στα βόρεια και της ωκεάνιας καταβύθιση προς το νότο, τα δεξιόστροφα ρήγματα μετασχηματισμού της νήσου Κεφαλονιάς (CTF) είναι σε συμφωνία με τη σχετική κίνηση του Αιγαίου και της Ανατολικής Μεσογείου [4].

Ο McKenzie (1978) απέδειξε ότι η κίνηση προς τα βόρεια της Αραβικής πλάκας ωθεί τη μικρότερη πλάκα της Ανατολίας δυτικά κατά μήκος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας (NAF), συνεχίζοντας κατά μήκος της τάφρου του Βορείου Αιγαίου (NAT), η οποία είναι το όριο μεταξύ της ευρασιατικής και της πλάκας του νότιου Αιγαίου. Η δεξιόστροφη-πλευρικής ολίσθησης κίνηση που σχετίζεται με το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας φαίνεται να κατανέμεται περισσότερο στο Βόρειο Αιγαίο, το οποίο χαρακτηρίζεται από ένα συνδυασμό δεξιάς-πλευρικής διάτμησης και επέκτασης [4].



Εικ. 6 Η υποβύθιση της αφρικανικής πλάκας κάτω από το χώρο του Αιγαίου και η δημιουργία των αντίστοιχων δομών του νησιωτικού τόξου, της οπισθοτάφρου και του ηφαιστειακού τόξου, με τα παράλληλα φαινόμενα και δημιουργία τεκτονικών δομών. (Πηγή: Shaw B., Jackson J. 2010

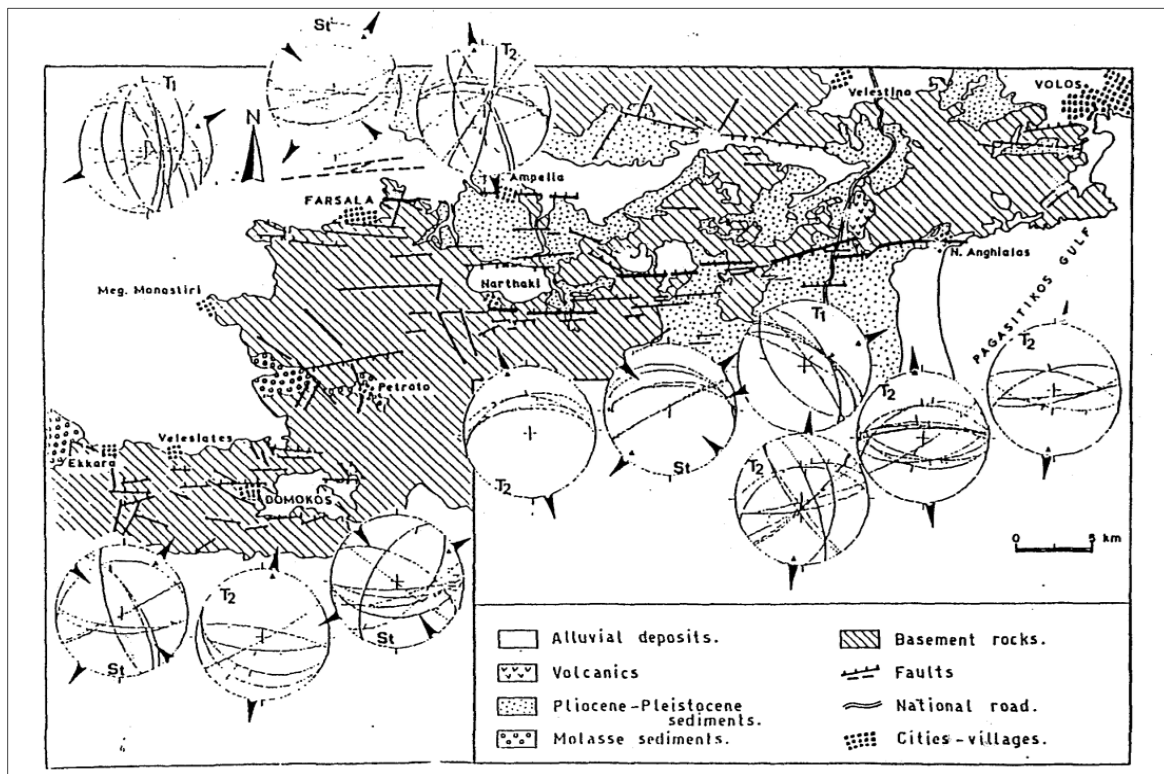
Αυτή η κίνηση μεταφέρεται στο Αιγαίο αλλά μέσα από νοτιοδυτική κατεύθυνση. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από επέκταση μέσω υποπαράλληλων κανονικών ρηγμάτων στα περιθώρια της λεκάνης. Προκύπτουν κανονικά ρήγματα WNW-ESE ή E-W διεύθυνσης και διανύσματα ολίσθησης περίπου N-S. Από το 1954 έως το 1958, πέντε ισχυρές (Mw 6.2) σεισμικές δονήσεις κατέστρεψαν την περιοχή της νότιας Θεσσαλίας.



Εικ. 7 Μορφολογία και σημαντικά ρήγματα της περιοχής της Θεσσαλίας. Οι λύσεις των ρηγμάτων από τους μηχανισμών γένεσης των σεισμών που περιλαμβάνονται στο εξελικτικό μοντέλο απεικονίζονται ως προβολές ίσης περιοχής κατώτερου ημισφαιρίου. Το έτος εμφάνισης κάθε γεγονότως σχολιάζεται πάνω από τις εστιακές σφαίρες (Πηγή: [4]).

## 1.5 Γενικό πλαίσιο ρηξηγενούς τεκτονικής της ευρύτερης περιοχής

Η περιοχή παρουσιάζει πολύπλοκη τεκτονική εξέλιξη εξαιτίας της δράσης των κύριων αλπικών τεκτονοφάσεων που διαμόρφωσαν την κύρια δομή της, όπως και της ρηξιγενούς παραμόρφωση που ακολούθησε. Τα διάφορα νεοτεκτονικά επεισόδια έλαβαν χώρα κατά γεωγραφικές περιοχές αλλά και μορφοτεκτονικές ενότητες, όπως είναι το βύθισμα Αλμυρού Παγασητικού, οι εξάρσεις Όρθρος και Πηλίου και το βύθισμα του διαύλου των Ωρεών -Τρικεριού με το βορειότερο τμήμα της Ευβοίας. Ο εντοπισμός των ρηγμάτων της περιοχής έγινε κατ' αρχάς με τη μελέτη αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων. Ακολούθησε γεωλογική χαρτογράφηση των ρηγμάτων και επί τόπου μετρήσεις, της γεωμετρίας και των κινηματικών τους στοιχείων από τον γεωλόγο Γαλανάκη Δ. Οι παρατηρήσεις έγιναν κατά μήκος των ρηξιγενών ζωνών ορισμένων μεγάλων ρηγμάτων, ή εντοπίστηκαν συγκεκριμένες θέσεις μικρότερων, οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων [2].



Εικ. 8 Γεωλογικός χάρτης της νότιας Θεσσαλίας, όπου παρουσιάζεται η ανάπτυξη της ρηξηγενούς ζώνης της Νέας Αγχιάλου προς τα δυτικά, καθώς και η μελέτη του πεδίου των τάσεων που την επηρεάζουν (Πηγή: Μουντράκης κ.α. 1993)

Για την μελέτη των κινηματικών στοιχείων των ρηγμάτων μετρήθηκαν οι διάφορες μικροδομές που παρατηρήθηκαν πάνω στις επιφάνειές τους. Με την επεξεργασία αυτών υπολογίστηκαν οι κύριες διευθύνσεις του πεδίου των τάσεων ( $\sigma_1$   $\sigma_2$  , $\sigma_3$  ) επομένως της μέγιστης κλίσης τους (Dip) και διεύθυνσης αυτής (Strike). Με κινηματικούς και γεωλογικούς συσχετισμούς, εξήχθη και ο ρόλος των ρηγμάτων αυτών κατά την διάρκεια του Νεογενούς-Τεταρτογενούς μέχρι σήμερα, εάν δηλαδή είναι ενεργά ή όχι. Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται η ανάπτυξη της ρηξιγενούς ζώνης της Νέας Αγχιάλου.



## **2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ 3D ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ**

### **2.1 Γεωλογική μοντελοποίηση**

Στη Γεωλογία η μοντελοποίηση και αναπαράσταση της δομής και των σχηματισμών, αποτελούν θεμελιώδεις έννοιες καθώς η κατανόηση των φαινομένων και των διεργασιών λειτουργεί μέσω της ανάλυσης, της ταξινόμησης και της κωδικοποιημένης οπτικοποίησης. Η επιστήμη της Γεωπληροφορικής είναι άμεσα σχετιζόμενη και με τα παραπάνω. Έχουν αναπτυχθεί εργαλεία στα εξελιγμένα λογισμικά όπως και μέθοδοι ανάλυσης, οι οποίες είναι εξαιρετικά λειτουργικές για τη μοντελοποίηση των φαινομένων σε δύο, τρεις και τέσσερις διαστάσεις μαζί με τον χρόνο.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, έχουν συγκεκριμένη ηλικία, σύσταση, υφή, δομή, σχήμα, όγκο καθώς και σχετική ή απόλυτη θέση στο χώρο. Αυτοί είναι και οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ταξινόμηση τους σε είδη, την ομαδοποίηση σε ενότητες και τον μεταξύ τους συσχετισμό. Η σημασία της ταξινόμησης και της συσχέτισης είναι μεγάλη καθώς με τη βοήθειά τους προκύπτουν συμπεράσματα για το εσωτερικό της Γης σε περιοχές που δεν διαθέτουμε άλλα δεδομένα. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω διαδικασίες σε συνδυασμό με δεδομένα γεωφυσικών διασκοπήσεων, εξάγουμε μεγαλύτερη γνώση της δομής του φλοιού σε βάθος.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, γίνεται αντιληπτό ότι τα εργαλεία και οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί από την Γεωπληροφορική, όπως για παράδειγμα οι εξελιγμένες δυνατότητες οπτικοποίησης, είναι σήμερα εκ των ων ουκ άνευ. Αφ' ενός παρέχουν μεγάλη χωρική ακρίβεια για την καταχώρηση των γεωλογικών ορίων, πολυγώνων, τεκτονικών επαφών, γεωτρήσεων κ.ά., αφ' εταίρου τα συμπεράσματα και τα μεταδεδομένα γίνονται πολύ πιο πλήρη και με μεγαλύτερη χωρική ακρίβεια. Η εξέλιξη αυτή είναι πολύ σημαντική ειδικότερα για τομείς όπως η Τεχνική Γεωλογία, η Υδρογεωλογία, η έρευνα για κοιτάσματα και υδρογονάνθρακες και η Περιβαλλοντική έρευνα, και η πρόληψη φυσικών κινδύνων και καταστροφών.

Η αναπαράσταση του εσωτερικού της Γης που γίνεται με τα βασικά εργαλεία της γεωλογικής έρευνας, παρέχει πληροφορία σε μία, δύο και τρεις διαστάσεις. Η κατακόρυφη ανάλυση της δομής μια γεώτρησης, μας παρέχει ακριβή γνώση σε μια διάσταση, για το είδος και το πάχος των σχηματισμών, στη συγκεκριμένη θέση και για ένα θεωρητικό εύρος. Το ίδιο εάν η γεώτρηση πραγματοποιηθεί υπό γωνία, με παρουσία μιας επιπλέον διάστασης.

Σε μια γεωλογική τομή, αξιοποιώντας τα στοιχεία της έρευνας στην ύπαιθρο και πιθανώς τα δεδομένα γεωτρήσεων, γίνεται αναπαράστασή τους στο κατακόρυφο επίπεδο, σε δύο δηλαδή διαστάσεις. Αυτό, για συγκεκριμένο ίχνος τομής στην επιφάνεια και συγκεκριμένο προσανατολισμό. Έτσι οι γεωλογικές και τεκτονικές επαφές αναπαρίστανται ως γραμμικά στοιχεία, με καθορισμένα χωρικά δεδομένα. Η δημιουργία μια τέτοιας τομής μέσω εργαλείων της Γεωπληροφορικής μπορεί να γίνει σχεδιαστικά, όσο και αυτόματα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Βέβαια, πάντοτε λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη του παράγοντα της ελλιπούς γνώσης και ασαφούς εικόνας του εσωτερικού, όσο προχωρούμε σε βάθος.

Στον γεωλογικό χάρτη αξιοποιούνται τα παραπάνω δεδομένα σε δύο διαστάσεις, ομαδοποιημένα και προσαρμοσμένα στο ανάγλυφο της Γης. Εκτός από τις επαφές των σχηματισμών και τα ίχνη των τεκτονικών επαφών, αποτυπώνονται και στοιχεία προσανατολισμού που δηλώνουν την κλίση της στρώσης των στρωμάτων, τους άξονες πτυχωσιγενών δομών όπως αντίκλινα και σύγκλινα, ή την αναστροφή των στρωμάτων. Το είδος αυτής της αποτύπωσης παρέχει άμεσες πληροφορίες για το είδος, τη θέση και τη μορφή των φαινομένων στο χώρο όσον αφορά στην επιφανειακή τους εκδήλωση και έμμεσες για την επέκτασή τους στο εσωτερικό της Γης.

Η χρήση αναλογικών τοπογραφικών υποβάθρων κατά τη διάρκεια της έρευνας στην ύπαιθρο, όσο και σε όλα τα στάδια επανασχεδιασμού ενός γεωλογικού χάρτη, έχει αντικατασταθεί από αντίστοιχα ψηφιακά τοπογραφικά. Αυτά μπορεί να είναι διανυσματικά ή raster αρχεία αντίστοιχα των ισοϋψών καμπύλων, ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας ή εδάφους, ακόμα και ψηφιακές αναπαραστάσεις επιφανειών Ακανόνιστου Τριγωνικού Δικτύου (TIN). Πολύ σημαντική δε είναι η δυνατότητα εφαρμογής τοπολογικών κανόνων, οι οποίοι διέπουν τις οντότητες καθώς και τα επίπεδα στα οποία ομαδοποιούνται. Αυτό είναι χρήσιμο τόσο για την αποφυγή σφαλμάτων κατά την αναπαράσταση, όσο και για την ορθή και πληρέστερη εννοιολογική δόμηση και συσχέτισή τους με κριτήρια ποιοτικά, περιγραφικά, γεωτεκτονικά και χωρικά.

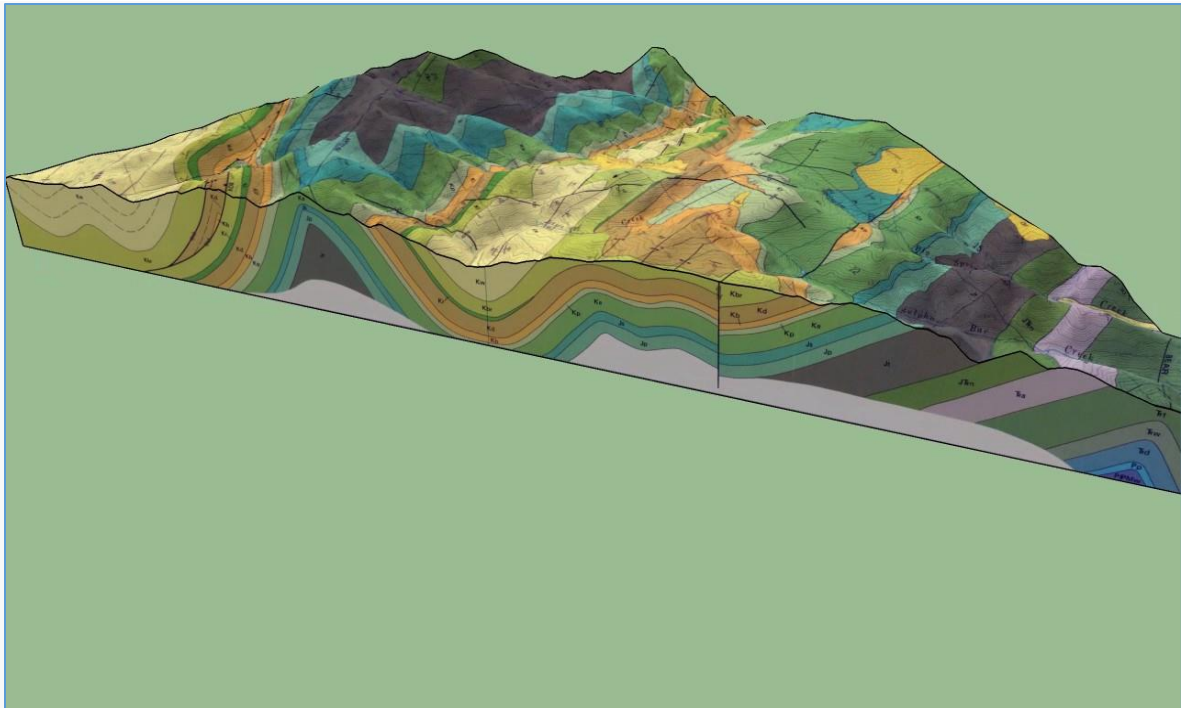
Η ανάλυση, σχεδίαση και αναπαράσταση της γεωλογίας, αναπτύσσεται επάνω στα συστήματα συντεταγμένων, κατά συνέπεια η απόλυτη και σχετική θέση στο χώρο ενός γεωλογικού φαινομένου εξαρτάται πλέον από την ακρίβεια και σαφήνεια με την οποία θα καταχωρηθεί. Η χρήση GPS κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση, παρέχει μεγάλη ακρίβεια στην καταχώρηση της χωρικής διάστασης των στοιχείων και αποτελεί εργαλείο για την εξαγωγή ακριβέστερης δομής του υποβάθρου. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πριν, αυτό αποτελεί πλεονέκτημα ιδιαίτερης σημασίας σε τομείς όπως η Τεχνική γεωλογία, η Υδρογεωλογία, η Περιβαλλοντική έρευνα, η Κοιτασματολογική και η παρακολούθηση των ενεργών και σεισμικών ρηγμάτων.

Στις δύο διαστάσεις του χάρτη, τα γραμμικά και πολυγωνικά στοιχεία που εμφανίζονται αντιστοιχούν στην τομή των επιφανειών και σχηματισμών με το τοπογραφικό ανάγλυφο, αναπαριστώμενα σε κάτοψη. Σε τρεις διαστάσεις, δηλαδή στην πραγματική τους μορφή - χωρίς τη διάσταση του χρόνου - αυτά αποτελούν επιφάνειες που εκτείνονται στο χώρο και σε βάθος. Παράλληλα, όταν είναι τμήματα γεωλογικών σωμάτων αντιστοιχούν στα όρια στερεών με συγκεκριμένες διαστάσεις, μορφή και θέση στο χώρο. Κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση της γεωλογικής τομής, το γεωλογικό όριο ιζηματογενών – μη πτυχωμένων στρωμάτων είναι μια επιφάνεια, η οποία έχει μέγιστη κλίση και προσανατολισμό αυτής προς μια διεύθυνση. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να σχεδιαστεί κατά προσέγγιση με τις κλασσικές γεωλογικές μεθόδους, με εξαρτώμενο βαθμό ακρίβειας και να αναπαρασταθεί υπό συγκεκριμένες όψεις. Μέσω χωρικής παρεμβολής, έχουμε τη δυνατότητα να εξάγουμε τη συνάρτηση που περιγράφει στο χώρο την επιφάνεια αυτή. Οι λύσεις της είναι τα σημεία του χώρου που ανήκουν σε αυτή, αξιοποιώντας έτσι τα χωρικά δεδομένα των υπαίθριων μετρήσεων κλίσης και προσανατολισμού της.

Αντίστοιχα μια τεκτονική γραμμή στο χάρτη είναι το ίχνος σε κάτοψη μιας επιφάνειας που εκτείνεται στο χώρο η οποία τέμνει και διαιρεί το χώρο σε δύο τμήματα που έλαβαν διαφορετική θέση από αυτή που βρίσκονταν, απόλυτη αλλά και σχετική. Για παράδειγμα ένα ρήγμα μπορεί να φέρει σε επαφή δύο σχηματισμούς, οι οποίοι έχουν ηλικιακή διαφορά εκατομμυρίων ετών και τελείως διαφορετική σύσταση, ανάλογα με το εύρος της δράσης του και την διεύθυνση μετατόπισής τους. Μια επώθηση αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μπορεί να φέρει σε επαφή ολόκληρες σειρές σχηματισμών δημιουργημένων σε τελείως διαφορετικά και απομακρυσμένα περιβάλλοντα.

Η επιφάνειες αυτές προσεγγίζονται με σχήματα πολυγώνων και καμπύλων, αποτελούν δε αντικείμενα της Διαφορικής Γεωμετρίας, της Γραμμικής Άλγεβρας και της Τοπολογίας. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από τα εξειδικευμένα προγράμματα όπως *Leapfrog Geo*, *Micro Mine*, *Geo Reka*, αλλά και ανοικτού κώδικα όπως *GemPy*, σε συνδυασμό με τοπολογικούς κανόνες, παρέχουν μοντέλα του εσωτερικού της Γης. Αυτά αντιστοιχούν σε συνδυασμούς της

στρωματογραφίας και γεωμετρίας των σχηματισμών, των ορίων τους και της τεκτονικής δομής. Για την εξαγωγή αυτών των μοντέλων γίνεται εισαγωγή δεδομένων από γεωλογική και γεωφυσική έρευνα, όπως θα γίνει αναφορά πιο κάτω. Με συμβατικότερες μεθόδους όπως στην παρούσα περίπτωση, έχουμε τη δυνατότητα να εξάγουμε την επιφάνεια ενός ρήγματος, αξιοποιώντας ήδη επεξεργασμένα σεισμολογικά δεδομένα. Αυτά τα διαθέτουμε υπό μορφή σχηματικής κατακόρυφης τομής σε βάθος, της επιφάνειας του ρήγματος και του αναγλύφου [1]. Η μοντελοποίηση και αναπαράσταση της επιφάνειας πραγματοποιείται σε συνδυασμό με επεξεργασμένα δεδομένα χαρτογράφησης του ίχνους του ενεργού ρήγματος της Νέας Αγκιάλου [2].



Εικ. 9 Τρισδιάστατο μοντέλο της περιοχής Poker Peak, Idaho (Πηγή: Paul Karabinos)

Ακόμα και για απλές περιπτώσεις Γεωλογικής δομής μιας περιοχής, η γεωμετρία είναι περίπλοκη λιγότερο ή περισσότερο, όπως και η μοντελοποίηση και απεικόνιση της σε τρεις διαστάσεις. Συνυπολογιζόμενου του βαθμού έλλειψης γνώσης της ακριβούς γεωμετρίας των επιφανειών του εσωτερικού υπόγειου χώρου, αλλά και ως ένα βαθμό του πιθανού χωρικού σφάλματος των παραγόμενων γραμμικών δεδομένων της επιφάνειας από τα αρχικά σημειακά, ο βαθμός πολυπλοκότητας άρα και ασάφειας αυξάνει.

Στην περίπτωση που θα μελετηθεί η εξαχθείσα επιφάνεια προκύπτει από δεδομένα σημεία γνωστών συντεταγμένων και από υπολογισμένα σημεία από τα στοιχεία της βιβλιογραφίας. Η πυκνωσή τους θα γίνει εφαρμόζοντας αρχικά τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής *Kriging* ελλείψει περισσότερων δεδομένων και στη συνέχεια τον πιο σύνθετο αλγόριθμο *Topo to Raster* από την εργαλεία που διαθέτει το λογισμικό ArcMap για την εξαγωγή DEM. Σε όλα τα στάδια θα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, ενώ η τελική οπτικοποίηση θα γίνει με το βέλτιστο εξ αυτών.

## 2.2 Δεδομένα που αξιοποιούνται στην 3D μοντελοποίηση της Γεωλογίας

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη γεωλογική μοντελοποίηση και αναπαράσταση, προέρχονται από επί τόπου μετρήσεις και μελέτη της γεωλογίας, και από άλλες πηγές όπως γεωτρήσεις και γεωφυσικές διασκοπήσεις. Πιο αναλυτικά διακρίνουμε: [8, 9, 11, 12, 13]

1. Σημειακά δεδομένα προερχόμενα από γεωτρήσεις και πηγάδια, με συγκεκριμένες συντεταγμένες στο χώρο, τα οποία εμπεριέχουν την χωρική και ποιοτική / περιγραφική πληροφορία της κατακόρυφης ανάπτυξης της γεωλογίας σε βάθος.
2. Σημειακά δεδομένα εξωτερικών εμφανίσεων των γεωλογικών και τεκτονικών επαφών με συγκεκριμένες συντεταγμένες στο χώρο επάνω στο τοπογραφικό υπόβαθρο, δηλαδή μετρημένες εμφανίσεις στην τομή των επιφανειών αυτών με το ανάγλυφο.
3. Σημειακά δεδομένα προσανατολισμού των παραπάνω επιφανειών στο χώρο, όπως η κλίση των στρωμάτων και η διεύθυνσή της, η κλίση και διεύθυνση άξονα πτυχώσεως με την αντίστοιχη δημιουργία αντικλινικών, συγκλινικών και ανεστραμμένων δομών.
4. Γραμμικά δεδομένα από τις παραπάνω εξωτερικές εμφανίσεις, τα οποία έχουν προκύψει από συνένωση σημειακών δεδομένων επάνω στο ανάγλυφο. Η γραμμική παρουσία αυτών στο τοπογραφικό υπόβαθρο, είναι η τομή της επιφάνειας τους με το ανάγλυφο. Έχει συγκεκριμένες συντεταγμένες και μέγιστη κλίση προς μία διεύθυνση στο χώρο όταν πρόκειται για απλές επιφάνειες, πιο περίπλοκη γεωμετρία και μεταβλητή κλίση για σύνθετες, όπως στις περιπτώσεις πτυχωμένων ή μεταμορφωμένων σχηματισμών. Γενικότερα, ακόμα και σε περιπτώσεις απλών επιφανειών η μέγιστη κλίση προς μια διεύθυνση είναι μια προσέγγιση και πάντα εμπεριέχει την προϋπόθεση ότι δεν παρεμβάλλεται μια άλλη επιφάνεια για την οποία δεν υπάρχουν δεδομένα, αλλά πιθανώς να υφίσταται. Το γεγονός αυτό θα μας απασχολήσει και στην παρούσα περίπτωση.
5. Δεδομένα από γεωλογικές τομές, οι οποίες απεικονίζουν σε δύο διαστάσεις τα παραπάνω ως προς το κατακόρυφο επίπεδο. Αυτές παρέχουν σύνολα πρωτογενώς μοντελοποιημένου υλικού και αξιοποιούνται για τη συσχέτιση δεδομένων από αριθμό τομών στο χώρο μέσα από συνδυασμό και παρεμβολές. Μια προσέγγιση αυτής της μεθόδου θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα περίπτωση, αξιοποιώντας την ήδη υπάρχουσα κατακόρυφη τομή της επιφάνειας του ρήγματος της Νέας Αγχιάλου.
6. Χάρτες δυναμικής και τεκτονικής Γεωλογίας, από τους οποίους εξάγονται πληροφορίες σχετικές με την κατάσταση και δομή των σχηματισμών. Αυτή προκύπτει τόσο ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης ή του κατακερματισμού τους, όσο και από τη σχετική μετατόπιση μεταξύ τους ή ενός συνόλου σχηματισμών με άλλη κινηματική ιστορία. Η γνώση αυτή εμπεριέχεται στον ορισμό των σωμάτων που αποτελούν τις στοιχειώδεις μονάδες στη μοντελοποίηση, που καλούνται γεω-αντικείμενα. Μαζί με την αρχική στρωματογραφική θέση και ηλικία των πετρωμάτων, καθορίζουν την Τοπολογία της γεωλογίας μιας περιοχής και τους επιπλέον κανόνες που την διέπουν.
7. Τρισδιάστατες επιφάνειες υποβάθρων γεωλογικών σχηματισμών που προκύπτουν από γεωφυσικά δεδομένα και χρησιμεύουν σαν ένα «εσωτερικό» ψηφιακό μοντέλο υπεδάφους χωρίς φυσικά τη χωρική ακρίβεια ενός ΨΜΕ, όπως και χάρτες ίσου πάχους σχηματισμών.
8. Γραμμικά δεδομένα από γεωμορφολογική ανάλυση, σχετική με τις υπό μελέτη γεωλογικές και τεκτονικές επιφάνειες, υποδηλώνοντας έμμεσα την παρουσία αντίστοιχων μεταβολών στο χώρο. Όπως για παράδειγμα η συσχέτιση της ύπαρξης ή της μεταβολής της θέσης και του σχήματος ενός ποταμού, με ένα ρήγμα ή μια άλλη τεκτονική επιφάνεια. Αυτού του είδους οι συσχετισμοί ανήκουν στο πεδίο της μορφομετρικής ανάλυσης, το οποίο βρίσκει

εφαρμογές σε προχωρημένες μεθόδους τηλεπισκόπησης και αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης.

9. Γεωφυσικά δεδομένα, από διασκοπήσεις μαγνητικές, σεισμικές, βαρυτικές και ηλεκτρικές. Δηλαδή από μετρήσεις για την βαρύτητα, την πυκνότητα, τη μαγνητική ευαισθησία των σχηματισμών, την ηλεκτρική αντίσταση, οι οποίες είναι καταγεγραμμένες στο χώρο. Αυτά σε συνδυασμό με την γεωλογική γνώση από έρευνα στην επιφάνεια, παρέχουν συσχετισμούς για κάλυψη της έλλειψης δεδομένων, επιβεβαίωση ή συμπλήρωση. Αξιοποιούνται κατ' αυτόν τον τρόπο στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατανομή των σχηματισμών στο χώρο, καθώς και για την τεκτονική και γεωμετρία που τα διέπει.

### 2.3 Παρεμβολές, εξαγωγή επιφανειών

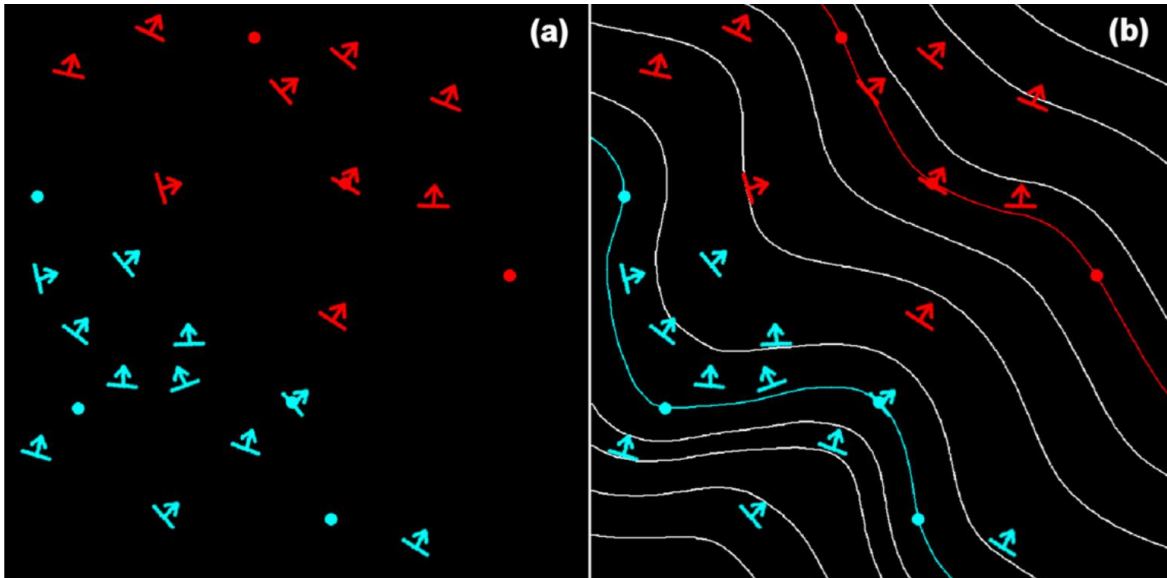
Η χρήση μαθηματικών εργαλείων με στόχο την αναπαράσταση του χαρακτήρα της συνέχειας των χωρικών φαινομένων, από τα διακριτά δεδομένα που συλλέγονται κατά την καταγραφή τους, είναι συχνή στη χαρτογραφία. Η ανάγκη της προσαρμογής αυτής στην αναπαράσταση γραμμικών ή τρισδιάστατων χωρικών φαινομένων μέσω καμπύλων γραμμών και επιφανειών προκύπτει, κυρίως, από τη διαπίστωση ότι ενώ τα χωρικά φαινόμενα είναι συνεχή οι μετρήσεις της καταγραφής τους είναι πάντα διακριτές. Η μαθηματική αυτή διαδικασία ονομάζεται παρεμβολή. Προϋπόθεση για την εφαρμογή των μαθηματικών αυτών τεχνικών είναι η ποσοτική περιγραφή των φαινομένων [5].

Η μαθηματική έκφραση και απεικόνιση της γεωμετρίας επιφανειών στον χώρο προκύπτει μέσα από συναρτήσεις οι οποίες απορρέουν από την «ταύτιση» και αναζήτηση της βέλτιστης εξ αυτών που εκφράζει μια συγκεκριμένη επιφάνεια. Με τη εφαρμογή μεθόδων χωρικών παρεμβολών κυρίως τύπου *Kriging*, οδηγούμαστε σε δυνητικά μοντέλα που εκφράζουν τις επιφάνειες των γεωλογικών και τεκτονικών επαφών μέσα από μαθηματικές εκφράσεις. Η πρώτη μερική παράγωγος αυτών των συναρτήσεων εκφράζει τη μεταβολή της διάστασης  $z$  για μια ομάδα συντεταγμένων  $\{x,y\}$  που στο σύνολό τους αντιστοιχούν στην προβολή κάθε επιφάνειας στο επίπεδο. Η τρίτη διάσταση και η συνάρτηση που εκφράζει τη μεταβολή της είναι στοιχείο της μαθηματικής έκφραση της επιφάνειας.

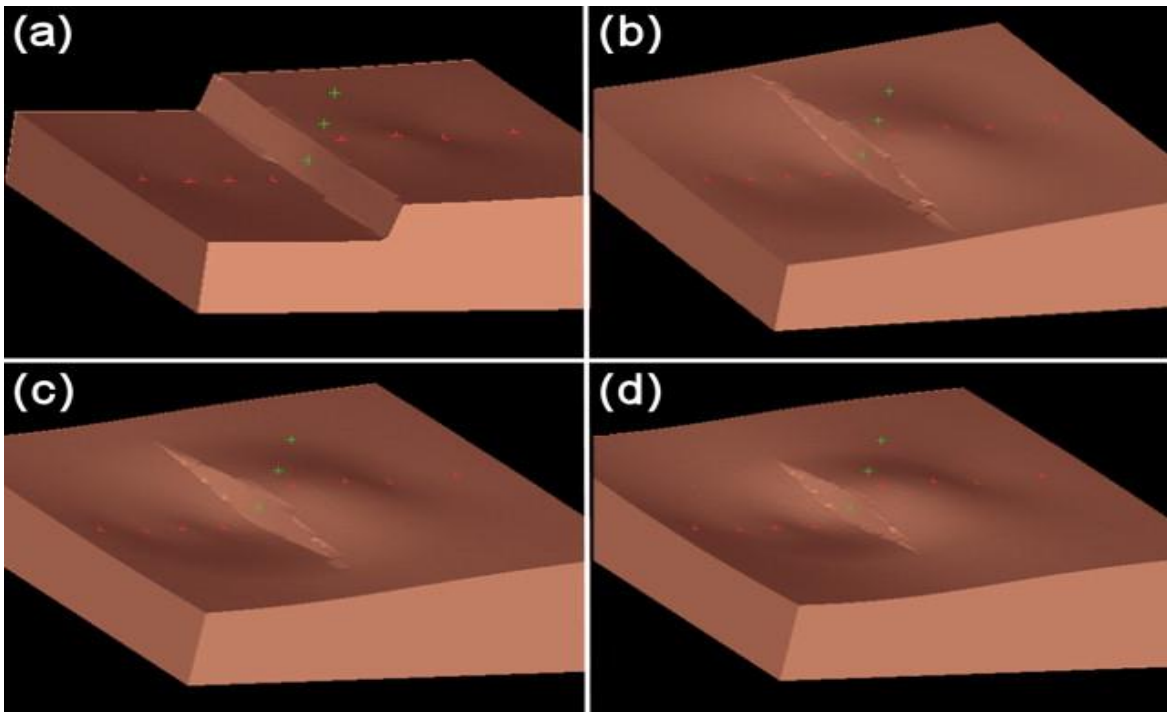
Εάν θεωρήσουμε ότι η μεταβολή των συντεταγμένων στο οριζόντιο επίπεδο, για τους άξονες  $x,y$  είναι σταθερή, ο υπολογισμός της τρίτης διάστασης  $z$ , μπορεί να γίνει ως προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Έτσι ο συνδυασμός του υπολογισμού της, ως προς πολλές διευθύνσεις δύναται να αποδίδει την επιφάνεια με βήμα (οριζόντιο ή/και κατακόρυφο) που παρέχει η συγκεκριμένη ανάλυση. Κατ' αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα να εξάγουμε μαθηματική και γεωμετρική έκφραση των επιφανειών των γεωλογικών και τεκτονικών ορίων, επομένως και του όγκου του γεωλογικού σχηματισμού που περιέχεται σε αυτά.

Αντίστροφα το σύνολο των σημείων με συντεταγμένες  $x,y,z$  που ικανοποιούν την μαθηματική συνάρτηση μιας επιφάνειας θα είναι και ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της κάθε επαφής γεωλογικής ή τεκτονικής. Η συνάρτηση αυτή απορρέει μέσα από τις προαναφερθείσες διαδικασίες, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες εμφανίσεις γραμμικών ορίων στο ανάγλυφο ως σημεία της επιφάνειας με γνωστά  $x,y,z$ . Οι κλίσεις των στρωμάτων προς τις αντίστοιχες διευθύνσεις, εκφράζουν την πρώτη παράγωγο των συναρτήσεων στα συγκεκριμένα σημεία ή ομάδες σημείων. Έτσι οι επιφάνειες περιγράφονται από μια κλιμακωτή συνάρτηση [14].

Σε προχωρημένες μεθόδους, από τα δεδομένα των επίγειων μετρήσεων που υπάρχουν, μπορεί να εξαχθεί μια κλιμακωτή συνάρτηση. Αυτή θα είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε από μια επαφή γεωλογικού ορίου με κλίση και προσανατολισμό, να εξάγεται το σύνολο των σημείων  $x,y,z$  της επιφάνειας στην οποία ανήκει. Έτσι, για να ανήκει ένα οποιοδήποτε σημείο του χώρου στην επιφάνεια αυτή, πρέπει να ανήκει στο σύνολο των λύσεων της συνάρτησης, έχοντας συγκεκριμένες πιθανότητες γι' αυτό βάσει συντεταγμένων του [14]. Ανάλογα, τα σημεία που βρίσκονται στον ενδιάμεσο χώρο δύο επιφανειών, ανήκουν στον χώρο του γεωλογικού σχηματισμού. Στην Εικόνα 10 απεικονίζονται τα δεδομένα υπαίθριων μετρήσεων για την προαναφερθείσα διαδικασία.



Εικ.10 Αρχή της μεθόδου παρεμβολής δυνητικού πεδίου (σε 2D). α) Γεωλογικός σχηματισμός χαρτογραφημένος από τη θέση των επαφών του με δύο άλλους σχηματισμούς (κόκκινα σημεία και μπλε σημεία) και μετρήσεις βύθισης (σύμβολα βύθισης). β) Ο γεωλογικός σχηματισμός που διαμορφώνεται με τη μέθοδο του δυνητικού πεδίου. Οι κόκκινες και μπλε καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις ισარიθμητικές γραμμές αναφοράς των μοντελοποιημένων γεωλογικών επαφών. Οι λευκές καμπύλες είναι επιλεγμένες ισარიθμητικές γραμμές του δυνητικού πεδίου. Σε γεωλογικούς όρους, αυτές μπορεί να είναι στρώσεις ή επίπεδα φυλλώσεων. Οι γεωλογικές επαφές λαμβάνουν υπ' όψη κ' ικανοποιούν τόσο τα σημεία επαφής όσο και τους διανύσματα προσανατολισμού (*Orientation vector space*) (Πηγή: [14])



Εικ. 11 Το σχέδιο απεικονίζει την επίδραση της ποικίλης «ακτίνας» ρηγμάτων στη μοντελοποίηση. (Πηγή: [14])

Η ίδια ακριβώς διαδικασία χρησιμοποιείται για τα ρήγματα και τις πιο απλές τεκτονικές επαφές, ενώ αυτά έχουν και επιπρόσθετες τοπολογικές σχέσεις μεταξύ τους καθώς ένα ρήγμα μπορεί να τέμνει ή να τέμνεται από κάποιο άλλο. Επίσης για τα ρήγματα ορίζεται και μια συνάρτηση μετατόπισης (*drift function*), η οποία καθορίζει και την έκταση επίδρασής τους στο χώρο. Επομένως και στα υπόλοιπα γεωαντικείμενα και όρια ενός μοντέλου περιγραφόμενα εντός μιας σφαίρας ή ενός ελλειψοειδούς [14]. Οι τιμές που μπορεί να λάβει η συνάρτηση αυτή, είναι από -1 έως 1, σε περιπτώσεις που ορίζουν τεμάχη επίδρασης των ρηγμάτων (μπλοκ), έχοντας τιμή 0 όπου δεν υπάρχει πλέον η επίδρασή τους. Αυτό ισχύει τόσο στην περιοχή του μετώπου του κάθε ρήγματος - κατά κλίση - δηλαδή στο τέλος του σε «βάθος», όσο και κατά διεύθυνση - πλευρικά - εκεί που πάλι «σβήνει», συνιστώντας έναν έμμεσο τοπολογικό κανόνα [14].

Στην περίπτωση του Ενεργού ρήγματος της Νέας Αγκιάλου γίνεται χρήση, αξιοποίηση και εξαγωγή:

1. Δεδομένων επιφανείας, από μετρήσεις υπαίθρου των ερευνητών Δρ. Γαλανάκη Δ. και Δρ. Caruto R., τα οποία περιλαμβάνουν το χαρτογραφημένο ίχνος της επιφάνειας του ρήγματος και μετρήσεις της κλίσης του σε 4 σημεία. Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από αποδελτίωση των δικτύων *Schmidt* για κάθε σημείο μέτρησης [2], [3].
2. Ερμηνεία σεισμικών ακολουθιών από τον ερευνητή Δρ. Παπαζάχο Β. [1] και των αντίστοιχων μηχανισμών γέννησης σεισμών. Η μελέτη αυτή μας παρέχει τη σχηματική κατά προσέγγιση κατακόρυφη τομή της επιφάνειας του ρήγματος, η οποία θα θεωρήσουμε - ελλείψει άλλων δεδομένων - ότι ισχύει κατ' αναλογία στα διάφορα σημεία μέτρησης της κλίσης. Η κλίση του ρήγματος για συγκεκριμένη διεύθυνση μπορεί να θεωρηθεί η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης, ως η μεταβολή της κλίσης.
3. Ο συσχετισμός με άλλα δεδομένα από τη βιβλιογραφία και τους μηχανισμούς γέννησης συνδεόμενων σεισμών και η επιβεβαίωση της παραπάνω θεώρησης.
4. Υπολογισμός ισαριθμητικών καμπύλων της επιφάνειας του ρήγματος ανά 1.000 μέτρα βάθους, βάσει της γεωμετρίας του ίχνους του και της πιθανής εξέλιξης της σε βάθος. Έτσι αξιοποιούνται οι υπολογιζόμενες μεταβολές της κλίσης προς συγκεκριμένες διευθύνσεις, με αυξανόμενο βαθμό γενίκευσης όσο βαθαίνουμε λόγω έλλειψης δεδομένων. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα αρχικό πλέγμα σημείων και γραμμών, που ανήκουν και περιγράφουν τη δυναμική επιφάνεια κατά προσέγγιση.
5. Εξαγωγή σημειακών δεδομένων των παραπάνω γραμμικών στοιχείων, τα οποία έχουν συντεταγμένες στο χώρο.
6. Εξαγωγή της επιφάνειας του ρήγματος με εφαρμογή της μεθόδου χωρικής παρεμβολής *Kriging* και σύνθετης παρεμβολής *Toro to Raster*, όπως και σύγκριση αυτών.
7. Οπτικοποίηση της επιφάνειας σε μορφή Ακανόνιστου Τριγωνικού Δικτύου (TIN).



## 2.4 Δεδομένα από την σεισμολογική και γεωφυσική ανάλυση

Η μελέτη της σεισμικής δραστηριότητας και συμπεριφοράς των ρηξιγενών ζωνών από τους τομείς της Σεισμολογίας και της Γεωφυσικής, παρέχει πολλά στοιχεία και δεδομένα για την συμπεριφορά των διαρρήξεων, όπως και τη μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων των σεισμικών γεγονότων και ακολουθιών. Τα δεδομένα που εξάγονται από τις παραπάνω διαδικασίες και εκτός από τα μεγέθη των σεισμών αφορούν στα:

1. Επίκεντρα των σεισμικών γεγονότων από τους σειсмоγράφους και επεξεργασία των σεισμικών κυμάτων P, S βάσει αλγορίθμων, τα οποία έχουν  $x, y$ , και αφορούν σε βάθος  $z$ . Το εύρος του σφάλματος μπορεί να κυμαίνεται ακόμα και σε 2-3 km ως προς τις γεωγραφικές συντεταγμένες ( $\phi, \lambda$ ) ενώ σε αρκετές περιπτώσεις το εστιακό βάθος είναι αρκετά διαφορετικό ανά ερευνητή. Αντίστοιχα τα υπόκεντρα που εξάγονται από τα παραπάνω με τις κατάλληλες διορθώσεις παρέχουν το σεισμικό γεγονός στις 3 διαστάσεις με ένα εύρος σφάλματος αντίστοιχο με τα προηγούμενα. Οι παράγοντες αυτοί δημιουργούν εμπόδια στην αξιοποίησή τους, τουλάχιστον για την εξαγωγή της ακριβούς θέσης σημείου διάρρηξης που ανήκει στην επιφάνεια ενός ρήγματος, ειδικά για βαθύτερα γεγονότα.
2. Μηχανισμοί γένεσης σεισμών που αποδίδουν τις συντεταγμένες της πρώτης διάρρηξης στην επιφάνεια ενός ρήγματος, η οποία δραστηριοποιήθηκε ή δημιουργήθηκε, όπως και τον προσανατολισμό της άρα την παράταξη, την κλίση και τη διεύθυνση κλίσης της. Οι μηχανισμοί γένεσης παρέχουν δύο λύσεις από τις οποίες επιλέγουμε την μία σύμφωνα με τις συσχετίσεις και τα υπόλοιπα στοιχεία της γεωμετρίας και της γεωλογίας της περιοχής. Το χωρικό σφάλμα για τους μηχανισμούς γένεσης είναι επίσης αρκετά ευρύ σε σχέση με την αναζήτηση σημειακών δεδομένων της επιφάνειας του ρήγματος. Τα υπόλοιπα στοιχεία είναι αρκετά ακριβή, αυτά δηλαδή που αφορούν στον προσανατολισμό της επιλεγόμενης επιφάνειας, η οποία προσεγγίζει την κλίση ενός τμήματος της επιφάνειας του ρήγματος για το συγκεκριμένο βάθος.

Date	Origin time hr min s	<i>M</i>	<i>P</i>		<i>T</i>		<i>A</i>		<i>C</i>	
			$\phi^\circ$	$\delta^\circ$	$\phi^\circ$	$\delta^\circ$	$\phi^\circ$	$\delta^\circ$	$\phi^\circ$	$\delta^\circ$
1980 July 9	02:10:19	5.6	112	82	344	02	154	42	350	47
1980 July 9	02:11:57	6.5	172	85	354	05	173	40	355	50
1980 July 9	02:35:52	6.0	165	85	353	05	174	40	354	40

**Πίνακας 1.** Πληροφορίες για την Τάση ( $\varphi$ ) και την κλίση ( $\delta$ ) των αξόνων P, T, A και C των επιπέδων λύσεων που παρέχουν οι μηχανισμοί γένεσης του ρήγματος για τον μεγαλύτερο προσεισμό ( $M=5,6$ ), τον κύριο σεισμό ( $M=6,5$ ) και τον μεγαλύτερο μετασεισμό ( $6,0$ ) οι οποίοι έλαβαν χώρα την 9<sup>η</sup> Ιουλίου του 1980. Τα επίκεντρα αυτών των σεισμών φαίνονται στην Εικόνα 14 (Πηγή: [1])

3. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, για το ενεργό ρήγμα της Νέας Αγχιάλου τα κύρια γεγονότα είχαν την εξής ακολουθία: Ισχυρός προσεισμός ( $M 5,6$ ) σημειώθηκε 2 λεπτά πριν και πολύ κοντά στο επίκεντρο του κύριου γεγονότος ( $M 6,5$ ), ενώ ο μεγαλύτερος μετασεισμός ( $M 6.0$ ) σημειώθηκε λίγα λεπτά αργότερα στο δυτικό όριο της κύριας ρήξης. Οι λύσεις των επιπέδων διάρρηξης των τριών μεγάλων σεισμών της ακολουθίας (Διεύθυνση = B82, Βύθιση = 43°) και η κατανομή των επικέντρων (Πίνακας 2), των γεωλογικών δεδομένων και των παλαιών παρατηρήσεων έδειξαν μια κανονική τάση ρηγματών ENE- WSW και κλίση προς SSE [4]. Το συνολικό μήκος της ρηξιγενούς ζώνης υπολογίζεται στα 30 km και η κατακόρυφη μετατόπιση στα 58 cm [4].

11	1980 July 9	02:10:19	39 15.1	23 00.5	13	5.6
MS	1980 July 9	02:11:57	39 17.0	23 06.6	9	6.5
1	1980 July 9	02:18:18	39 16.2	22 50.8	13	4.3
2	1980 July 9	02:35:52	39 11.4	22 44.0	12	6.0

**Πίνακας 2.** Πληροφορίες για τη χωροχωρική κατανομή των μεγαλύτερων σεισμών. Από τα αριστερά προς τα δεξιά του πίνακα: Αριθμός γεγονότος στην σεισμική ακολουθία και χαρακτηρισμός, ημερομηνία και ακριβής χρόνος, γεωγραφικές συντεταγμένες (φ,λ), βάθος σε Km, μέγεθος. (Πηγή: [1])

Date	Time	Latitude (φ°N)	Longitude (λ°E)	<i>M</i>	Mechanism		
					Strike	Dip	Rake
1905, Jan. 20	02:32:30	39.670	22.930	6.4	313	43	-56
1911, Oct. 22	22:31:45	39.580	23.200	6.0	313	43	-56
1930, Feb. 23	18:19:12	39.600	23.100	6.0	313	43	-56
1930, Mar. 31	12:33:48	39.470	23.130	6.1	313	43	-56
1941, Mar. 1	03:52:47	39.670	22.540	6.3	295	45	-80
1954, Apr. 30	13:02:36	39.280	22.290	7.0	285	43	-88
1955, Apr. 19	16:47:19	39.320	23.000	6.2	267	45	-90
1957, Mar. 8	12:14:14	39.300	22.700	6.5	290	45	-88
1957, Mar. 8	12:21:13	39.380	22.630	6.8	290	45	-88
1957, Mar. 8	23:35:09	39.200	22.800	6.0	290	45	-88
1966, Feb. 5	02:01:45	39.050	21.750	6.2	90	50	-86
1980, July 9	02:11:57	39.283	23.110	6.5	82	43	-90
1980, July 9	02:35:52	39.190	22.733	6.3	82	43	-90

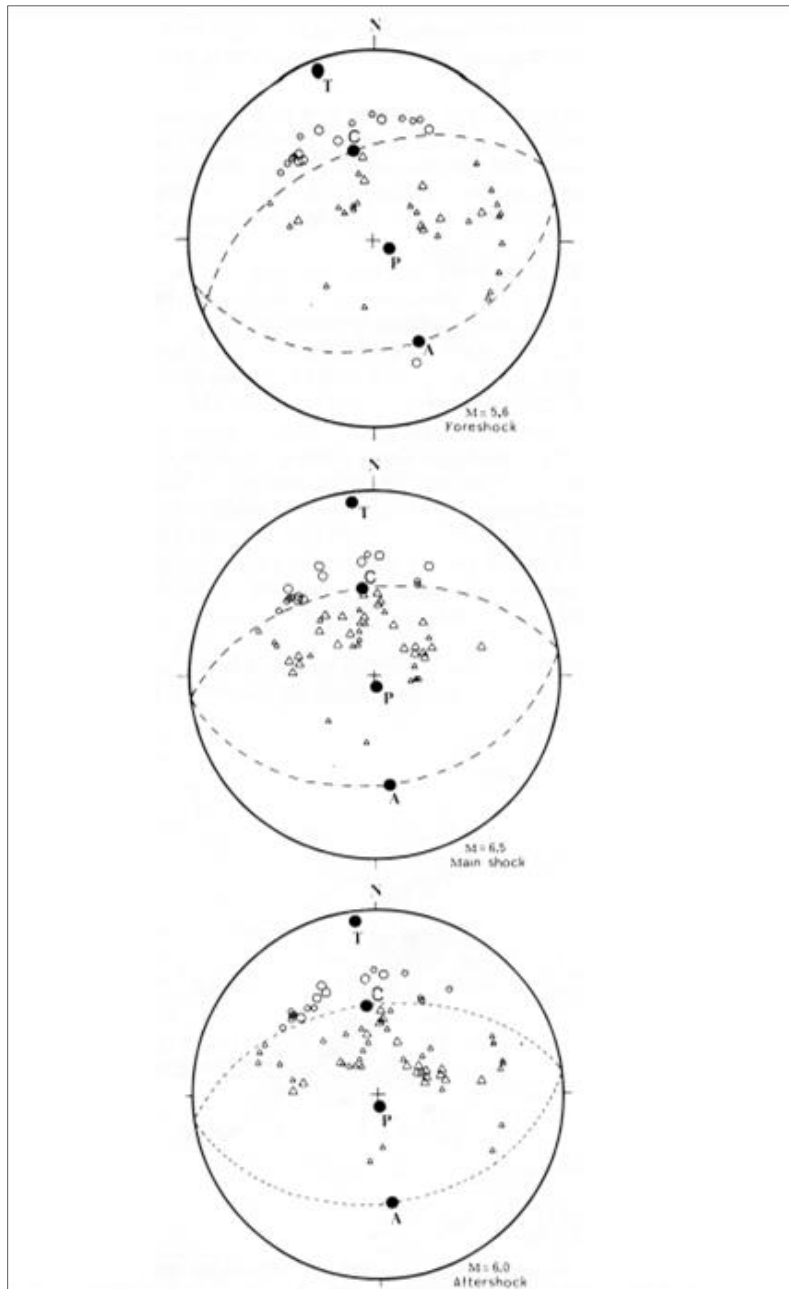
**Πίνακας 3.** Μεγάλοι σεισμοί μεγέθους μεγαλύτερου από 6 που έλαβαν χώρα στην περιοχή της Θεσσαλίας τον 20 αιώνα. (Πηγή: [4])

Από τον Πίνακα 3 μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τα ενεργά ρήγματα μπορούν να δώσουν κατ' επανάληψη σεισμικά γεγονότα μεγάλων μεγεθών μέσα σε κοντινές περιόδους. Τα καταστροφικά αποτελέσματα τους δεν περιορίζονται τοπικά αλλά επηρεάζουν περιοχές ακόμα και σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων. Εξαρτώνται από τη φύση των σχηματισμών στους οποίους έχει γίνει η δόμηση, από πλευράς αντοχής και σεισμικής επιτάχυνσης σε συνδυασμό με την ποιότητα κατασκευής των υποδομών και οικισμών καθώς και τη θέση τους. Σε κάθε περίπτωση η λεπτομερής μελέτη και αναπαράσταση των ενεργών και σεισμικών ρηγμάτων, είναι ένα απαραίτητο εργαλείο στη σύγχρονη εποχή με τις όλο και υψηλότερες και αυξανόμενες απαιτήσεις αντισεισμικού σχεδιασμού.

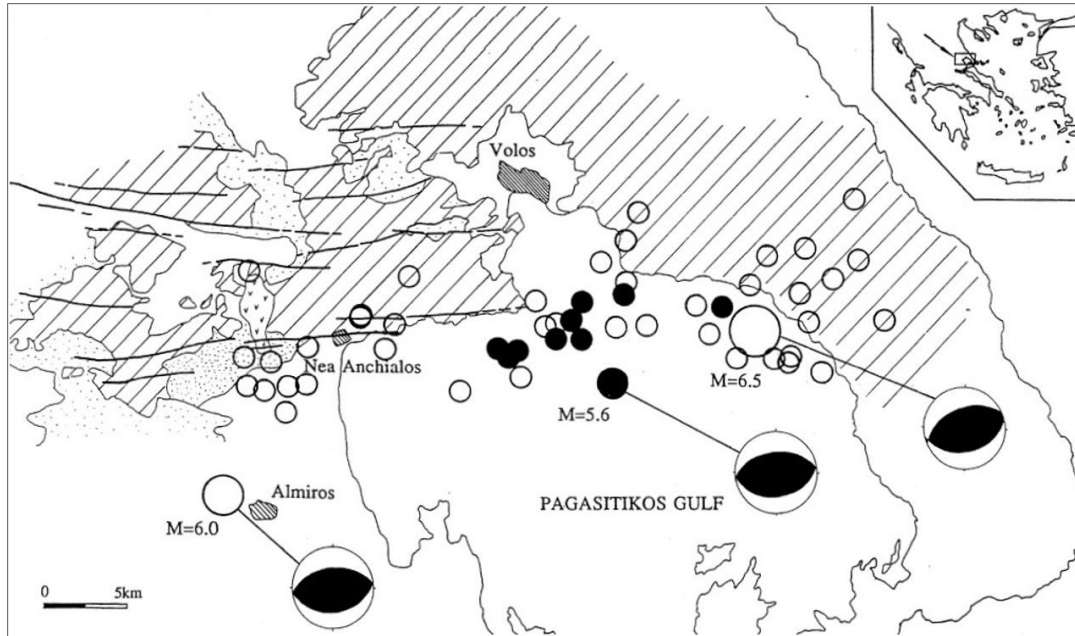
Η μοντελοποίηση και αναπαράσταση των ρηγμάτων σε 3 διαστάσεις, παρέχει εκτός από μεγαλύτερη ευκολία στην οπτική κατανόηση της γεωμετρίας τους, εργαλεία για την αναζήτηση επιπρόσθετων ρηξιγενών δομών. Αυτές είναι θεωρητικά δυνατόν να ανιχνευτούν μέσω της μελέτης του φαινομένου στις 3 διαστάσεις, με λογικούς συσχετισμούς.

Στην Εικόνα 12 αναπαρίστανται τα δεδομένα που λαμβάνουμε από τη διαδικασία μελέτης και ανάλυσης των μηχανισμών γέννησης των σεισμών. Οι σεισμοί που παρουσιάζονται σε αυτή, αντιστοιχούν στους τρεις σεισμούς του 1980, όπως και την υπόλοιπη ακολουθία τους, στα στερεοδιαγράμματα. Τα επίπεδα που έχουν ως μέγιστη κλίση τα σημεία A έχουν μέση κλίση περίπου 43 μοίρες σε διεύθυνση περίπου Α-Δ. Αυτά αντιστοιχούν στα επίπεδα πρώτης διάρρηξης για κάθε σεισμικό γεγονός και υπολογίστηκαν για ένα βάθος 9-10 χιλιομέτρων. Κατά συνέπεια, αποτελούν δεδομένα που αξιοποιούνται τόσο στην εξαγωγή της γεωμετρίας του ρήγματος στην κατακόρυφη τομή της Εικόνας 16, όσο και στη σύγκριση και επαλήθευση των στοιχείων πριν την αξιοποίηση τους από την παρούσα μεθοδολογία.

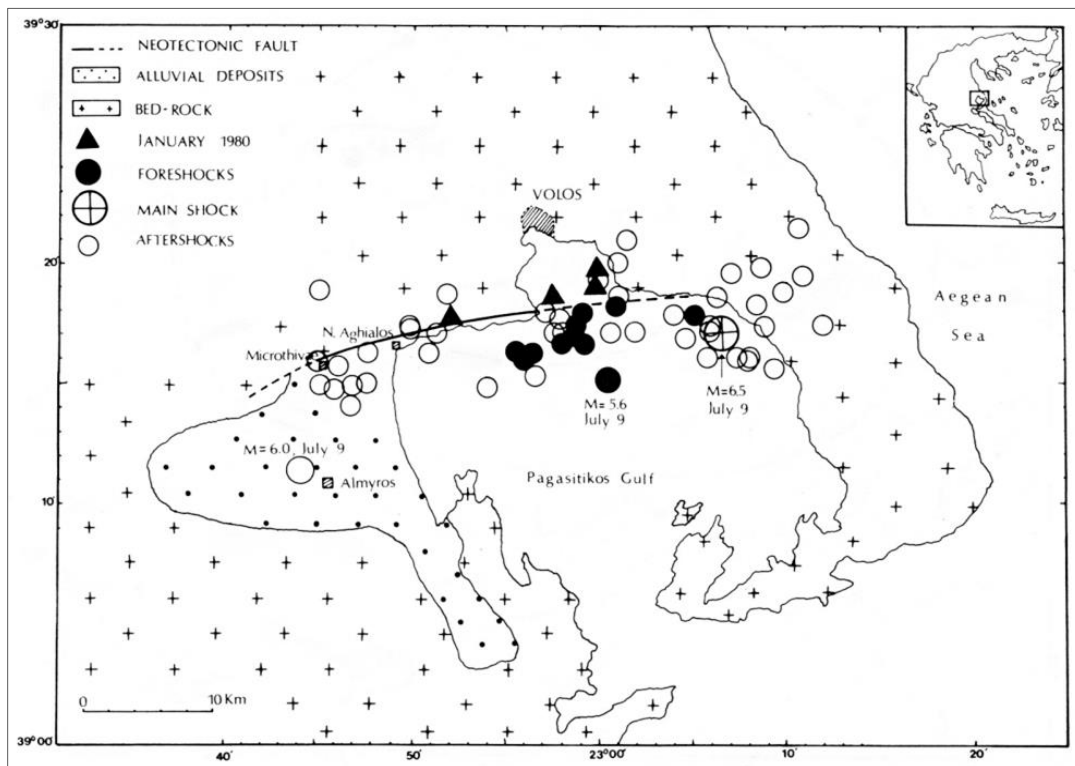
Η σχηματική τομή της Εικόνας 16 που ακολουθεί σε επόμενη παράγραφο, έχει απόλυτη συνάφεια με τα δεδομένα των γεωλογικών μετρήσεων κλίσης του ρήγματος στην επιφάνεια, όσο και με τη γεωμετρία του σε βάθος, βάσει των παρακάτω στερεοδιαγραμμάτων των μηχανισμών γένεσης και υπόκεντρων των σεισμικών γεγονότων.



Εικ. 12 Μηχανισμοί γένεσης και επίπεδα λύσης που αντιστοιχούν για τους τρεις ισχυρότερους σεισμούς του 1980 που συνδέονται με το ρήγμα της Νέας Αγχιάλου (Πηγή: [1])

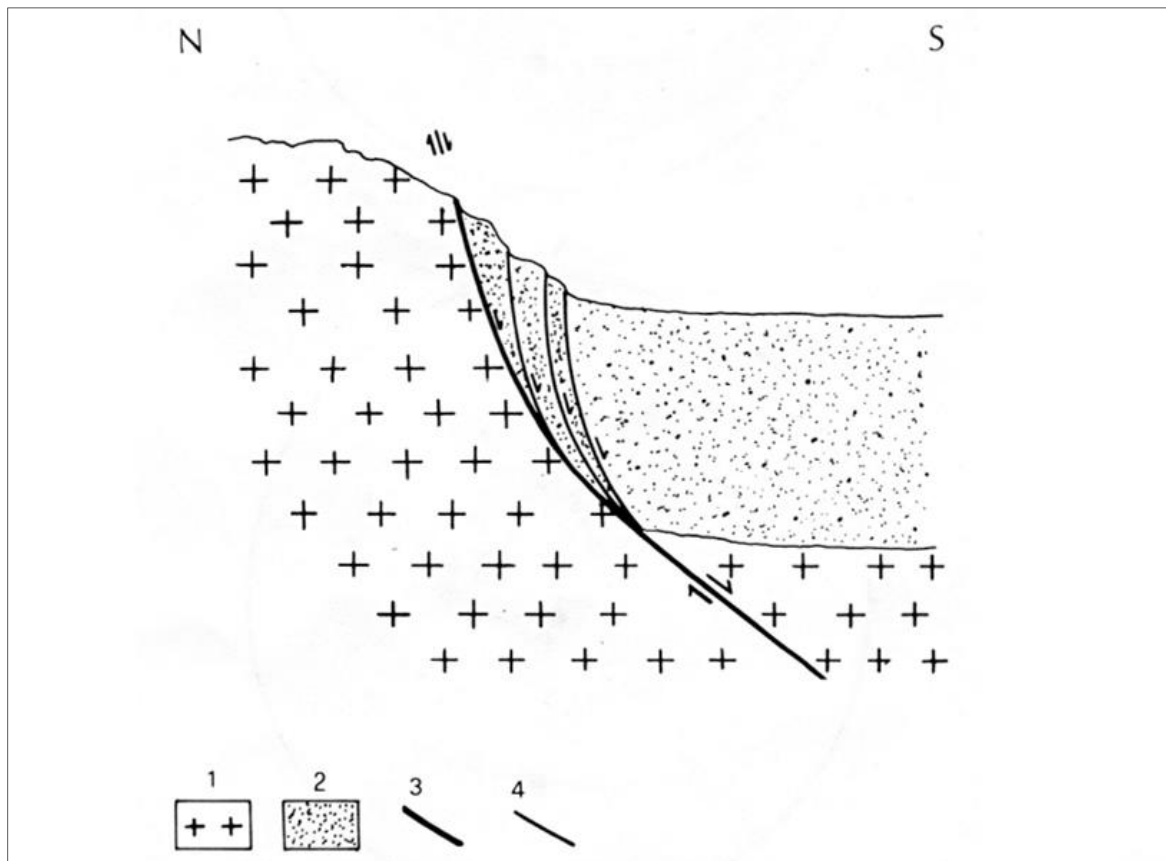


Εικ. 14 Η κατανομή των επίκεντρων των σεισμών μεγέθους  $M \geq 4,2$  της σεισμικής ακολουθίας του Βόλου (τροποποιημένη από τον Παπαζάχο κ.α. 1983). Οι μαύροι κύκλοι αντιστοιχούν σε προσεισμούς, οι μεγάλοι λευκοί στον κύριο και τους μετασεισμούς. Απεικονίζονται οι υπολογισμένοι μηχανισμοί γένεσης. (Πηγή: [3])



Εικ. 15 Η κατανομή των επίκεντρων των σεισμών μεγέθους  $M \geq 4$ , 2 της σεισμικής ακολουθίας του Βόλου σε συνδυασμό με τη γενικευμένη διεύθυνση της ρηγιγενούς ζώνης της Νέας Αγχιάλου και γενικά στοιχεία για το είδος των γεωλογικών σχηματισμών. (Πηγή: [1])

Στους παραπάνω χάρτες των Εικόνων 14 και 15, απεικονίζεται η κατανομή των σεισμικών εστιών στην περιοχή καθώς και οι μηχανισμοί γέννησης, οι οποίοι μας παρέχουν τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό των τμημάτων που ενεργοποιήθηκαν και δραστηριοποιήθηκαν. Τα δεδομένα αυτά είναι πολύ σημαντικά για τη μοντελοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος, καθώς συμμετέχουν στην εξαγωγή κατακόρυφης τομής της παρακάτω Εικόνας 16 [1]. Αυτή, παρουσιάζει προσεγγιστικά μεν αλλά με αρκετή συνάφεια και ακρίβεια, τη γεωμετρία του ρήγματος κατά μήκος της διεύθυνσης κλίσης του για ένα σημείο μέτρησης της κλίσης [2]. Κατά συνέπεια για αυτό το σημείο μέτρησης, το γραμμικό στοιχείο της τομής της επιφάνειας του ρήγματος με το κατακόρυφο επίπεδο, αποτελεί και τη μεταβολή της κλίσης, για τη συγκεκριμένη διεύθυνση. Κατ' επέκταση τη μερική πρώτη παράγωγο για σταθερή μεταβολή στον άξονα Oχ της επιφάνειας στη διεύθυνση αυτή.



**Εικ. 16 Σχηματική αναπαράσταση σε κατακόρυφη τομή της σχέσης μεταξύ του ενεργού κανονικού ρήγματος και των παράλληλων εδαφικών διαρρήξεων στις αλλουβιακές αποθέσεις. 1: Μητρικό πέτρωμα 2: Αλλούβια 3: Κανονικό ρήγμα 4: Εδαφικές διαρρήξεις (Πηγή: [1])**

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται η δομή του ρήγματος της Αγκιάλου καθώς και η συνοπτική σχέση του με τους Γεωλογικούς σχηματισμούς, σε μια τομή διεύθυνσης N-S, η οποία συμπίπτει με την γενική διεύθυνση κλίσης της επιφάνειας του. Παρατηρούμε τα σχεδόν παράλληλα ρήγματα από τις εδαφικές διαρρήξεις και τις επιφανειακές εκδηλώσεις τους, τα οποία σε βάθος «πατούν» πάνω στην κύρια διάρρηξη που εκτείνεται σε βάθος. Είναι σημαντική η μελέτη της μεταβολής της κλίσης της επιφάνειας, η οποία μετράται 80 – 85 μοίρες στο ίχνος της [2], ενώ σε βάθος 10 περίπου χιλιομέτρων κυμαίνεται σύμφωνα με τους μηχανισμούς γένεσης στις 40 – 45 μοίρες (Πίνακας 1).

Ελλείψει επαρκών σημείων μέτρησης κλίσης και διεύθυνσης στο ίχνος του ρήγματος, για τις απαιτήσεις της 3D μοντελοποίησης και αναπαράστασης της επιφάνειας του ρήγματος θα θεωρήσουμε ότι ισχύει ανάλογη μεταβολή της κλίσης και γεωμετρική συνθήκη για στο συνολικό της εύρος. Η υπολογιζόμενη με αναλογικό τρόπο μεταβολή όπως αναπαρίσταται σχηματικά στις Εικόνες 16 και 25, θα αποδελτιωθεί σε αντίστοιχους πίνακες. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το μήκος και η διεύθυνσή της οριζόντιας προβολής της, με αρχή τα τέσσερα σημεία μέτρησης τα οποία φαίνονται στο χάρτη της Εικόνας 18. Πυκνώνοντας τα σημεία κατά 4 ενδιάμεσα, δημιουργούμε τελικά οκτώ κατακόρυφες τομές της επιφάνειας του ρήγματος και τις αντίστοιχες προβολές τους στο οριζόντιο επίπεδο.

Αυτές αποδίδουν τη μεταβολή της κλίσης της επιφάνειας κατά προσέγγιση για τις συγκεκριμένες 8 γνωστές διευθύνσεις της. Οι διαφοροποιήσεις της μεταβολής της κλίσης υπολογίζονται αναλογικά, σύμφωνα με την μετρούμενη κλίση στο ίχνος ή την υπολογιζόμενη από πύκνωση. Έτσι σε γενικές γραμμές, για μεγαλύτερη επιφανειακά μετρούμενη κλίση, αντιστοιχούμε και ανάλογα μεγαλύτερες επί μέρους γωνίες της επιφάνειας του ρήγματος κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση, αύξηση δηλαδή του ρυθμού μεταβολής της κλίσης. Το αντίθετο για μικρότερες.

Στα σημεία τομής των μεταβολών της κλίσης στις 8 διευθύνσεις, με τα οριζόντια επίπεδα ανά 1000μ βάθους, εξάγουμε τις συντεταγμένες για τα αντίστοιχα z έως τα -14000 μέτρα. Επειδή αυτά βρίσκονται θεωρητικά επάνω στην επιφάνεια του ρήγματος, υπολογίζουμε τελικά την μεταβολή του βήματος της κλίσης στο οριζόντιο επίπεδο, τις επί μέρους γωνίες και την συνεφαπτομένη τους.

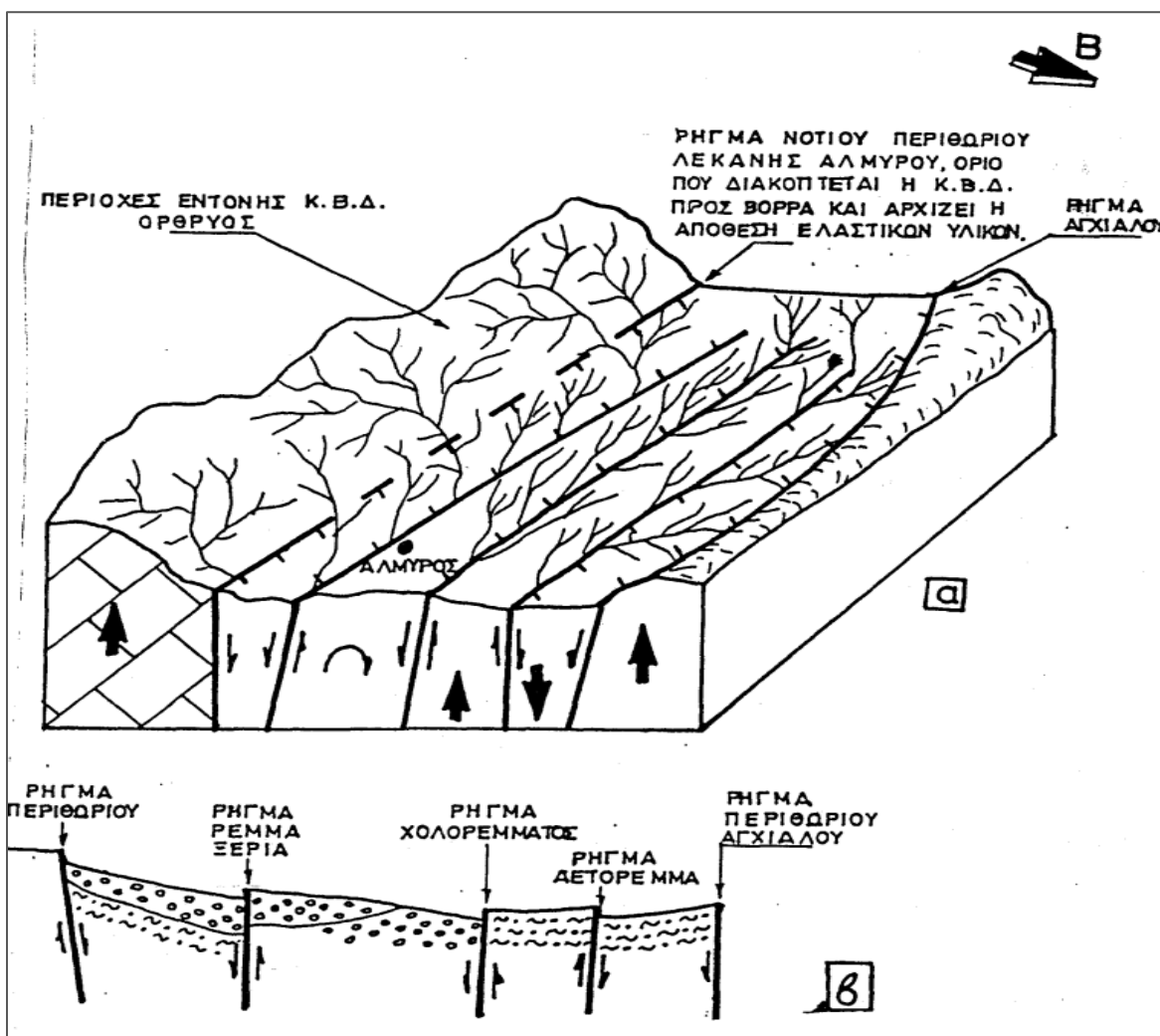
Κατ' αυτόν τον τρόπο εξάγονται  $8 \cdot 12 = 96$  σημεία με γνωστές συντεταγμένες πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος, που αποτελούν μέρος του σκελετού της γεωμετρίας της στον χώρο. Η απλή διαδικασία πύκνωσης των σημείων μέσω παρεμβολής *Kriging* εξάγει μια επιφάνεια που προσεγγίζει αυτή του ρήγματος.

Κατά τη δεύτερη και πιο ολοκληρωμένη διαδικασία, υπολογίζονται οι ισαριθμητικές καμπύλες που αντιστοιχούν σε ανάλογης γεωμετρίας με το ίχνος του ρήγματος γραμμές, ανά 1000 μέτρα βάθους και έως τα 14000 μέτρα, κατ' αντιστοιχία με τα παραπάνω. Αυτές είναι προσαρμοσμένες πάνω στα προηγούμενα σημεία ίδιου βάθους, τα οποία θεωρούμε ότι ανήκουν στον κοινό γεωμετρικό τόπο της επιφάνειας και της κάθε ισαριθμητικής καμπύλης, επηρεάζοντας τη γεωμετρία τους. Με πύκνωση και γενίκευση κατά βάθος των ισαριθμητικών καμπύλων βάθους, εξάγουμε με το εργαλείο *Topo to Raster* στον *ArcMap* την επιφάνεια που προσεγγίζει πληρέστερα αυτή του ρήγματος και συγκρίνουμε με την προηγούμενη.

## 2.5 Δεδομένα από την γεωμορφολογική και τεκτονική ανάλυση

Η Ρηξιγενής ζώνη της Νέας Αγχιάλου και του Παγασητικού κόλπου, όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 17, αποτελείται από κανονικά ρήγματα διευθύνσεως E-W έως EEN – WWS, τα οποία θεωρούνται ενεργά και εντάσσονται στην κατηγορία των νεοτεκτονικών ρηγμάτων. Κάποια από αυτά θεωρούνται και σεισμικά, δηλαδή συνδέονται με σύγχρονους και πρόσφατους μεγάλης έντασης σεισμούς με καταστροφικά αποτελέσματα, όπως αυτοί του 1980 και 1985 [1], [2], [3], [4].

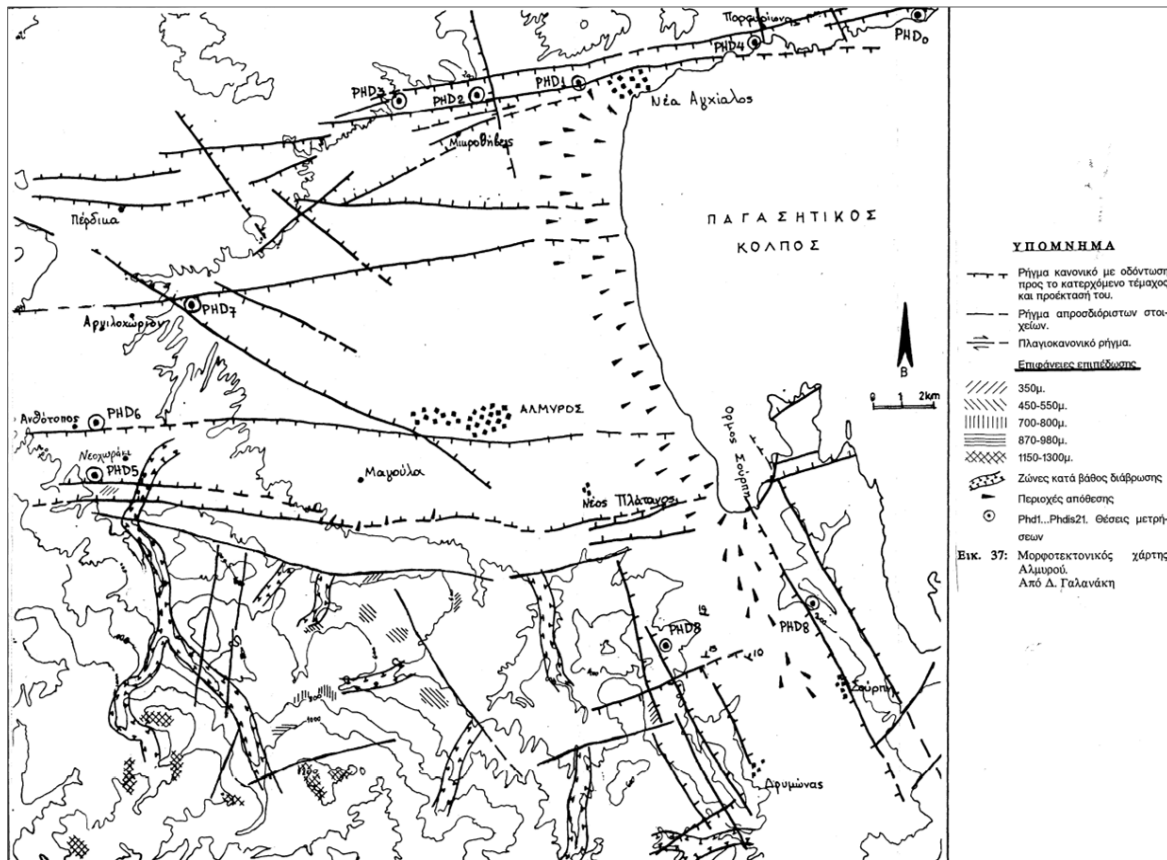
Η γεωμορφολογία της λεκάνης του Αλμυρού, η οποία παρουσιάζει γενικά βύθιση του ανατολικού τμήματος σε σχέση με το δυτικό, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη δράση αυτών των ρηγμάτων (Εικόνα 18). Τα ορατά αποτελέσματά τους περιλαμβάνουν ποτάμιες αναβαθμίδες σε διάφορα υψόμετρα, κατά βάθος διάβρωση στο βόρειο τμήμα του ορεινού όγκου της Όρθρους με δημιουργία κοιλάδων τύπου V, την εξάπλωση προς Α των αλλουβιακών προσχώσεων των ρεμάτων, και επιφανειών επιπέδωσης του ανάγλυφου από διεργασίες διάβρωσης [2].



Εικ. 17 Σχηματικό τρισδιάστατο σκαρίφημα και απλουστευμένη τομή της λεκάνης του Αλμυρού που αφορά στη γεωτεκτονική ερμηνεία και επίδραση των ρηγμάτων στο υδρογραφικό δίκτυο και το ανάγλυφο. (Πηγή: [2])

Τα ρήγματα αυτά έχουν δημιουργηθεί από την εφελκυστική φάση του Νεογενούς - Τεταρτογενούς, όπου το πεδίο τάσεων έχει γενική διεύθυνση N-S. Αποτέλεσμα αυτής είναι η κλιμακωτή δομή παράλληλων ρηγμάτων με την κύρια διάρρηξη, η οποία εκτείνεται σε βάθος τουλάχιστον 18 χιλιομέτρων ως ένα ληστρικό ρήγμα. Αυτό έχει αρκετά μικρότερη κλίση (περίπου 40°) σε ένα βάθος 10 Km από την μεγάλη μετρούμενη στο ίχνος του (περίπου 80°), του «φέροντας» τις πιο αβαθείς διαρρήξεις, ειδικότερα σε νεογενείς σχηματισμούς, «επάνω» στην κύρια διάρρηξη, όπως μπορούμε να δούμε στην προηγούμενη Εικόνα 16. Έχοντας λειτουργήσει από το Πλειστόκαινο έως και σήμερα, δηλαδή για διάστημα 2 εκ. ετών τέμνουν όλους τους αρχαιότερους από αυτά σχηματισμούς [2].

Η κύρια επιφάνεια διάρρηξης, όπως προαναφέρθηκε, θεωρείται αυτή που διέρχεται μέσα από την πόλη της Νέας Αγχιάλου και εκτείνεται στα ανατολικά, συνδεόμενη με το υποθαλάσσιο ρήγμα του Παγασητικού και πιο ανατολικά με το διερχόμενο ρήγμα των περιοχών Καλά Νερά και Μηλιές στο Όρος Πήλιο [2].



Εικ. 18 Χαρτογραφημένα ρήγματα της ευύτερης περιοχής της Λεκάνης του Αλμυρού και γεωμορφολογικά στοιχεία. Διακρίνεται το ρήγμα της Νέας Αγχιάλου και τα σημεία μέτρησης της κλίσης του με τις αντίστοιχες διευθύνσεις. (Πηγή: [2].)

Τα στοιχεία του ίχνους που λαμβάνονται από τον χάρτη της Εικόνας 18, όπως και από τις αναλυτικές απεικονίσεις των μετρήσεων αξιοποιούνται για την μοντελοποίηση του ρήματος της Ν. Αγχιάλου σε τρεις διαστάσεις.

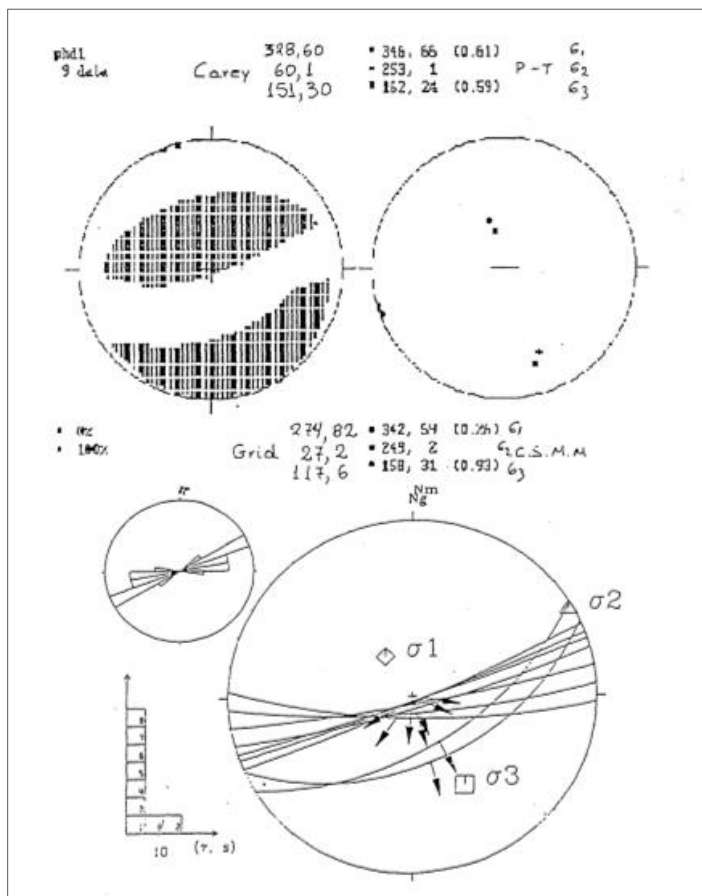


### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1 Συλλογή πρωτογενών χωρικών δεδομένων κλίσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί θα χρησιμοποιηθούν, τα δεδομένα επιφανειακής μέτρησης των κλίσεων και αυτά των μηχανισμών γέννησης σεισμών. Αυτοί αποδίδουν το επίπεδο τμήμα του ρήγματος που προκάλεσε το σεισμικό γεγονός, επομένως την κλίση του Dip και τη διεύθυνσή του Strike, ενώ τα ίδια στοιχεία μετρώνται επί του κατόπτρου του ρήγματος στο ανάγλυφο στα σημεία μελέτης.

Τα στοιχεία της κλίσης (διεύθυνση και γωνία), εξάγονται από υπολογιστικές διαδικασίες βάσει αναλύσεων και από τα δίκτυα Schmidt, όπως φαίνονται στην Εικόνα 19 [2]. Από τα στοιχεία της κλίσης, αντίστοιχα με τα στερεοδιαγράμματα των μηχανισμών γένεσης στις Εικόνας 12, λαμβάνουμε τα αριθμητικά χαρακτηριστικά του μετρούμενου επιπέδου, σε συγκεκριμένο σημείο. Κατ' αυτόν τον τρόπο θεωρούμε μια μέση τιμή της κλίσης ανά περιοχή, η οποία όσο πυκνότερα σημεία μέτρησης έχει, τόσο τα αντίστοιχα δεδομένα αυξάνονται. Η χρήση GPS δεν ήταν εφικτή κατά τη διαδικασία χαρτογράφησης στην κλίμακα 1:50000. Έτσι, η διόρθωση των ψηφιοποιημένων σημειακών δεδομένων, όπως και του ίχνους του ρήγματος σύμφωνα με το ανάγλυφο, έγινε με τη χρήση ορθοφωτογραφιών και ΨΜΕ.



Εικ 19. Τεκτονική ανάλυση των μετρήσεων κατά μήκος της ρηξιγενούς ζώνης στην περιοχή της Ν. Αγκιάλου  
 α) Προβολές σε δίκτυο Schmidt (νότιο ημισφαίριο) των ρηξιγενών επιφανειών και των γραμμώσεων ολίσθησης, καθώς και οι θέσεις των αξόνων  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , με τη μέθοδο του μέσου ταυυστή τάσης. β) αποτελέσματα της εφαρμογής των μεθόδων, ορθών διεδρων γωνιών, C.S.M.M και grid. (Πηγή: [2])

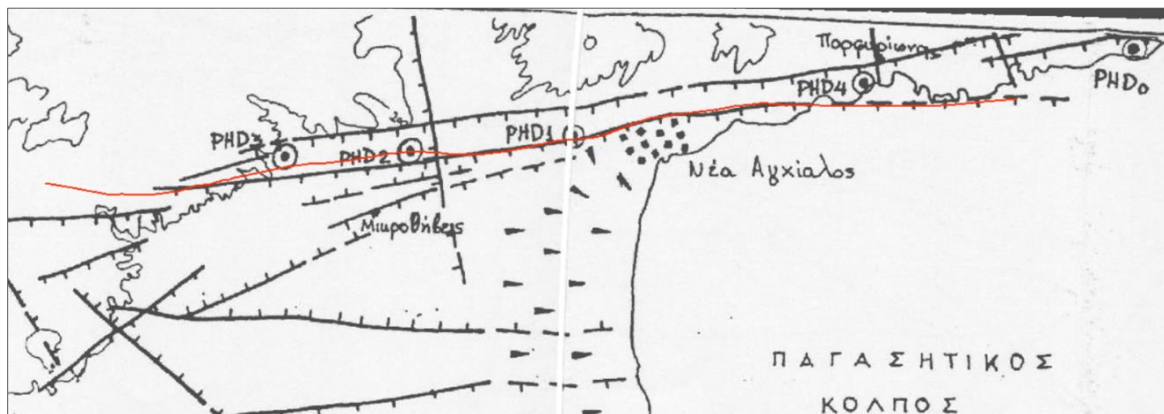
### 3.2 Ψηφιοποίηση ίχνους ρήγματος

Τα έως τώρα υπάρχοντα δεδομένα προέρχονται από υπαίθριες μετρήσεις κλίσης και διεύθυνσης αυτής, επάνω στο κάτοπτρο του ρήγματος, όπως και πύκνωση τους με υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών τους. Εξ αυτών υπολογίσθηκαν σημειακά δεδομένα επάνω στις διευθύνσεις κλίσης που ανήκουν στην επιφάνεια του ρήγματος, σύμφωνα με την γεωμετρία της κατακόρυφης τομής της Εικόνας 25 οποία εξήχθη από ερμηνεία των σεισμολογικών δεδομένων [1].

Η ψηφιοποίηση του χαρτογραφημένου ίχνους του ρήγματος περιλαμβάνει πολλά επιπλέον σημεία τα οποία ανήκουν στην επιφάνεια του ρήγματος. Εκτός αυτού η γεωμετρία του ίχνους, που είναι τομή της επιφάνειας του ρήγματος με το ανάγλυφο, είναι ως ένα μεγάλο βαθμό σχετική με τις υπόλοιπες τομές με οριζόντια επίπεδα, όσο προχωράμε σε βάθος. Για την ορθότερη προσέγγιση της γεωμετρίας αυτής, εκτός από την ψηφιοποίηση του ίχνους του ρήγματος, θα υπολογιστεί και η αντίστοιχη τομή της επιφάνειας του με το οριζόντιο επίπεδο για υψόμετρο 0.

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας και η οπτικοποίηση, θα πραγματοποιηθούν στο λογισμικό *ArcGIS* και συγκεκριμένα με χρήση *ArcMap* & *ArcScene*. Για τις παραπάνω ανάγκες δημιουργήθηκε η γεωβάση *3D\_GEODATABASE.gdb*. Αυτή φιλοξενεί το ψηφιακό υπόβαθρο, τα γεωαναφερμένα raster αρχεία από τα οποία έγινε η ψηφιοποίηση και τα διανυσματικά επίπεδα που δομείται η χωρική και περιγραφική πληροφορία της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος. Η γεωβάση όπως και όλα τα *Feature Datasets* που περιλαμβάνει έχει ως προβολικό σύστημα το ΕΓΣΑ 87 (Greek Grid).

Η ψηφιοποίηση του ίχνους του ρήγματος της Νέας Αγχιάλου πραγματοποιήθηκε βάσει του σαρωμένου και γεωαναφερμένου χάρτη κλίμακας 1:50000, τμήμα του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 22 [2]. Η βελτίωση της χωρικής ακρίβειας έγινε βάσει του ψηφιακού υποβάθρου και των ορθοφωτοχαρτών του Ελληνικού Κτηματολογίου, ανάλυσης 2,5 και 0,25 μέτρων αντίστοιχα όπως φαίνεται στις Εικόνες 22 και 23.



Εικ. 20 Γεωαναφερμένος χάρτης της Εικόνας 18 και το ψηφιοποιημένο ίχνος του ρήγματος. Στα σημεία PHD πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κλίσης του ρήγματος (Πηγή: [1])

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε μεγέθυνση ανά περιοχή και για κλίμακα έως και 1:1000. Με τον τρόπο αυτό έγινε προσαρμογή του ίχνους επάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο, Εδάφους, με παράλληλη επισκόπηση των ορθοφωτογραφιών. Από τις τελευταίες μπορούν να εξαχθούν έμμεσα συμπεράσματα για τη διέλευση του ρήγματος για ερμηνεία της συνέχειας ή μη του είδους των σχηματισμών, την ύπαρξη κώνων κορημάτων, όπως και την έλλειψη δεδομένων σε περιοχές με δόμηση η αγρούς. Στις εμφανείς περιπτώσεις απότομης αλλαγής του ανάγλυφου στο ΨΜΕ, αυτή

συνοδεύεται από τις αντίστοιχες διαμορφώσεις της εικόνας του, όπως εμφάνιση απότομων πρανών, λωρίδες βράχου μέσα σε φυτοκάλυψη, ή σε σπάνιες περιπτώσεις κατοπτρικές επιφάνειες.



Εικ. 21 Περιοχή μελέτης και ψηφιοποιημένο ίχνος του ρήγματος της Νέας Αγκιάλου σε υπόβαθρο ορθοφωτοχαρτών του Ελληνικού Κτηματολογίου

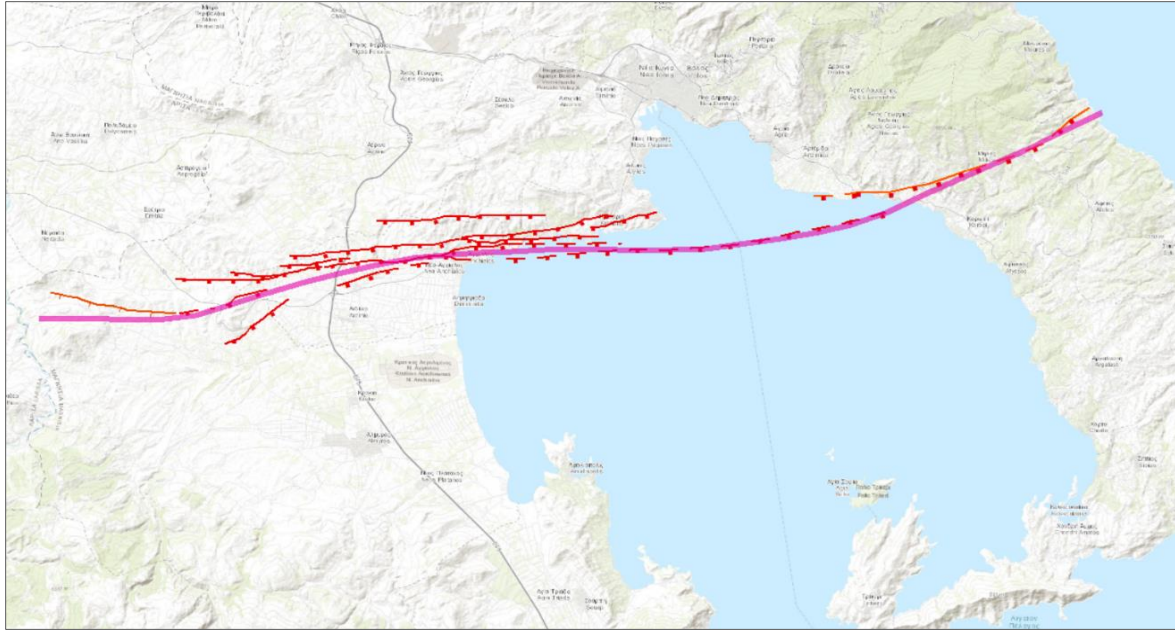


Εικ. 23 Τμήμα του ψηφιοποιημένου ίχνος του ρήγματος στο ανάγλυφο του ΨΜΕ

Τα ψηφιοποιημένο ίχνος σε επόμενη φάση, αποκτά και την τρίτη διάσταση  $z$  με προβολή του πάνω στο ανάγλυφο, το οποίο αντιπροσωπεύεται από το ΨΜΕ, θεωρώντας το ως υπόβαθρο του (Base Height). Η διαδικασία γίνεται μέσω της εργαλειοθήκης του *ArcMap* και συγκεκριμένα από τον *3D Analyst* και το *Functional Surface* με χρήση της εντολής *Interpolate Shape*. Το αποτέλεσμα είναι το νέο γραμμικό αρχείο *Fault Trace 3D*, ενώ η τρίτη διάσταση υπολογίζεται στο πεδίο  $z$  (elevation).

Κατ' αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα προβολής του στον *Arc Scene* ως 3D γραμμικό αντικείμενο, ενώ θα συμμετέχει στη μοντελοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος ως το σύνολο των σημείων που έχουν το άνω όριο των τιμών  $z$ , της πολυγωνικής επιφάνειας που ανήκουν.

Χάριν απλοποίησης των αναγκών της οπτικοποίησης ορισμένα μικρά τμήματα του ίχνους τα οποία δείχνουν από τους ορθοφωτοχάρτες να βρίσκονται κάτω από σύγχρονους σχηματισμούς, όπως αλλουβιακές προσχώσεις ή χωράφια, δεν αφαιρούνται. Θεωρούμε ότι ανήκουν στην ενιαία ρηγιγενή επιφάνεια που εμφανίζεται σε όλο το μήκος της τομής της με το ανάγλυφο.



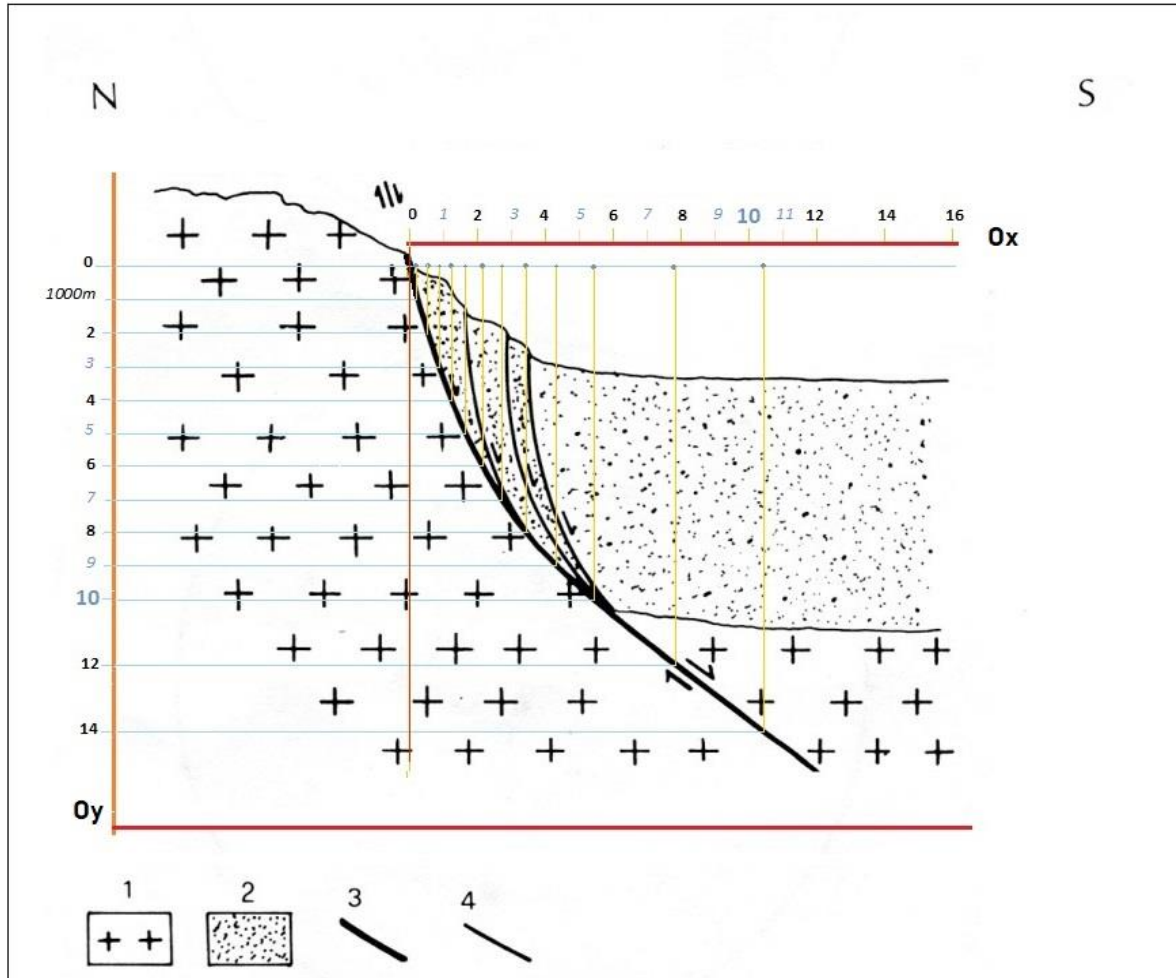
**Εικ. 24** Περιοχή μελέτης σε υπόβαθρο ESRI, διακρίνονται όλα τα ρήγματα της ζώνης Νέας Αγχιάλου, όπως και η ζώνη με μωβ χρώμα. Οι οδοντωτοί συμβολισμοί των ρηγμάτων δείχνουν τη διεύθυνση κλίσης. (Πηγή [gaia.igme.gr/portal/Active](http://gaia.igme.gr/portal/Active) – Seismic Faults)

Η προσέγγιση στη ζητούμενη μοντελοποίηση και απεικόνιση της επιφάνειας του ρήγματος σε τρεις διαστάσεις, είναι προσαρμοσμένη στην:

1. Έλλειψη επαρκούς αριθμού επιφανειακών μετρήσεων κλίσης και αξιοποίηση των υπαρχόντων δεδομένων κλίσης και διεύθυνσης.
2. Έλλειψη δεδομένων γεωτρήσεων και γεωφυσικών διασκοπήσεων.
3. Αναζήτηση στοιχείων της γεωμετρίας σε βάθος, για την οποία έχουμε μόνο σεισμικά δεδομένα με αρκετά μεγάλο εύρος πιθανού χωρικού σφάλματος και για συνθήκες αυξανόμενης έλλειψης γνώσης προς τα βαθύτερα.
4. Αξιοποίηση της κατακόρυφης τομής του ρήγματος, που προκύπτει από την ανάλυση των σεισμικών δεδομένων από τους σεισμολόγους, δίνοντας ικανοποιητική προσέγγιση.
5. Δυνατότητα υπολογισμού της μεταβολής της κλίσης της επιφάνειας του ρήγματος προς συγκεκριμένες διευθύνσεις που εξάγεται από την παραπάνω τομή. Από αυτή προσαρμοσμένη σε διαφορετικές μετρούμενες στην επιφάνεια γωνίες κλίσης, κάθετα με τη διεύθυνση τους, υπολογίζονται και οι προβολές των διαφορετικών κλίσεων για τις 8 διευθύνσεις στο επίπεδο.
6. Δυνατότητα υπολογισμού των σημείων της επιφάνειας με τα διαδοχικά οριζόντια επίπεδα αυξανόμενου βάθους ανά 1.000 m. Έτσι προκύπτουν τα σημεία τομής για συγκεκριμένη γωνία κλίσης όπως και οι συντεταγμένες τους. Μεταφέροντας και προσαρμόζοντας σε αυτά γενικευμένη μορφή του ίχνους, δημιουργούνται ισარიθμητικών καμπυλών βάθους, ως 3D αντικείμενα, ανά -1.000 μέτρα.
7. Δυνατότητα εξαγωγής της τρίτης διάστασης του ίχνους του ρήγματος στην επιφάνεια, αξιοποιώντας το ως 3D αντικείμενο, υπό σημειακή μορφή.
8. Δυνατότητα υπολογισμού του πολυγώνου, το οποίο αντιστοιχεί στην προβολή της επιφάνειας του ρήγματος στο οριζόντιο επίπεδο, περιλαμβάνοντας το ίχνος και τις ισარიθμικές καμπύλες.
9. Εφαρμογή μεθόδων χωρικής παρεμβολής *Kriging* και *Toro to Raster* από τα εγγραμμά του λογισμικού ArcMap, αξιοποιώντας τα παραπάνω 3D δεδομένα.

### 3.3 Εφαρμογή μεθοδολογίας

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25 η οποία απεικονίζει σχηματικά την κατακόρυφη τομή του ρήγματος η κλίση του μειώνεται με το βάθος. Από τις 80° στην επιφάνεια μεταβολή της είναι μεγαλύτερη από τα 5 Km βάθους έως τα 10 περίπου, όπου σταθεροποιείται στις 40° περίπου [1].



Εικ. 25 Τροποποιημένη σχηματική τομή της επιφάνειας του ρήγματος με προσθήκη των αντίστοιχων σημείων τομής της προβολής του ίχνους της μεταβολής της κλίσης της – καμπύλη γραμμή - στο οριζόντιο επίπεδο για βήμα 1000μ, πάνω στον οριζόντιο άξονα O<sub>x</sub>. Αντίστοιχα η τομή της καμπύλης με τα οριζόντια επίπεδα βάθους ανά 1000μ στον κατακόρυφο άξονα O<sub>y</sub> (Πηγή:[1] )

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παραπάνω κατακόρυφη σχηματική τομή έχει προκύψει από ερμηνεία σεισμολογικών δεδομένων [1]. Αποτελεί μια πολύ ικανοποιητική προσέγγιση καθώς συμφωνεί γεωμετρικά τόσο στις κλίσεις όσο και στις επί μέρους αποστάσεις των στοιχείων της με τις συντεταγμένες που δίνονται για τους μηχανισμούς γένεσης και τα επίκενträ τους, όταν αυτά εισαχθούν ως δεδομένα στον ArcMap. Η έλλειψη γνώσης της γεωμετρίας των βαθύτερων τμημάτων, θα κάλυπταν με δεδομένα υπόκεντρων και μηχανισμών γένεσης σεισμών, από διαφορετικές πηγές, τα οποία συγκλίνουν συστηματικά ως προς τη χωρική κατανομή τους. Αντί αυτών στην παρούσα περίπτωση, υπάρχουν τα ήδη επεξεργασμένα δεδομένα από την επιστήμη της σεισμολογίας υπό μορφή της κατακόρυφης τομής της Εικόνας 25.

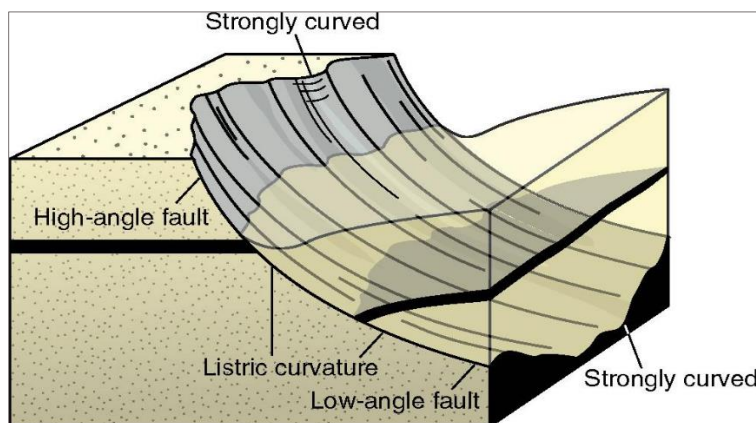
Αποδεχόμαστε, ότι η αρχή της ελάχιστης κλίσης των  $40^\circ$  βρίσκεται στα σημεία τομής του ρήγματος με το επίπεδο των  $-10$  km. Κατ' αυτόν τον τρόπο αξιοποιούμε με προσεγγιστική μέθοδο τα δεδομένα του παραπάνω σχήματος, που προκύπτουν από τη σεισμολογική ανάλυση [1]. Χρησιμοποιώντας την τομή αυτή κατ' αναλογία για τα οκτώ σημεία μετρούμενης κλίσης, θα εξάγουμε τη θέση και τη γεωμετρία της επιφάνειας στο χώρο.

Καθώς δεν υπάρχει κλίμακα στην σχηματική τομή, δεν είμαστε εις θέση να γνωρίζουμε επακριβώς ποιό σημείο της καμπύλης της τομής του ρήγματος αντιπροσωπεύει βάθος  $10$  km. Αποδελτιώνοντας μετρητικά τη μεταβολή της κλίσης της «τοποθετούμε» το βάθος των  $10$  km στο σημείο που αρχίζει και γίνεται  $40$  μοίρες.

Η λογική αυτής της μεθόδου, αποδεχόμενοι την αξιοπιστία της παραπάνω κατακόρυφης τομής, βασίζεται στα σεισμολογικά δεδομένα των μηχανισμών γένεσης τα οποία σε βάθος περίπου  $10$  km δίνουν ένα επίπεδο μικρότερης κλίσης (Πίνακες 1,2,3 και Εικόνα 12) [1], [4]. Αυτό αντιστοιχεί στη δομή ενός λιστρικού ρήγματος (Εικόνα 25α) το οποίο δεχόμαστε ότι έχει σχετικά σταθερή κλίση περίπου  $40^\circ$  από το βάθος των  $10$  km και κάτω. Παρατηρούμε ότι:

- Εάν το προηγούμενο συμβαίνει βαθύτερα ή ρηχότερα, τότε ο μηχανισμός γένεσης σεισμών θα έδειχνε μεγαλύτερο βάθος για αυτό άρα και η «τοποθέτηση» του θα έπρεπε να είναι αντίστοιχη. Επιπλέον η επιφανειακή γωνία κλίσης της επιφάνειας στην κατακόρυφη τομή θα ήταν αντίστοιχη, ενώ τώρα συμφωνεί.
- Το υπόκεντρο του σεισμού άρα και το βάθος των  $10$  χιλιομέτρων, βρίσκεται σε απόσταση περίπου  $5$  km από το ίχνος, πάνω στον οριζόντιο άξονα της κλίσης υπολογιζόμενο από τα φ,λ. Συμπίπτει δηλαδή με τη θέση που βρίσκεται πάνω στην τομή του ρήγματος, και έτσι η Εικόνα 25 μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει ίδια οριζόντια και κατακόρυφη κλίμακα.

Επομένως το πρόβλημα των τριών διαστάσεων αντιμετωπίζεται σε δύο, θεωρώντας ότι σε κάθε μια από τις  $8$  διευθύνσεις γνωστής επιφανειακής κλίσης του ρήγματος, αυτή μεταβάλλεται σύμφωνα με την Εικόνα 25 και κατ' αναλογία. Θεωρούμε ότι ο οριζόντιος άξονας  $Ox$  βρίσκεται επάνω στη διεύθυνση κλίσης (σύμφωνα με τη μέτρηση), εκεί όπου ανήκουν και οι προβολές των σημείων τομής με τα οριζόντια επίπεδα βάθους (ανά  $1000$  μ). Στον άξονα  $Oz$ , βρίσκονται οι προβολές των σημείων τομής της επιφάνειας του ρήγματος για τη συγκεκριμένη διεύθυνση με τα επίπεδα βάθους, πάνω στο κατακόρυφο επίπεδο, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους  $1.000$  m.



Εικ. 25α. Δομή ενός λιστρικού ρήγματος (listric fault). Είναι εμφανείς η σταδιακή μείωση της κλίσης της επιφάνειας από μεγαλύτερη στο ανάγλυφο σε μικρότερη στα βαθύτερα. Παράλληλη είναι η δημιουργία του αντιλιστρικού ρήγματος (antilistric fault). Η δομές αυτές λαμβάνουν χώρα σε εφελκυστικά πεδία. (Πηγή: Λόζιος Σ . [16])

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις μεταξύ των παραπάνω για αρχική μετρούμενη κλίση 80 μοίρες, θεωρώντας ότι αυτή παραμένει ίδια από το υψόμετρο του σημείου μέτρησης και για τα 1.000 πρώτα m βάθους.

$D_n$	ΒΑΘΟΣ (μ) (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ $D_{n+1} - D_n =$ 1000m)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΒΗΜΑ $S_n$ (ΠΡΟΒΟΛΗ ΒΑΘΟΥΣ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΙΧΝΟΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ)	$S_n$	ΔΙΑΔΟΧΙΚΟ ΒΗΜΑ $S(D_n)+1 - S(D_n)$	ΣΥΝΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗ ΓΙΑ $S(D_n)+1 - S(D_n) /$ 1000	ΚΛΙΣΗ ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΓΙΑ $S_{n+1} - S_n$ (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΒΑΘΟΥΣ $D_{n+1} - D_n = 1000m$ )
$D_0$	0	0	$S_0$			
$D_1$	1000	180	$S_1$	180.00	0.180000	<b>80</b>
$D_2$	2000	500	$S_2$	320.00	0.320000	<b>72</b>
$D_3$	3000	850	$S_3$	350.00	0.350000	<b>71</b>
$D_4$	4000	1200	$S_4$	350.00	0.350000	<b>71</b>
$D_5$	5000	1600	$S_5$	400.00	0.400000	<b>68</b>
$D_6$	6000	2150	$S_6$	550.00	0.550000	<b>61</b>
$D_7$	7000	2700	$S_7$	550.00	0.550000	<b>61</b>
$D_8$	8000	3400	$S_8$	700.00	0.700000	<b>55</b>
$D_9$	9000	4300	$S_9$	900.00	0.900000	<b>48</b>
$D_{10}$	10000	5400	$S_{10}$	1100.00	1.100000	<b>42</b>
$D_{12}$	12000	7800	$S_{12}$	2400.00	1.200000	<b>40</b>
$D_{14}$	14000	10400	$S_{14}$	2600.00	1.300000	<b>38</b>

**Πίνακας 4. δεδομένα μεταβολής κλίσης για αρχική μετρούμενη γωνία 80° προς συγκεκριμένη διεύθυνση**

Για να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4 και με βάση τα προηγούμενα, δημιουργούνται στο περιβάλλον του *ArcMap* δύο επίπεδα που αντιπροσωπεύουν:

1.  **$D_n$  ΣΗΜΕΙΑΚΟ:** Τις προβολές στο οριζόντιο επίπεδο 0, των σημείων τομής της επιφάνειας του ρήγματος με τα διαδοχικά οριζόντια επίπεδα ανά βάθος 1.000 m για τις συγκεκριμένες 8 διευθύνσεις. Τα σημεία  $D_{ip}$  ψηφιοποιούνται από τον μορφοτεκτονικό χάρτη [2] με τα στοιχεία που εξάγονται από τα δίκτυα *Schmidt*, και για τις διευθύνσεις των επιπέδων που αντιστοιχούν στα σημεία μέτρησης. Για να υπολογίσουμε τη θέση των σημείων  $D_0$ , πολλαπλασιάζουμε το υψόμετρο των αντίστοιχων σημείων  $D_{ip}$  με την συνεφαπτομένη της μετρούμενης γωνίας κλίσης. Έχουμε την απόσταση τους επάνω στο διάνυσμα της προβολής της κάθε διεύθυνσης στο οριζόντιο επίπεδο ( $S_{Tot}$ ), από τα σημεία  $D_{ip}$ . Κατ' επέκταση από τα σημεία  $D_0$  θα διέρχεται και η ισαριθμητική καμπύλη των 0 μέτρων της επιφάνειας του ρήγματος.
2.  **$S_n$  ΓΡΑΜΜΙΚΟ:** Από τις αποστάσεις διαδοχικών σημείων  $D_n$  ορίζουμε το οριζόντιο βήμα  $S_n$  ανά 1000 μέτρα βάθους, της μεταβολής της κλίσης, για κάθε μία εκ των 8 διευθύνσεων της μετρούμενης κλίσης στα σημεία  $D_{ip}$  (x,y,z). Κατ' αυτόν τον τρόπο και καθώς η κλίση είναι μη γραμμικά μεταβαλλόμενη ως προς τον οριζόντιο άξονα, τμηματοποιείται σε διαδοχικά διανύσματα, ανά 1000 μέτρα βάθους, με το κατακόρυφο βήμα να είναι σταθερό. Επομένως τα διανύσματα  $S_n$ , αντιπροσωπεύουν την προβολή στον άξονα  $Ox$  των διαδοχικών διανυσμάτων κλίσης. Το μήκος τους ισούται με το γινόμενο της συνεφαπτομένης της επί μέρους γωνίας κλίσης με το κατακόρυφο βήμα, την οποία για 1000 μέτρα θεωρούμε σταθερή. Αντιστρόφως, από την

απόσταση δύο διαδοχικών Dn, εξάγουμε την γωνία κλίσης για το συγκεκριμένο βάθος. Το διάλυμα S Tot, ισούται με το άθροισμα των διανυσμάτων προβολής της κλίσης στο οριζόντιο επίπεδο.

Ο λόγος  $[S(Dn)+1 - S(Dn)] / 1000$  δίνει τη συνεφαπτομένη της γωνίας υπό την οποία βυθίζεται το ρήγμα στη συγκεκριμένη διεύθυνση και για το συγκεκριμένο βάθος, για εύρος 1000μ. Ισοδυναμεί με τη μεταβολή της κλίσης της επιφάνειας για τη συγκεκριμένη διεύθυνση και βάθος, μιας και αυτή μεταβάλλεται τόσο κατακόρυφα όσο και κατά μήκος του ρήγματος.

Η δημιουργία των ευθυγράμμων τμημάτων σε συγκεκριμένη διεύθυνση και απόσταση γίνεται με χρήση εργαλείων COGO Report και Construct 2 point lines, ενώ η αντιγραφή και μεταφορά τους με αναλογίες που προκύπτουν από την αρχική μετρούμενη κλίση γίνονται με *spatial adjustment*. Η διαφοροποίηση του μήκους των διανυσμάτων για τις 8 διευθύνσεις, ανάλογα με την αρχική μετρούμενη κλίση, διαμορφώνει και τη γεωμετρία της υπολογιζόμενης επιφάνειας όσο προχωράμε σε βάθος.

Ο υπολογισμός των διανυσμάτων γίνεται αρχικά για μετρούμενη κλίση 80° Πίνακας 4, η οποία θεωρείται και η αρχική κλίση του ρήγματος στην επιφάνεια, στην κατακόρυφη τομή της Εικόνας 25.

Στις περιπτώσεις όπου η μετρούμενη κλίση στο ίχνος του ρήγματος είναι διαφορετική από 80°, αντιστρέφοντας τη διαδικασία, υπολογίζουμε το οριζόντιο βήμα με τις αντίστοιχες οριζόντιες διαφοροποιήσεις στην κλίση. Η αναλογία της γωνίας κάθε μετρούμενης κλίσης και των 80°, δίνει και την αναλογία των υπολοίπων επί μέρους γωνιών για τα αντίστοιχα βάθη, θεωρώντας ότι έχει μεταβληθεί και η συνολική κλίση ανάλογα.

Συγκεκριμένα, για αρχική κλίση 76° θεωρούμε ότι και οι υπόλοιπες κλίσεις θα διαβαθμίζονται αντιστοιχούμενες στα  $76/80 = 0,95$  επί των υπολογισθέντων κλίσεων για μετρούμενη 80 μοίρες, δηλαδή στο 95% τους. Από τα 10.000 m βάθους και έπειτα, υποθέτουμε ίδια κλίση σύμφωνα με την Εικόνα 25, άρα σε τέτοιο βάθος η γωνία παραμένει σταθερή περίπου 40° και μειούται αργά, έως τα -14.000 μέτρα. Οι τιμές στις γωνίες κλίσης προκύπτουν από την στρογγυλοποίηση του οριζόντιου βήματος. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.

Dn	ΒΑΘΟΣ (μ) (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ Dn+1 - Dn = 1000m)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΒΗΜΑ Sn (ΠΡΟΒΟΛΗ ΒΑΘΟΥΣ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΙΧΝΟΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ)	Sn	ΔΙΑΔΟΧΙΚΟ ΒΗΜΑ S(Dn)+1 - S(Dn)	ΣΥΝΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗ ΓΙΑ S(Dn)+1 - S(Dn) / 1000	ΚΛΙΣΗ ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΓΙΑ Sn+1 - Sn (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΒΑΘΟΥΣ Dn+1 - Dn = 1000m)	
D <sub>0</sub>	0	0	S <sub>0</sub>				
D <sub>1</sub>	1000	250	S <sub>1</sub>	250.00	0.250000	76	
D <sub>2</sub>	2000	640	S <sub>2</sub>	390.00	0.390000	69	
D <sub>3</sub>	3000	1060.00	S <sub>3</sub>	420.00	0.420000	67	
D <sub>4</sub>	4000	1480.00	S <sub>4</sub>	420.00	0.420000	67	
D <sub>5</sub>	5000	1950.00	S <sub>5</sub>	470.00	0.470000	65	
D <sub>6</sub>	6000	2570.00	S <sub>6</sub>	620.00	0.620000	58	
D <sub>7</sub>	7000	3190.00	S <sub>7</sub>	620.00	0.620000	58	
D <sub>8</sub>	8000	3960.00	S <sub>8</sub>	770.00	0.770000	52	
D <sub>9</sub>	9000	4940.00	S <sub>9</sub>	980.00	0.980000	46	
D <sub>10</sub>	10000	6120.00	S <sub>10</sub>	1180.00	1.180000	40	
D <sub>12</sub>	12000	8520.00	S <sub>12</sub>	2400.00	1.200000	40	Υποθέτουμε ίδια κλίση
D <sub>14</sub>	14000	11120.00	S <sub>14</sub>	2600.00	1.300000	38	

Πίνακας 5 δεδομένα μεταβολής κλίσης για αρχική μετρούμενη γωνία 76° προς συγκεκριμένη διεύθυνση



Ομοίως για μετρούμενη κλίση 85°, οι διαδοχικές γωνίες κλίσης αντιστοιχούν στο  $85/80 = 106,25\%$  αυτών που υπολογίσαμε βάσει της Εικόνας 25 και του Πίνακα 4 για αρχική κλίση 80°. Τα δεδομένα αυτά φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.

D <sub>n</sub>	ΒΑΘΟΣ (μ) (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ D <sub>n+1</sub> - D <sub>n</sub> = 1000m)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΒΗΜΑ S <sub>n</sub> (ΠΡΟΒΟΛΗ ΒΑΘΟΥΣ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΙΧΝΟΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ)	S <sub>n</sub>	ΔΙΑΔΟΧΙΚΟ ΒΗΜΑ S(D <sub>n</sub> )+1 - S(D <sub>n</sub> )	ΣΥΝΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗ ΓΙΑ S(D <sub>n</sub> )+1 - S(D <sub>n</sub> ) / 1000	ΚΛΙΣΗ ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΓΙΑ S <sub>n+1</sub> - S <sub>n</sub> (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΒΑΘΟΥΣ D <sub>n+1</sub> - D <sub>n</sub> = 1000m)	
D <sub>0</sub>	0	0	S <sub>0</sub>				
D <sub>1</sub>	1000	90	S <sub>1</sub>	90.00	0.090000	85	
D <sub>2</sub>	2000	330	S <sub>2</sub>	240.00	0.240000	77	
D <sub>3</sub>	3000	590	S <sub>3</sub>	260.00	0.260000	75	
D <sub>4</sub>	4000	850	S <sub>4</sub>	260.00	0.260000	75	
D <sub>5</sub>	5000	1170	S <sub>5</sub>	320.00	0.320000	72	
D <sub>6</sub>	6000	1640	S <sub>6</sub>	470.00	0.470000	65	
D <sub>7</sub>	7000	2110	S <sub>7</sub>	470.00	0.470000	65	
D <sub>8</sub>	8000	2730	S <sub>8</sub>	620.00	0.620000	58	
D <sub>9</sub>	9000	3550	S <sub>9</sub>	820.00	0.820000	51	
D <sub>10</sub>	10000	4550	S <sub>10</sub>	1000.00	1.000000	45	
D <sub>12</sub>	12000	6950	S <sub>12</sub>	2400.00	1.200000	40	Υποθέτουμε ίδια κλίση
D <sub>14</sub>	14000	9550	S <sub>14</sub>	2600.00	1.300000	38	

Πίνακας 6 δεδομένα μεταβολής κλίσης για αρχική μετρούμενη γωνία 85° προς συγκεκριμένη διεύθυνση  $PHD1 = 85^\circ$

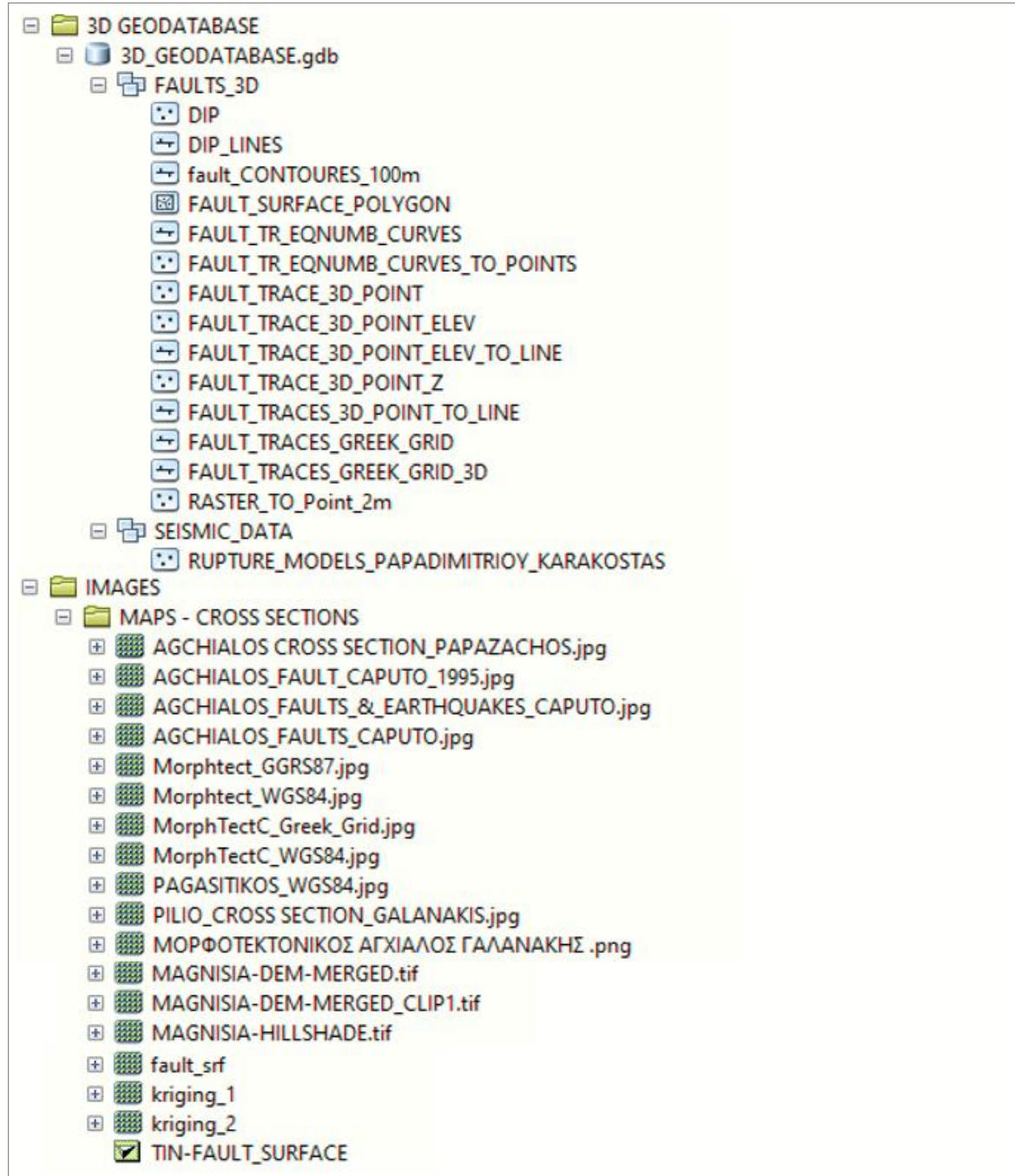
Για υπολογιζόμενη κλίση 82°, οι διαδοχικές γωνίες κλίσης αντιστοιχούν στο  $82/80 = 102,5\%$  αυτών που υπολογίσαμε βάσει της Εικόνας 25 και του Πίνακα 4 για αρχική κλίση 80°. Η κλίση σε αυτή το σημείο προκύπτει ως προσέγγιση του μέσου όρου των μετρούμενων κλίσεων στα σημεία:  $PHD1 = 85^\circ$  και  $PHD4 = 80^\circ$ . Τα δεδομένα αυτά φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 7.

D <sub>n</sub>	ΒΑΘΟΣ (μ) (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ D <sub>n+1</sub> - D <sub>n</sub> = 1000m)	ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΒΗΜΑ S <sub>n</sub> (ΠΡΟΒΟΛΗ ΒΑΘΟΥΣ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΙΧΝΟΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ)	S <sub>n</sub>	ΔΙΑΔΟΧΙΚΟ ΒΗΜΑ S(D <sub>n</sub> )+1 - S(D <sub>n</sub> )	ΣΥΝΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗ ΓΙΑ S(D <sub>n</sub> )+1 - S(D <sub>n</sub> ) / 1000	ΚΛΙΣΗ ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΓΙΑ S <sub>n+1</sub> - S <sub>n</sub> (ΒΗΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΒΑΘΟΥΣ D <sub>n+1</sub> - D <sub>n</sub> = 1000m)	
D <sub>0</sub>	0	0	S <sub>0</sub>				
D <sub>1</sub>	1000	140	S <sub>1</sub>	140.00	0.140000	82	82
D <sub>2</sub>	2000	420	S <sub>2</sub>	280.00	0.280000	74	74
D <sub>3</sub>	3000	750	S <sub>3</sub>	330.00	0.330000	72	72
D <sub>4</sub>	4000	1080	S <sub>4</sub>	330.00	0.330000	72	72
D <sub>5</sub>	5000	1450	S <sub>5</sub>	370.00	0.370000	70	70
D <sub>6</sub>	6000	1950	S <sub>6</sub>	500.00	0.500000	63	63
D <sub>7</sub>	7000	2450	S <sub>7</sub>	500.00	0.500000	63	63
D <sub>8</sub>	8000	3100	S <sub>8</sub>	650.00	0.650000	57	56
D <sub>9</sub>	9000	4000	S <sub>9</sub>	900.00	0.900000	48	49
D <sub>10</sub>	10000	5100	S <sub>10</sub>	1100.00	1.100000	42	43
D <sub>12</sub>	12000	7500	S <sub>12</sub>	2400.00	1.200000	40	Υποθέτουμε ίδια κλίση
D <sub>14</sub>	14000	10100	S <sub>14</sub>	2600.00	1.300000	38	

Πίνακας 7 δεδομένα μεταβολής κλίσης για υπολογισμένη κατά προσέγγιση γωνία 80° προς συγκεκριμένη διεύθυνση ( $PHD1 = 85^\circ - PHD4 = 80^\circ$ )

### 3.4 Δομή των δεδομένων στη γεωβάση

Η Δομή της Γεωβάσης που περιλαμβάνει τα δεδομένα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 26. Τα διανυσματικά επίπεδα που δημιουργήθηκαν, είχαν σαν υπόβαθρο τα raster αρχεία, μορφοτεκτονικών χαρτών, ΨΜΕ και ορθοφωτογραφιών. Το Προβολικό σύστημα είναι το ΕΓΣΑ 87



Εικ. 26 Δομή της γεωβάσης και των επιπέδων που συμμετέχουν στην μοντελοποίηση

**Η γεωβάση αποτελείται από τα παρακάτω αρχεία και επίπεδα (layers):**

**A - IMAGES:** TIN, RASTER, DEM και ΟΡΘΟΦΩΤΟΧΑΡΤΕΣ ευρύτερης περιοχής Παγασητικού κόλπου.

Με συνένωση των επί μέρους τμημάτων από τα αντίστοιχα δεδομένα των Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων του Ελληνικού Κτηματολογίου ανάλυσης 5 m συνενωμένα στο λογισμικό QGIS με διαδικασίες Raster Merge. Οι ορθοφωτοχάρτες ταξινομούνται προσωρινά σε ομάδες προσαρμοσμένες στις απαιτήσεις της εργασίας, ενώ δεν συνενώνονται για λόγους ταχύτητας της απεικόνισης. Σε αυτό το υπόβαθρο γίνεται η γεωαναφορά των σαρωμένων χαρτών από τους οποίους εξάγουμε τα πρωτογενή δεδομένα.

**B - FAULTS\_3D:** ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ των ρηγμάτων:

- 1. Fault Trace – ΓΡΑΜΜΙΚΟ ( Ίχνος Ρήγματος στην επιφάνεια ):** Από τους σαρωμένους και γεωαναφερμένους χάρτες [2], [3] ψηφιοποιούμε στο επίπεδο αυτό τα ίχνη των ρηγμάτων που στο σύνολό τους αντιστοιχούν στη ρηγξενή ζώνη της Νέας Αγχιάλου. Αυτό το layer αποτελεί την προβολή ουσιαστικά του χαρτογραφημένου, διορθωμένου βάσει ορθοφωτοχαρτών ίχνους του ρήγματος στο *οριζόντιο επίπεδο* αλλά δεν έχει τρίτη διάσταση.
- 2. Fault Trace 3D - ΓΡΑΜΜΙΚΟ ( Ίχνος Ρήγματος στο χώρο ):** Αποτελεί το προηγούμενο επίπεδο με την τρίτη διάσταση z, υπολογισμένη βάσει του ΨΜΕ.
- 3. Fault Trace 3D Points – ΣΗΜΕΙΑΚΟ ( Ίχνος Ρήγματος στο χώρο ):** Αποτελεί το προηγούμενο επίπεδο στην αντίστοιχη σημειακή του μορφή.
- 4. Dip – ΣΗΜΕΙΑΚΟ ( Δεδομένα κλίσης στο χώρο ):** Το επίπεδο αυτό αποτελείται από γνωστά ή υπολογιζόμενα σημεία με συντεταγμένες x,y,z, από τα οποία διέρχεται η επιφάνεια του ρήγματος. Προέρχονται: **α)** Από τον μορφοτεκτονικό χάρτη [2] ψηφιοποιώντας τα σημεία για τις μετρούμενες κλίσεις με τα στοιχεία που υπάρχουν επάνω στο χάρτη (PHD1, 2 κλπ). Αυτά αντιστοιχούν σε μετρήσεις υπαίθρου που αφορούν στην *διεύθυνση των ρηγμάτων (Strike)*, τη *γωνία κλίσης (Dip)* και τη *διεύθυνσή της (Dip Direction)* επάνω στην κατοπτρική επιφάνεια του ρήγματος. Αποτελούν παράλληλα και την βάση της υπολογιστικής μεθόδου στην οποία θα στηριχθεί η προσέγγιση της μεταβολής της κλίσης της επιφάνειας προς τις συγκεκριμένες διευθύνσεις. Τα δεδομένα εξάγονται με προσεγγιστική μέθοδο, από τα *δίκτυα Schmidt [2]* και για τις διευθύνσεις των επιπέδων που αντιστοιχούν περίξ μικρής απόστασης από τις συντεταγμένες των σημείων μετρήσεων. **β)** Από πύκνωση των προηγούμενων σημείων μέτρησης, υπολογίζοντας κατά προσέγγιση τα αντίστοιχα στοιχεία για την κλίση στα συγκεκριμένα 4 σημεία **γ)** Από υπολογισμένες κλίσεις βάση υψομέτρου πάνω στο κάτοπτρο (θεωρητική επιφάνεια) σε 0 υψόμετρο **δ)** Από επί μέρους υπολογισμένες κλίσεις πάνω στο ίδιο επίπεδο προς τα βαθύτερα βάσει του ρυθμού μεταβολής τους από την αξιοποίηση της Κατακόρυφης τομής της Εικόνας 25.
- 5. Dip Lines – ΓΡΑΜΜΙΚΟ ( Προβολή της μεταβολής της κλίσης στο Οριζόντιο επίπεδο 0μ ):** Το επίπεδο αυτό αποτελείται από τις προβολές των διευθύνσεων των κλίσεων (*Dip Direction*), οι οποίες προκύπτουν από τα *δίκτυα Schmidt [2]*. Με τα εργαλεία *CoGO* και *Construct 2-point line* «τμηματοποιούμε» συμβατικά την γραμμή επιμέρους τμήματα μιας διεύθυνσης *strike*, ανά 1.000 m βάθους. Στις γραμμές αυτές ανήκουν τα σημεία κλίσης στο επίπεδο 0 μ. όπως και τα και τα υπόλοιπα σημεία του επιπέδου Dip ως προβολές των τομών της μεταβολής της κλίσης

στο χώρο με τα οριζόντια επίπεδα ανά 1000 μ βάθους. Τα τελευταία συμπίπτουν με τις τομές κάθε μίας ισαριθμητικής καμπύλης της επιφάνειας του ρήγματος ανά 1000μ βάθους. Το οριζόντιο βήμα της μεταβολής της κλίσης, υπολογίζεται ως η απόσταση πάνω στην γραμμή κλίσης Dip Line και ισούται με τη μεταβολή του υψόμετρου της κλίσης επί την συνεφαπτομένη της γωνίας κλίσης.

6. **Fault Trace EQ Numb Curves – ΓΡΑΜΜΙΚΟ** ( *Ισαριθμητικές καμπύλες υψόμετρου, οι οποίες αντιστοιχούν στην τομή της επιφάνειάς του με οριζόντια επίπεδα ανά 1.000 m βάθους* ): Διέρχονται από τα σημεία τομής της κλίσης της επιφάνειας του ρήγματος προς τις 8 διευθύνσεις του layer **Dip Lines**, με γνωστή τη μεταβολή της γωνίας της. Τα σημεία ταυτίζονται με τα σημεία του επιπέδου Dip, ως προβολές των παραπάνω στο οριζόντιο επίπεδο 0 και στην διαδικασία δημιουργίας των ισοβαθών θα λειτουργήσουν ως σημεία ελέγχου (*Control Points*).

Τα υπόλοιπα σημεία των ισαριθμητικών καμπύλων προκύπτουν θεωρώντας ότι αυτές έχουν παρόμοια γεωμετρία και προσανατολισμό με το χαρτογραφημένο και ψηφιοποιημένο ίχνος του ρήγματος. Όμως σε πιο γενικευμένη μορφή και απαλλαγμένη από τις επιπλέον κυρτώσεις εξ αιτίας του ανάγλυφου. Επομένως η πλησιέστερη σε γεωμετρία ισαριθμητική με το ίχνος είναι αυτή των 0 μέτρων βάθους, η τομή δηλαδή της επιφάνειας του ρήγματος με το επίπεδο μηδενικού υψόμετρου.

Ο υπολογισμός και σχεδιασμός της πραγματοποιείται αρχικά με αντιγραφή και μεταφορά του ψηφιοποιημένου ίχνους του επιπέδου **Fault Trace**, στο επίπεδο **Fault Trace EQ Numb Curves**. Ακολουθεί η προσαρμογή του με το εργαλείο *Spatial Adjustment* στα σημεία ελέγχου, βρίσκονται στον Πίνακα 4 ως σημεία D0. Οι συντεταγμένες τους έχουν υπολογιστεί βάσει της απόστασης S0 και πάνω στις 8 διευθύνσεις με αρχή τα σημεία μέτρησης, δηλαδή ανήκουν και στις γραμμές Dip Lines. Η απόσταση αυτή ισούται με το γινόμενο της συνεφαπτομένης της γωνίας μετρούμενης κλίσης και του υψόμετρου των σημείων μέτρησης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Στη συνέχεια και με την παραπάνω διαδικασία δημιουργούμε τις αντίστοιχες ισαριθμητικές καμπύλες από 1.000 έως 14000 μέτρα βάθους, οι οποίες διέρχονται από τα αντίστοιχα σημεία D1, D2...Dn σε αντίστοιχες αποστάσεις (οριζόντιο βήμα) S1, S2...Sn. Δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις «ισοβαθείς» της επιφάνειας του ρήγματος, σχηματίζουμε ένα θεμελιώδες πλέγμα, συνδυάζοντάς το με τις γραμμές κλίσης Dip Lines από το οποίες διέρχεται ταυτόχρονα. Αυτό το πλέγμα μπορεί να προβάλλεται σε 3 διαστάσεις στον *ArcScene* και αποτελεί το σκελετό της επιφάνειας του ρήγματος στο χώρο.

Η δημιουργία των υπόλοιπων ισαριθμητικών καμπύλων πραγματοποιείται με παράλληλη διαδικασία γενίκευσης και προσέγγιση της γεωμετρίας τους, μέσω του αλγόριθμου απλοποίησης Bend Simplify (Wang & Müller 1998) [15] όπως και έλεγχο του οριζοντιογραφικού βήματος κατά τη μεταφορά από το ίχνος στην ισαριθμητική των 0 m.

Για την αξιοποίηση τους με χρήση χωρικής παρεμβολής, τις θεωρούμε ως το *σύνολο των σημείων τομής της επιφάνειας του ρήγματος με τα διαδοχικά επίπεδα βάθους ανά 1.000 m*. Κατ' αυτόν τον τρόπο «πυκνώνουμε» εμμέσως τα σημεία γνωστών συντεταγμένων (x,y,z) από τα οποία διέρχεται το ρήγμα εντάσσοντας τα κατ' ουσίαν στον υπολογισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος.

Η διαδικασία της γενίκευσης προκύπτει και από την αβεβαιότητα τόσο σε σχέση με τη χωρική ακρίβεια του αρχικού ψηφιοποιημένου ίχνους, όσο και το βαθμό που πλησιάζει τη γεωμετρία των ισοριθμητικών καμπύλων. Αυτά εξαρτώνται από παράγοντες και αίτια:

**α) Ποιοτικά:**

Από τα πρωτογενή δεδομένα (κλίμακα 1:50.000), την καταπόνηση και παραμόρφωση του αναλογικού μέσου, την έλλειψη περισσότερων σημείων μέτρησης, την παντελή έλλειψη σημείων με ακριβείς συντεταγμένες (πχ μέσω δεκτών GPS)

**β) Τεκτονικά & Γεωλογικά:**

Δεν είμαστε σε θέση να καθορίσουμε επακριβώς τη γεωμετρία της επιφάνειας του ρήγματος, ειδικά όσο δεν υπάρχουν επιπρόσθετα τρισδιάστατα δεδομένα, όπως γεωτρήσεις, γεωφυσικές διασκοπήσεις. Επιπλέον όσο προχωράμε σε βάθος η έλλειψη γνώσης για την εξέλιξη της αυξάνεται.

Αντιθέτως, ο γενικός προσανατολισμός  $B85^\circ$ , η γενική διεύθυνση της κλίσης της επιφάνειας του ρήγματος προς Νότο (μέσο όρο  $B175^\circ$ ) και οι κύριες μεταβολές και κυρτώσεις στη γεωμετρία του είναι τα βασικά και αδιαμφισβήτητα στοιχεία που μπορούν να αξιοποιηθούν. Η γεωμετρία του ίχνους του ρήγματος, απαλλαγμένου από τις μικρής εμβέλειας κυρτώσεις, είναι βέβαιο ότι είναι αποτέλεσμα διαφοροποιήσεων στην επιφάνεια διάρρηξης, η οποία προκύπτει από τεκτονικά και γεωλογικά αίτια. Αυτές οι διαφοροποιήσεις είναι πιθανό να επαναλαμβάνονται ανάλογα όσο βαθαίνουμε, να ισχύουν δηλαδή στο σύνολο της επιφάνειας του ρήγματος, αντιστοιχώντας σε ισοβαθείς στη γενικευμένη του μορφή.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να προσεγγίσουμε πιθανολογικά την εξέλιξη της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος σε συνδυασμό με τις διαφορικές γραμμές κλίσης (Dip Lines) που προέκυψαν αναλογικά από την κατακόρυφη τομή. Η θεώρηση ότι αυτές εξελίσσονται κατ' αναλογία με την μετρούμενη γωνία κλίσης στην επιφάνεια, είναι μεν αυθαίρετη ως ένα βαθμό, αλλά αντιστρόφως δεν θα μπορούσε να μην ληφθεί υπ' όψη ως αρκετά πιθανό γεγονός.

Ακόμα, θεωρώντας ότι ως ένα βάθος δεν υπάρχει γνωστό αίτιο ή ένδειξη για μεταβολή της διεύθυνσης της μετρούμενης κλίσης, αυτή ακολουθεί την αρχικά μετρούμενη επάνω στις 8 διευθύνσεις. Κατ' επέκταση και τα τμήματα του ίχνους με τις διαφοροποιήσεις που προαναφέρθηκαν, επαναλαμβάνονται ως γεωμετρία σε βάθος, αλληλοεπηρεαζόμενα τουλάχιστον θεωρητικά. Αυτή είναι και μία από τις βασικές θεωρήσεις της μεθόδου που ακολουθήθηκε.

**γ) Μαθηματικά:** Στην περίπτωση που υπήρχε μεγάλη χωρική ακρίβεια στις υπαίθριες μετρήσεις σημείων κλίσης, όπως και κατά τη χαρτογράφηση του ίχνους του ρήγματος στην επιφάνεια, η ψηφιοποίηση και μεταφορά τους στη γεωβάση θα ήταν αντίστοιχη ποιοτικά. Όμως ακόμα και τότε, η γραμμή του ίχνους του ρήγματος συνεχίζει να αντιστοιχεί στην τομή με το ανάγλυφο, πολλών επιφανειών (άπειρων) με διαφορετική δομή και γεωμετρία.

Επιπρόσθετα, και από ένα βάθος 2.000 m και έπειτα δεν υπάρχουν γεωφυσικά ή δεδομένα γεωτρήσεων στην πλειονότητα των περιπτώσεων των ρηγμάτων, με εξαίρεση μόνο περιπτώσεις σεισμικών καταγραφών από υποθαλάσσιες μελέτες υδρογονανθράκων.

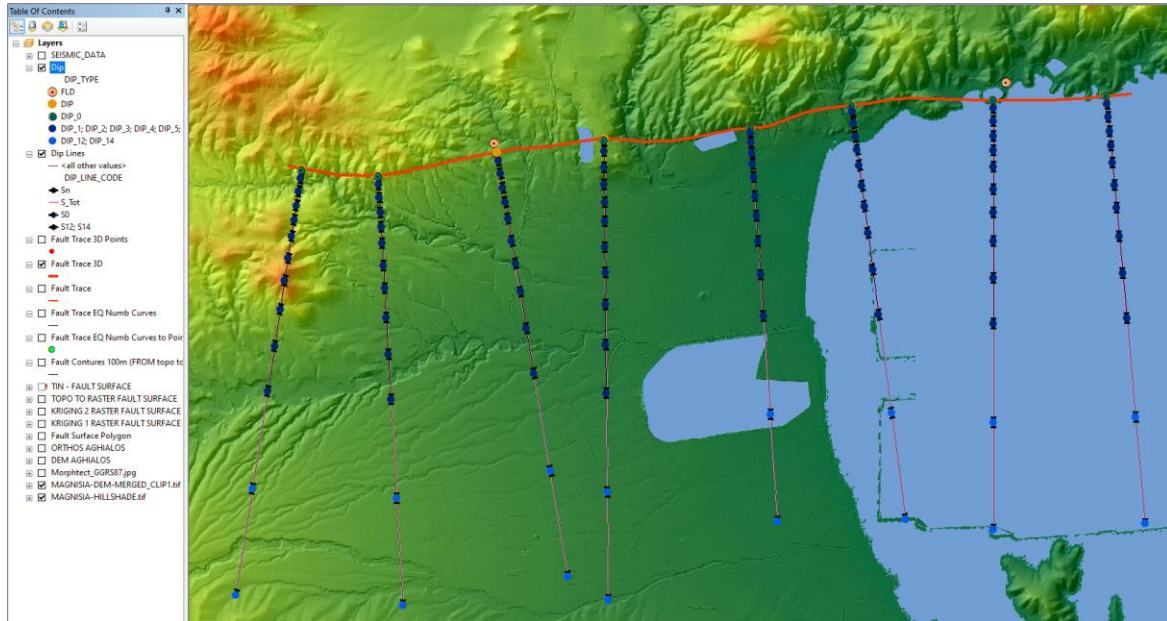
Το σύνολο της φιλοσοφίας της μεθόδου εμπεριέχει αρκετές συμβάσεις ειδικότερα όσο προχωράμε σε βάθος, οι οποίες γίνονται με στόχο την βέλτιστη αξιοποίηση των δεδομένων και την αντιμετώπιση της έλλειψης γνώσης της γεωμετρίας και δομής της επιφάνειας του ρήγματος.

Dip						
DIP_TYPE	STRIKE	ELEVATION	DIP	DIP_COT	DISTANCE_S	DIST_TO_ELEV_0
DIP	98	280	80	0.176327	<Null>	49.37
DIP_0	98	0	80	0.176327	49.4	0
DIP_1	98	-1000	80	0.18	180	180
DIP_2	98	-2000	72	0.32	320	500
DIP_3	98	-3000	71	0.35	350	850
DIP_4	98	-4000	71	0.35	350	1200
DIP_5	98	-5000	68	0.4	400	1600
DIP_6	98	-6000	61	0.55	550	2150
DIP_7	98	-7000	61	0.55	550	2700
DIP_8	98	-8000	55	0.7	700	3400
DIP_9	98	-9000	48	0.9	900	4300
DIP_10	98	-10000	42	1.1	1100	5400
DIP_12	98	-12000	40	1.2	2400	7800
DIP_14	98	-14000	38	1.3	2600	10400
FLD	275	44	80	0.176327	<Null>	0.022731

Πίνακας 8 Παράδειγμα μεταφοράς των στοιχείων του Πίνακα 4 μιας διεύθυνσης στο επίπεδο Dip της γεωβάσης που φιλοξενεί τα σημεία Dn. Από αριστερά προς τα δεξιά: DIP\_TYPE είδος σημείου που εκφράζει το βάθος, STRIKE διεύθυνση μετρούμενης μέγιστης κλίσης, ELEVATION υψόμετρο Dn, DIP γωνία κλίσης για το τμήμα της που αντιστοιχεί σε σημεία Dn έως Dn+1, DIP\_COT η συνεφαπτομένη DIP, DISTANCE η απόσταση Dn έως Dn+1 πάνω στο οριζόντιο επίπεδο προς τη συγκεκριμένη διεύθυνση, DIST\_TO\_ELEV\_0 η απόσταση έως το οριζόντιο επίπεδο με υψόμετρο 0, πάνω στην συγκεκριμένη διεύθυνση.

Dip Lines				
OBJECTID *	SHAPE *	DIP_LINE_CODE	DIP_ANGLE	SHAPE_Length
122	Polyline Z	S14	38	2602.809183
137	Polyline Z	S14	38	2600.000027
121	Polyline Z	S12	40	2400.000031
136	Polyline Z	S12	40	2399.999993
135	Polyline Z	S10	42	1099.999986
120	Polyline Z	S10	45	1000.000045
134	Polyline Z	S9	48	899.999965
119	Polyline Z	S9	51	819.999954
133	Polyline Z	S8	57	649.999996
118	Polyline Z	S8	58	619.999986
129	Polyline Z	S6	63	500.000009
130	Polyline Z	S7	63	500.000009
116	Polyline Z	S6	65	469.999961
117	Polyline Z	S7	65	469.999961
128	Polyline Z	S5	70	369.999998
115	Polyline Z	S5	72	320.000028
126	Polyline Z	S3	72	330.000033
127	Polyline Z	S4	72	330.000046
131	Polyline Z	S2	74	279.999995
113	Polyline Z	S3	75	259.999998
114	Polyline Z	S4	75	259.999998
24	Polyline Z	S0	76	46.119999
112	Polyline Z	S2	77	240.000021
27	Polyline Z	S0	80	1.7526
29	Polyline Z	S0	80	49.441611
32	Polyline Z	S0	82	5.461942
132	Polyline Z	S1	82	140.000031
25	Polyline Z	S0	85	6.084716

Πίνακας 9 Στιγμιότυπο από τον πίνακα ιδιοτήτων Dip Lines. Από αριστερά προς τα δεξιά το είδος του τμήματος το οποίο αντιστοιχεί σε βάθη ανά 1000 m, η μέση γωνία κλίσης του τμήματος της επιφάνειας του ρήγματος που αντιστοιχεί το S και το μήκος του



Εικ. 28 Απεικόνιση των στοιχείων του Πίνακα 4 στο σημειακό επίπεδο DIP\_DIMENSIONING της Γεωβάσης.

Στην Εικόνα 28, φαίνεται πως από τα σημεία **Dn** γνωστών και υπολογισμένων υψομέτρων του επιπέδου **Dip**, διέρχεται η επιφάνεια του ρήγματος. Αυτά ανήκουν ταυτόχρονα και στις προβολές των μεταβολών της κλίσης **Sn** εις βάθος στο οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο **Dip Lines**. Τα στοιχεία τους έχουν εισαχθεί στην γεωβάση όπως φαίνεται στον Πίνακα 8. Αναλυτικά αυτά αντιστοιχούν σε:

**Dip:**

FLD: Επιφανειακές μετρήσεις υπαίθρου

DIP: Σημεία πυκνώσεως των προηγούμενων με τιμές κατ' αναλογία

DIP\_0: Σημεία της επιφάνειας του ρήγματος με υψόμετρο 0

DIP\_1,2,3...14: Σημεία της επιφάνειας του ρήγματος ανά βάθη 1.000, 2.000, 3.000..., 14.000 m

**Dip Lines:**

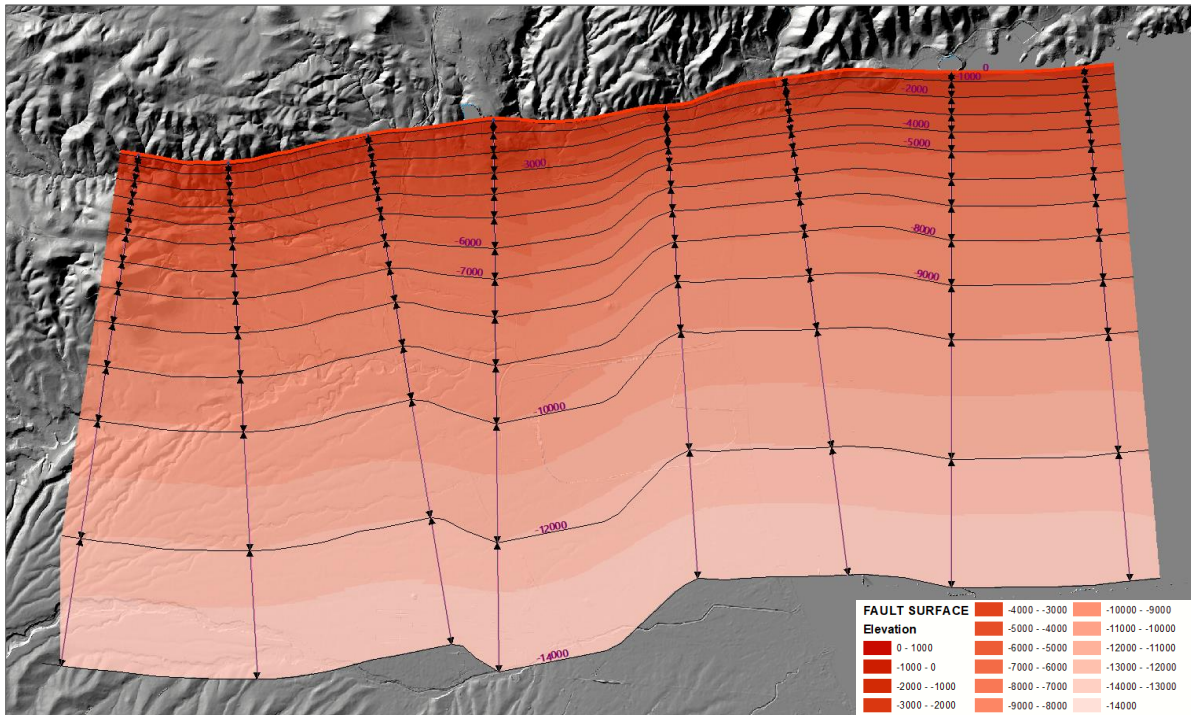
S0: Τμήματα της προβολής της μεταβολής των κλίσεων του ρήγματος, από τα σημεία μέτρησης ή πυκνώσεως τους πάνω στο ίχνος του ρήγματος, έως το αντίστοιχο σημείο με υψόμετρο 0

S1,2...14: Τα αντίστοιχα τμήματα από βάθος 0 ανά -1.000 m

### 3.5 Εξαγωγή επιφάνειας βάσει των σημείων κλίσης Dip με παρεμβολή Kriging

Η πρώτη προσέγγιση στον υπολογισμό και την οπτικοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος γίνεται μέσω χωρικής παρεμβολής *Kriging* στο λογισμικό *ArcMap* βάσει των σημείων του επιπέδου **Dip**. Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 29, η επιφάνεια του ρήγματος αναπτύσσεται στην ίδια διεύθυνση με το ίχνος του, ενώ η γεωμετρία της παρουσιάζει ομοιότητες στο μεγαλύτερο μέρος και διαφορές στο κεντρικό κυρίως τμήμα. Η τελευταία αντικατοπτρίζει τις μεταβολές της κλίσης η οποία δεν έχει σταθερή διεύθυνση και κυμαίνεται από 76° έως 85° στο ίχνος και φτάνει στο βάθος τις 40°.

Η διαδικασία αυτή αξιοποιεί μόνο το σημειακό επίπεδο **Dip** και παρουσιάζει κάποια προβλήματα στη χωρική ταύτιση αλλά και ομαλή κατανομή των σημείων κοντά στην επιφάνεια. Δημιουργεί δε κάποιες ακανόνιστες απότομες μεταβολές σε θέσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα ή ενδείξεις για αυτό.



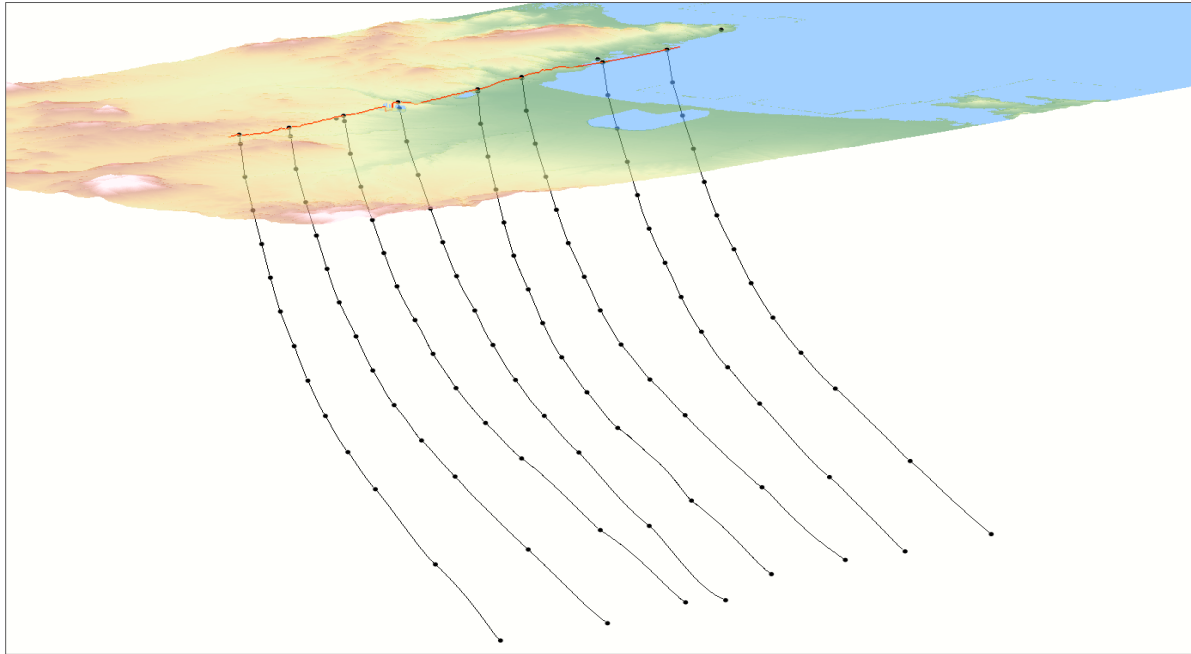
Εικ. 29 Απεικόνιση σε δύο διαστάσεις της επιφάνειας του ρήγματος, προερχόμενη από πρώιμη και απλή διαδικασία παρεμβολής *Kriging* στο οριζόντιο επίπεδο, βάσει των τιμών του πεδίου **ELEVATION**, των σημείων **Dip** του επιπέδου **Dip**. Τα σημεία αυτά ανήκουν και στο επίπεδο των ισαριθμικών καμπύλων **Fault Trace EQ Numb Curves** οι οποίες εξήχθησαν στην αμέσως επόμενη φάση με *Topo to Raster* και έχουν διαφοροποιήσεις. Η οπτικοποίηση γίνεται με διαφάνεια πάνω σε ανάγλυφο με φωτοσκίαση. Η κόκκινη γραμμή στο πάνω μέρος αναπαριστά το ίχνος του ρήγματος.

Στο αμέσως επόμενο στάδιο, η εξαγωγή της επιφάνειας θα πραγματοποιηθεί συμπεριλαμβανομένων των υπολοίπων σημείων που ανήκουν στις ισαριθμικές καμπύλες, οι οποίες υπολογίζονται βάσει το ίχνους του ρήγματος. Η πυκνωση των σημείων κατ' αυτόν τον τρόπο εμπεριέχει τη γεωμετρία της τομής της επιφάνειας με το ανάγλυφο, «μεταφερόμενης» επάνω στα ήδη υπολογισμένα σημεία γνωστού υψομέτρου **Dip**. Αυτά ανήκουν στην επιφάνεια του ρήγματος, στις ισαριθμικές καμπύλες ανά 1.000 m βάθους του επιπέδου **Fault Trace EQ Numb Curves**, στις γραμμές των 8 διευθύνσεων της κλίσης του επιπέδου **Dip Lines** και στα σημεία του επιπέδου **Dip**.

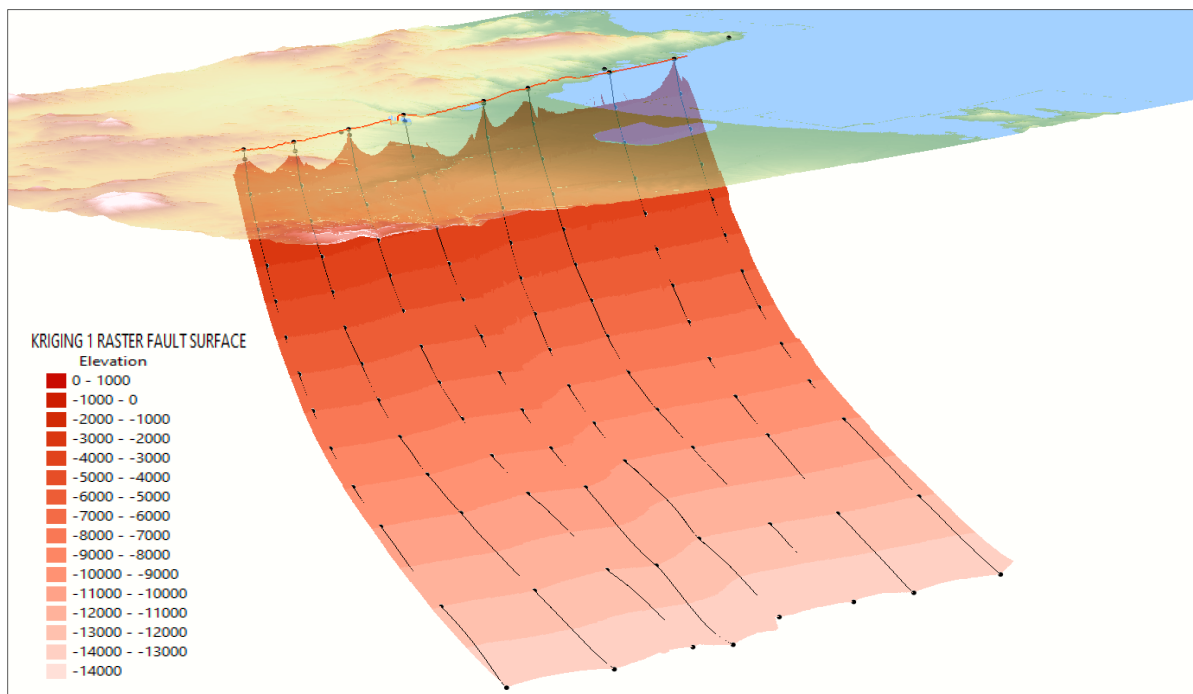
Με το συνδυασμό αυτόν των δεδομένων θα εξαχθεί επιφάνεια με διαδικασία σύνθετης παρεμβολής *Topo to Raster* και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσω οπτικοποιήσεων σε δύο και τρεις



διαστάσεις. Η επιφάνεια της Εικόνας 29 απεικονίζεται μέσω του λογισμικού *ArcScene* σε τρεις διαστάσεις στις Εικόνα 31 και οι κλίσεις Dip Lines στην εικόνα 30. Παρατηρούμε σε μια πρώτη σύγκριση, τις διαφοροποιήσεις από τις ισαριθμητικές καμπύλες οι οποίες δημιουργήθηκαν από την διαδικασία που περιγράφεται αμέσως μετά.



**Εικ 30.** Άποψη των σημείων Dip και γραμμών κλίσης Dip Lines μαζί με το ανάγλυφο σε ΨΜΥ στον Arc Scene σε τρεις διαστάσεις



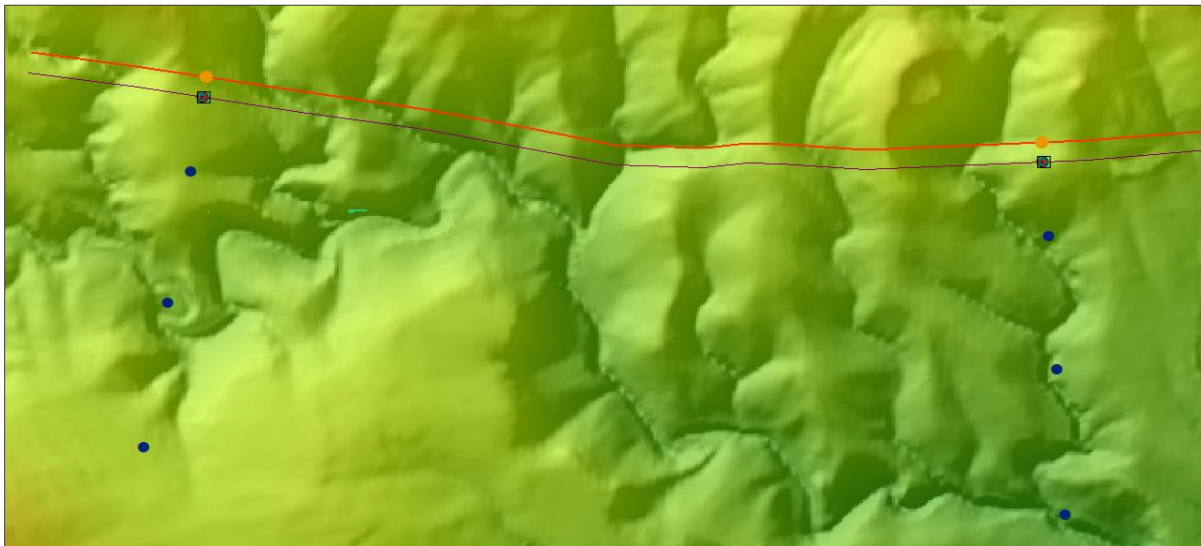
**Εικ. 31** Άποψη των σημείων και γραμμών κλίσης και της πρώιμης επιφάνειας του ρήγματος με παρεμβολή Kriging μαζί με το ανάγλυφο σε ΨΜΕ στον ArcScene σε τρεις διαστάσεις. Παρατηρούμε τις έντονες αποκλίσεις κοντά στην επιφάνεια και το ίχνος.

### 3.6 Εξαγωγή επιφάνειας βάσει ισαριθμητικών καμπύλων με Topo to Raster

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η λογική πίσω από την μεθοδολογία βασίζεται στο ότι η γεωμετρία του ίχνους σχετίζεται με αυτή των ισαριθμητικών καμπύλων της επιφάνειας του ρήγματος. Εάν το ανάγλυφο ήταν επίπεδο με μη μεταβαλλόμενο υψόμετρο, το ίχνος θα αντιστοιχούσε στην τομή της επιφάνειας με ένα θεωρητικό οριζόντιο επίπεδο ιδίου υψομέτρου. Επιπρόσθετα, εάν η κλίση της ήταν αμετάβλητη και κάθετη στην εφαπτόμενη του ίχνους στο οριζόντιο επίπεδο, σε κάθε του σημείο, τότε η τομή της με τα διαδοχικά επίπεδα βάθους θα έδινε την ίδια ακριβώς γεωμετρία. Κατά συνέπεια η επιφάνεια του ρήγματος θα αντιστοιχούσε στο σύνολο όμοιων επιμέρους επιφανειών, που θα όριζαν οι διαδοχικές ισαριθμητικές καμπύλες.

Τα παραπάνω δεν συμβαίνουν στην φυσική μορφή της επιφάνειας ενός ρήγματος, καθώς η κλίση μεταβάλλεται σαν γωνία και σαν διεύθυνση, με τρόπους που μόνο προσεγγιστικά μπορούμε να διερευνήσουμε. Έτσι θεωρούμε ότι οι ισαριθμητικές καμπύλες έχουν σχετική με το ίχνος γεωμετρία και περισσότερο σχετική ακόμα, με την τομή της επιφάνειας με το οριζόντιο επίπεδο 0. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν είναι υποθαλάσσιο ρήγμα οπότε το υψόμετρό του ίχνους είναι πάντα μεγαλύτερο από 0 μ, επομένως το ανάγλυφο δεν θα το επηρεάζει κάτω από τα 0 μέτρα.

Στην Εικόνα 32 παρατηρούμε την αντιγραφή και μετάθεση του ψηφιοποιημένου ίχνους ρήγματος (κόκκινη γραμμή) στη θεωρητική θέση που βρίσκεται η ισαριθμητική των 0 m. Η διαδικασία πραγματοποιείται αξιοποιώντας τα δεδομένα της μετρούμενης στην ύπαιθρο ή υπολογιζόμενης γωνίας κλίσης και του υψομέτρου των θέσεων. Στη συνέχεια, βάσει της θεώρησης ότι η διεύθυνση της μετρούμενης κλίσης παραμένει σταθερή για κάθε ένα από τα 8 σημεία, ορίζουμε την προβολή της κάθε μίας από τις οκτώ διευθύνσεις στο οριζόντιο επίπεδο ως τον άξονα Ox [Εικ. 25](#). Με τη διαδικασία αυτή μετατρέπουμε το πρόβλημα των τριών διαστάσεων σε δύο, δημιουργώντας μια θεωρητική κατακόρυφη τομή, της οποίας ο άξονας Oy είναι το υψόμετρο [Εικ. 25](#). Κατά συνέπεια μιας και η «κίνηση» της προβολής του κάθε σημείου μέτρησης κλίσης γίνεται πάνω στην συγκεκριμένη γραμμή διεύθυνσης (και πάνω στην επιφάνεια), η οριζόντια μετατόπιση ως προβολή της κίνησης στο υψόμετρο 0, θα ισούται με το υψόμετρο επί την συνεφαπτομένη στις μετρούμενης γωνίας κλίσης.



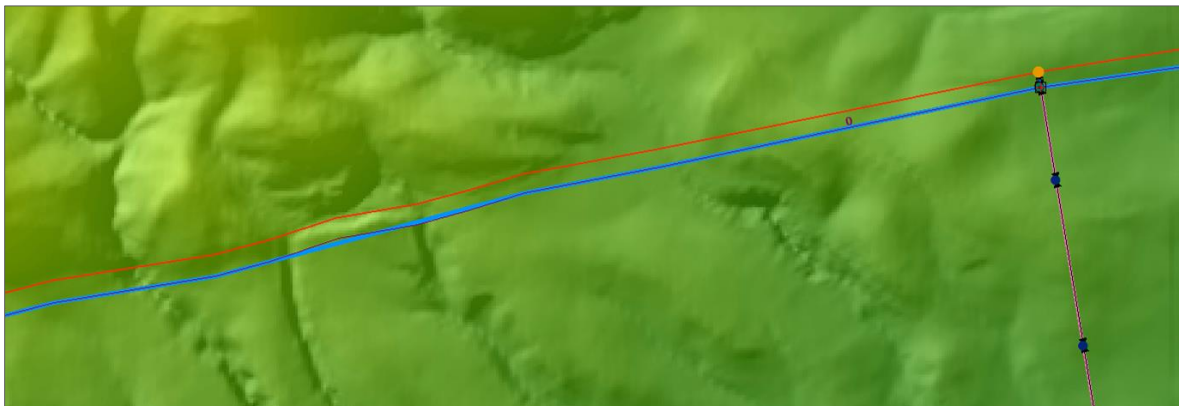
Εικ. 32 Δημιουργία της ισαριθμητικής καμπύλης μηδενικού υψομέτρου, με αντιγραφή και «μεταφορά» της γεωμετρίας του ίχνους του ρήγματος στα σημεία ελέγχου του επιπέδου Dip τα οποία έχουν υψόμετρο 0. Αυτά ανήκουν συγχρόνως στο επίπεδο Dip Lines και στις καμπύλες μεταβολής της κλίσης προς συγκεκριμένες διευθύνσεις (Dip Lines). Η διαδικασία γίνεται μέσω του εργαλείου *Spatial Adjustment* του ArcMap.

Ο αλγόριθμος μετασχηματισμού που ακολουθήθηκε είναι ο *Rubbersheet*, ο οποίος διατηρεί το σχήμα αξιοποιώντας πλήρως την «μεταφορά» του ίχνους, ακριβώς επάνω στα σημεία ελέγχου. Η δημιουργία της πρώτης ισαριθμητικής καμπύλης των 0 m σαν αντιστοίχιση του ίχνους του ρήγματος στο οριζόντιο επίπεδο των 0 m, αποτελεί και την τομή της επιφάνειας του ρήγματος με αυτό. Οι κυρτώσεις που υπάρχουν στο γραμμικό αυτό στοιχείο είναι «κληρονομιά» του ίχνους, το οποίο επηρεάζεται από το ανάγλυφο ακολουθώντας το. Χαρτογραφικά αλλά και χωρικά διαφοροποιείται ως ένα βαθμό από την ισοϋψή των 0 m, όπως και των υπολοίπων όσο προχωράμε σε βάθος.

Οι κυρτώσεις της καμπύλης του ίχνους μπορεί να οφείλονται στη γεωμετρία της επιφάνειας του ρήγματος και σε αντίστοιχες μεταβολές του ανάγλυφου, θετικές ή αρνητικές. Οι τελευταίες θα πρέπει να εξομαλυνθούν στις ισαριθμητικές καμπύλες όταν προκύπτουν από περιπτώσεις που το χαρτογραφημένο ίχνος ακολουθεί π.χ. ένα ύψωμα ή ένα βύθισμα. Επί πλέον θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η πολύ μεγάλη κλίση της επιφάνειας από το ίχνος και για βάθη έως 1000 m, η οποία τέμνει σχεδόν κατακόρυφα το ανάγλυφο με μέσο όρο τις 80 μοίρες. Επομένως οι μεγαλύτερου εύρους κυρτώσεις που αντιστοιχούν σε μεγάλα τμήματα του ίχνους, έχουν μεγάλη πιθανότητα να επαναλαμβάνονται και «βαθύτερα», μιας και αυτές δεν οφείλονται στο ανάγλυφο, για ίδιες συνθήκες διεύθυνσης και γωνίας κλίσης. Επιρρεάζονται και τροποποιούνται μόνο από τη διαφορική κατά μήκος μεταβολή της γωνίας κλίσης και την αντίστοιχη μεταβολή της διεύθυνσής της.

Τα παραπάνω εξαρτώνται από την ακρίβεια των χαρτογραφημένων και ψηφιοποιημένων δεδομένων, όπως και την ορθή σχεδίαση της προβολής του ίχνους του ρήγματος στο επίπεδο του μορφοτεκτονικού χάρτη [2]. Τέλος, λαμβάνεται υπ' όψη η μεγάλη πολυπλοκότητα στις φυσικές διεργασίες και μεταβολές, ειδικά στις περιπτώσεις μετακίνησης τεμαχίων εξαιτίας διαρρήξεων. Αυτή εκδηλώνεται «τοπικά» με κυρτώσεις της επιφάνειας πιθανώς και του ίχνους του ρήγματος. Τα δεδομένα που έχουμε δεν μπορούν να προβλέψουν τις περιπτώσεις αυτές, παρά μόνο να δώσουν την γεωμετρία του ρήγματος σε γενικευμένη μορφή και βάσει των θεωρήσεων που έγιναν.

Η πρώτη ισαριθμητική καμπύλη των 0 m γενικεύεται λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω προβληματισμούς, με στόχο τη βέλτιστη προσέγγιση της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος και ελλείψει πρόσθετων γεωφυσικών ή άλλων δεδομένων που να έχουν καλή χωρική ακρίβεια. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο *Bend Simplify* με ανοχή 120 m, ο οποίος ύστερα από διάφορες δοκιμές έδωσε το βέλτιστο αποτέλεσμα σύμφωνα με τα παραπάνω ζητούμενα [15]. Το επίπεδο **Dip** τέθηκε ως *Barrier Layer* καθώς τα σημεία αυτά (**Dn**) έχουν ήδη υπολογιστεί και θεωρηθεί ως χωρικά ορθά και αξιοποιήσιμα. Ορισμένες μικρές βελτιώσεις έγιναν δια χειρός (Εικόνα 33).



Εικ. 33 Διόρθωση σχήματος αρχικής πρώτης ισαριθμητικής των 0m ακολουθώντας την γενικευμένη της εκδοχή (μπλε γραμμή), όπου είναι ορατές οι διαφοροποιήσεις. Η γενίκευση εξαλείφει όλες κυρτώσεις κληρονομήθηκαν από το ίχνος και οφείλονται στην τομή της επιφάνειας του ρήγματος με το ανάγλυφο.

Στην παρακάτω Εικόνα 34, παρατηρούμε τη διαφορά του μήκους των αποστάσεων **S0** των διαδοχικών σημείων μέτρησης κλίσης **FLD** και των σημείων μηδενικού υψομέτρου **D0**, επάνω στις σταθερές διευθύνσεις μεταβολής της γωνίας της (**Dip Lines**). Αυτό οφείλεται στη διαφορά υψομέτρου των σημείων μέτρησης και την διαφορά γωνίας κλίσης. Η απόσταση **S0** ισούται με το υψόμετρο επί τη συνεφαπτομένη της γωνίας κλίσης όπως φαίνεται στους Πίνακες 8 και 9.

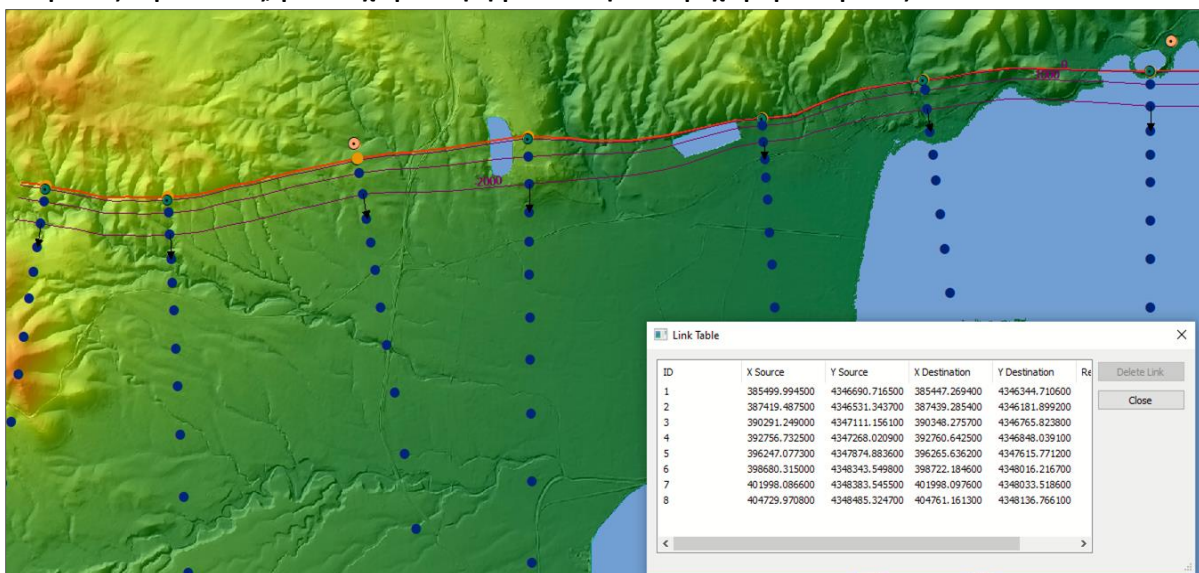


Εικ. 34 Διαφοροποιήσεις στο οριζόντιο βήμα της προβολής της μεταβολής της κλίσης της επιφάνειας του ρήγματος έως το υψόμετρο 0, εξαιτίας των υψομετρικών διαφορών των αντίστοιχων σημείων του ίχνους.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 35, με την διαδοχική αντιγραφή και μετάθεση της ισαριθμητικής των 0 m δημιουργούμε τις υπόλοιπες ανά βάθος 1.000 m. Η διαδικασία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το εργαλείο *Spatial Adjustment* με αλγόριθμο *Rubbersheet*, θέτοντας ως σημεία ελέγχου (Control Points) αυτά του επιπέδου **Dip** στα αντίστοιχα βάθη (Εικόνα 36). Οι ισοβαθείς της επιφάνειας που προκύπτουν από την ίδια διαδικασία, φέρουν την αρχική γεωμετρία του ίχνους προσαρμοσμένη στα σημεία ελέγχου, τα οποία ανήκουν στο γεωμετρικό τόπο της επιφάνειας του ρήγματος και έχουν γνωστά βάθη, ανά 1.000 m. Η απαλοιφή χαρακτηριστικών, όπως κυρτώσεις και απότομες μεταβολές που υπάρχουν στο ίχνος και προέρχονται από τη μορφολογία του ανάγλυφου, απαιτεί ένα βαθμό γενίκευσης τους όσο προχωράμε σε βάθος. Αυτό πραγματοποιείται με παράλληλο έλεγχο της εξέλιξης της γεωμετρίας τους βάσει της αρχικής θεώρησης της μορφής της συνολικής επιφάνειας του ρήγματος, της οποίας γνωρίζουμε ότι η κλίση κυμαίνεται από 85° έως 40°. Επειδή για βάθη από 2 Km και πέρα, δεν υπάρχουν επιπλέον δεδομένα, η ασάφεια εκφράζεται μέσα από αυξανόμενο κατά βάθος βαθμό γενίκευσης των ισαριθμητικών καμπύλων (Εικόνα 37).

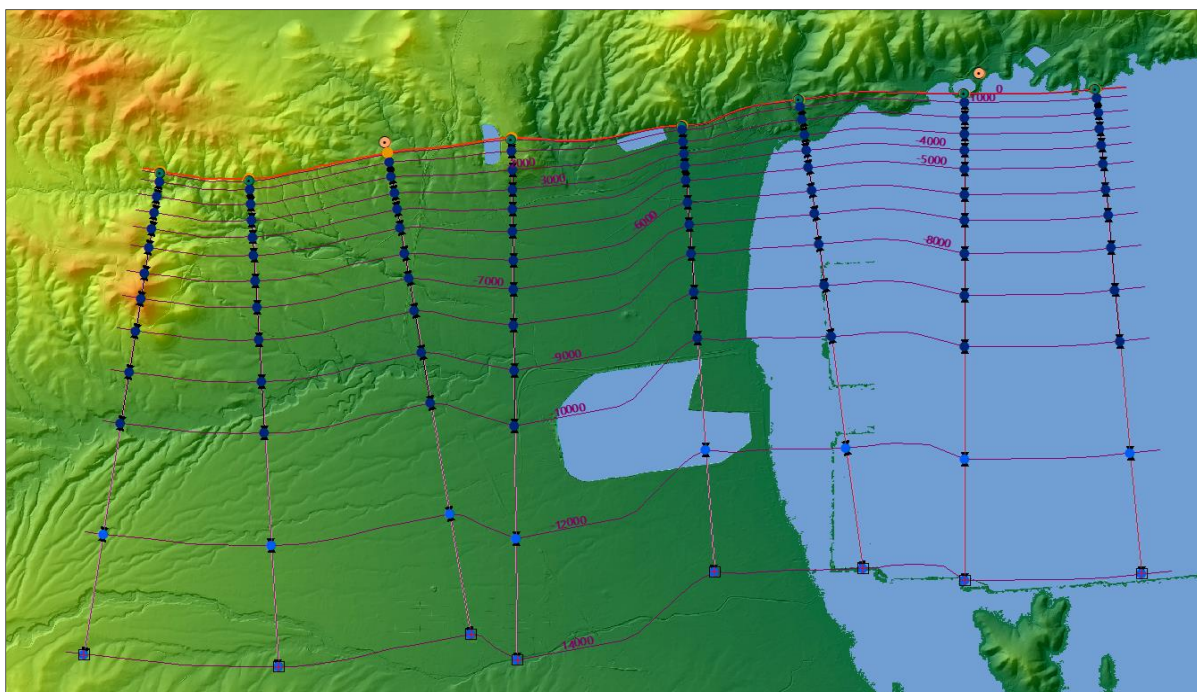


**Εικ. 35** Μεταφορά της γεωμετρίας του ίχνους στις ισαριθμικές καμπύλες και παράδειγμα σημείων ελέγχου. Σε αρκετές περιπτώσεις, γίνεται χειροκίνητη γενίκευση όσο προχωράμε σε βάθος.



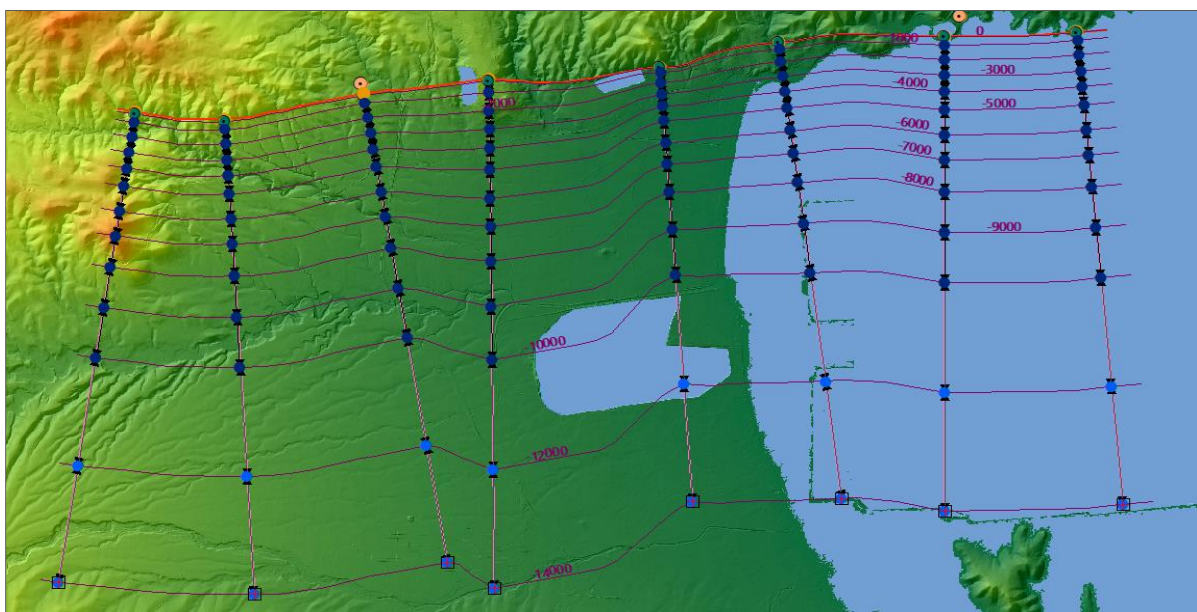
**Εικ. 36** Εξέλιξη της γεωμετρίας των ισαριθμικών καμπύλων και πίνακας σημείων ελέγχου. Η γεωμετρία τους διαφοροποιείται καθώς αυτές ακολουθούν σημεία ελέγχου ίδιου υψομέτρου αλλά διαφορετικών κλίσεων.

Η διαφοροποίηση στη γεωμετρία των ισαριθμητικών καμπύλων εξαρτάται από της μεταβολή των επιμέρους γωνιών κλίσεων ανά 1000 m για κάθε μία τις οκτώ διευθύνσεις, η οποία μπορεί να διαφέρει. Αυτές όπως προαναφέρθηκε, θεωρούνται ότι μεταβάλλονται σύμφωνα με την κατακόρυφη τομή της Εικόνα 25 και διαφοροποιούνται ανάλογα με την μετρούμενη κλίση στην επιφάνεια (Πίνακας 4). Κατά συνέπεια για μεγαλύτερη μετρούμενη γωνία, η μεταβολή της κλίσης θα είναι ανάλογα μεγαλύτερη. Επομένως η προβολή των τμημάτων τους στο οριζόντιο επίπεδο ( $S_n$ ) είναι μικρότερη καθώς εκφράζεται από τη συνεφαπτομένη αυτών επί 1000 m βάθους (Πίνακες 4-7).

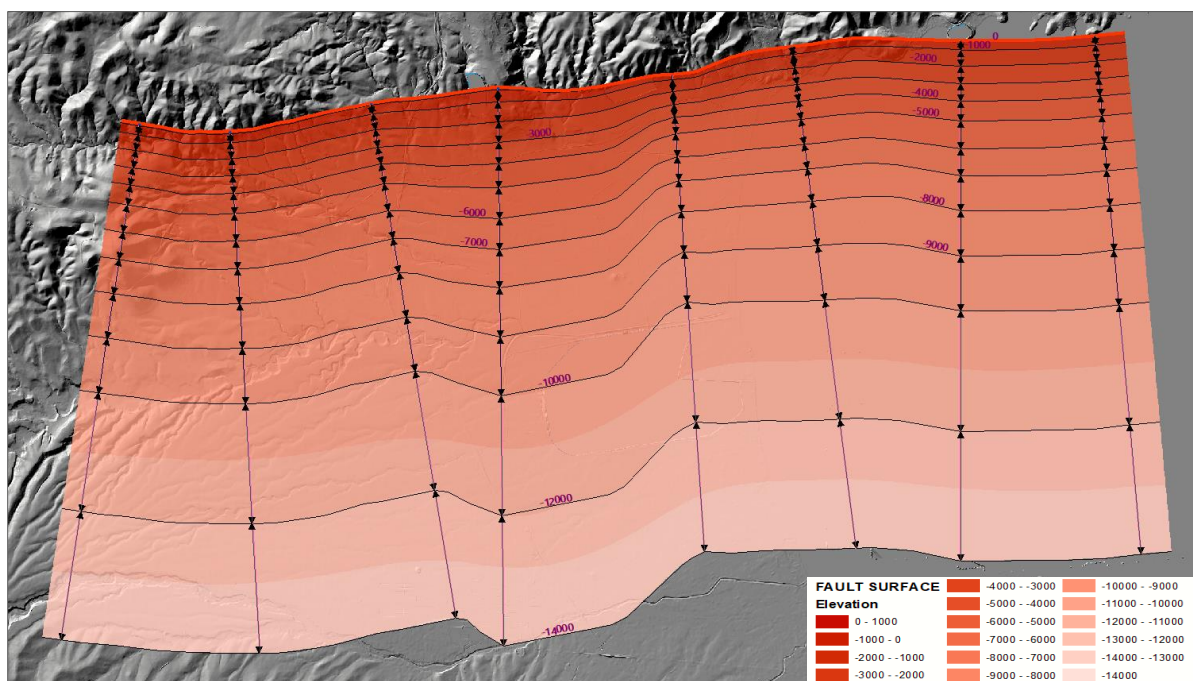


Εικ. 37 Ολοκλήρωση διαδικασίας δημιουργίας ισarithμικών καμπύλων, οι οποίες απεικονίζονται μαζί με τις γραμμές διεύθυνσης της κλίσης. Αυτή η απεικόνιση είναι προβολή των προηγούμενων στο οριζόντιο επίπεδο.

Περαιτέρω γενίκευση των ισarithμικών καμπύλων όσο προχωράμε σε βάθος, λαμβάνει υπόψη της τις κυρτώσεις που δημιουργούνται από τη διαδικασία μεταφοράς, όπου το πιο πιθανό να μην αποτελούν τμήματα ή χαρακτηριστικά της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος (Εικόνα 38).



Εικ. 38 Τελική γεωμετρία ισarithμικών καμπύλων, στις οποίες πραγματοποιήθηκε γενίκευση στα μεγαλύτερα βάθη για την απαλοιφή των στοιχείων αυτών που θεωρήθηκαν περιττά.



Εικ. 39 Απεικόνιση σε 2D της εξαχθείσας επιφάνειας του ρήγματος με διαδικασία *Topo to Raster*

Στην Εικόνα 39 φαίνεται η εξαχθείσα επιφάνεια με διαδικασία *Topo to Raster* από το Tool set *Raster interpolation* του *Analyst Tools* της εργαλειοθήκης του ArcMap [15]. Χρησιμοποιήθηκαν τα επίπεδα: **Dip** ως σημειακό (πεδίο ELEVATION), **Fault Trace EQ Numb Curves** ως γραμμικό ισοϋψών (πεδίο ELEVATION), και του **Fault Surface Polygon** ως BOUNDARY. Το τελευταίο έχει δημιουργηθεί για τις ανάγκες της μοντελοποίησης και οπτικοποίησης, στα όρια του ίχνους του ρήγματος και των υπολογιζόμενων ισαριθμητικών καμπύλων.

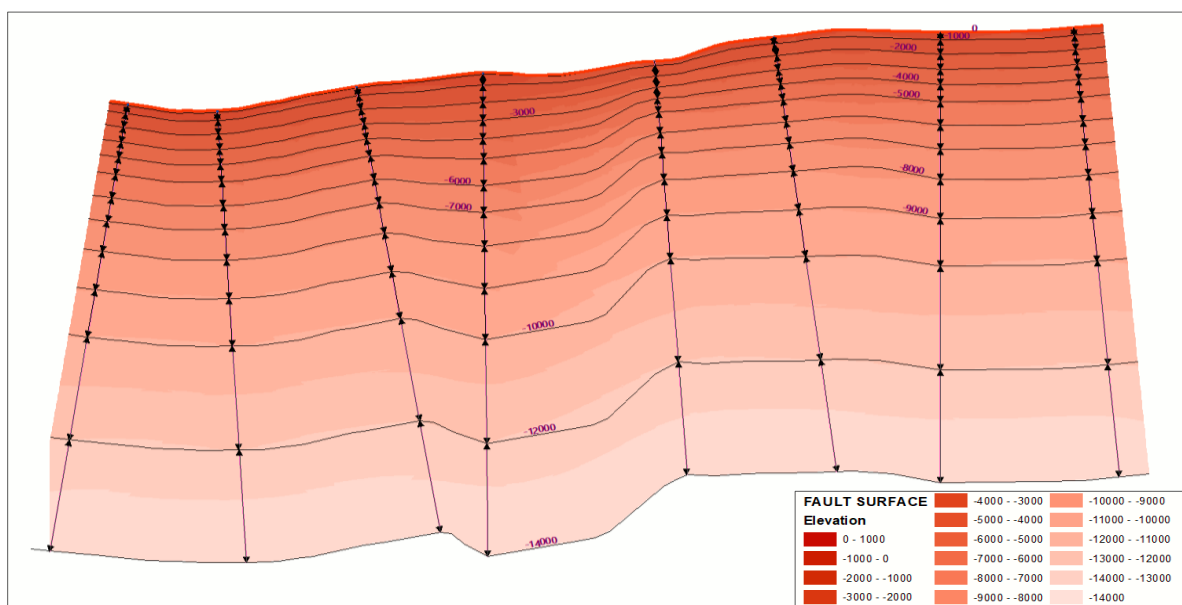
Το εργαλείο *Topo To Raster* υλοποιεί τη μέθοδο παρεμβολής *ANUDEM* (Hutchinson, Xu, & Stein, 2011), η οποία βασίζεται σε μια μορφολογική προσέγγιση και δημιουργεί ένα υδρολογικά ορθό ΨΜΥ σε δομή κανάβου [15]. Στη μέθοδο αυτή ενσωματώνονται ένας αλγόριθμος με τον οποίο εντοπίζονται αυτόματα οι γραμμές ασυνέχειας της επιφάνειας του αναγλύφου π.χ. κορυφογραμμές και μισγάγγειες και ένας αλγόριθμος ενίσχυσης των στοιχείων του υδρολογικού δικτύου, με τον οποίο αυτόματα απαλείφονται βυθίσματα ή τρύπες στο προσαρμοζόμενο πλέγμα. Η διαδικασία παρεμβολής είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Αρχικά, δημιουργείται ένας κανάβος χονδροειδούς ανάλυσης και σε κάθε επανάληψη βελτιώνεται η ανάλυση μέχρι να επιτευχθεί το μέγεθος φατνίου που ορίστηκε από το χρήστη. Ο υπολογισμός του υψομέτρου είναι συνδυασμός του μέσου όρου (1η προσέγγιση) και της μεθόδου χωρικής παρεμβολής των συναρτήσεων *splines*. Το εργαλείο έχει βελτιστοποιηθεί, ώστε να έχει την υπολογιστική αποδοτικότητα των τοπικών μεθόδων παρεμβολής, όπως για παράδειγμα η μέθοδος χωρικής παρεμβολής με βάρη αντιστρόφων της απόστασης, (IDW), χωρίς να χάνεται η συνέχεια των επιφανειών που εξασφαλίζουν οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής *Kriging* και συναρτήσεων *splines*. Πρόκειται ουσιαστικά για μια τεχνική *discretized thin plate spline* (Wahba, 1990), όπου ο περιορισμός της ομαλότητας έχει τροποποιηθεί για να επιτρέψει στο προσαρμοζόμενο ΨΜΥ να ακολουθήσει απότομες αλλαγές στο έδαφος, όπως ρέματα και κορυφογραμμές [15].

Η τεχνική *Thin Plate Spline* είναι μία μέθοδος χωρικής παρεμβολής που βρίσκει μια ελάχιστη καμπυλωμένη ομαλή επιφάνεια που περνάει από όλα τα γνωστά σημεία. Ο όρος "*Thin Plate*" προέρχεται από το γεγονός ότι μιμείται τον τρόπο που ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο συμπεριφέρεται

εάν κληθεί να περάσει από μία σειρά συγκεκριμένων σημείων. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης για τον περιορισμό της ομαλότητας μπορεί να επιτρέψει στο ΨΜΥ να ακολουθήσει την τάση του αναγλύφου πέρα από τα σημεία γνωστού υψομέτρου (παρεμβολή ελάχιστης καμπυλότητας), αλλά και τις απότομες αλλαγές στην κλίση κατά μήκος των κορυφογραμμών και των μισογαγγειών καθώς και να αναγνωρίζει σημεία στα ρέματα ως βυθίσματα [15].

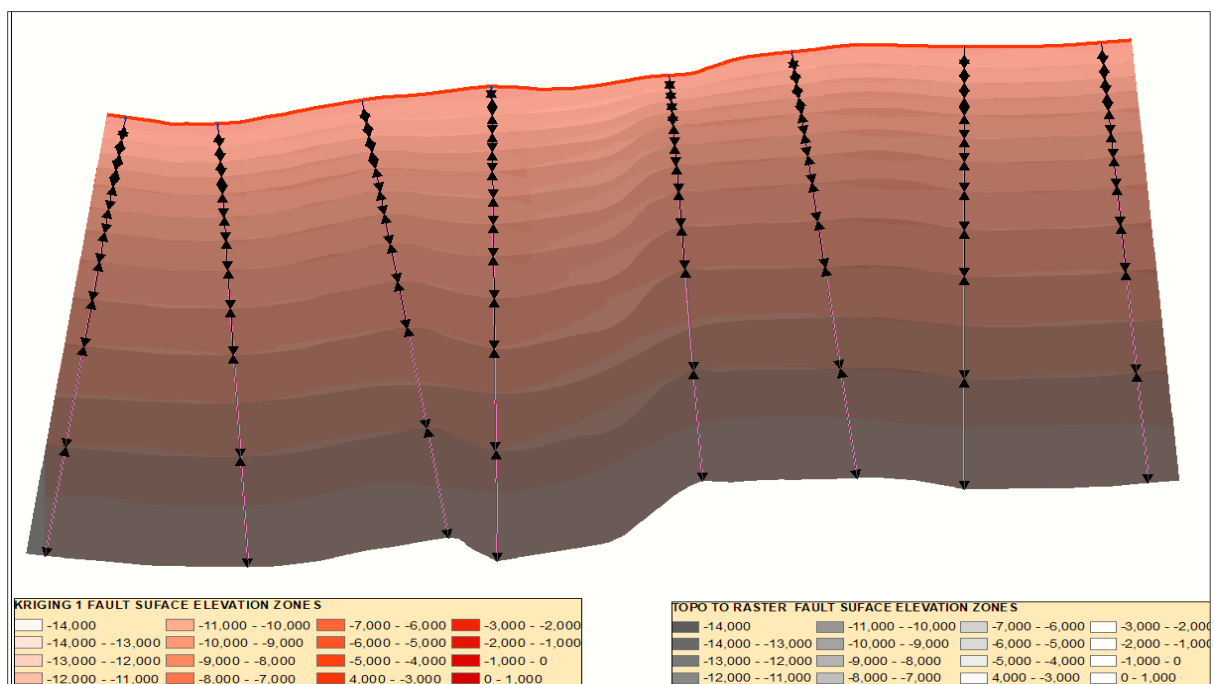
Η παραπάνω διαδικασία κρίνεται καταλληλότερη για την εξαγωγή της επιφάνειας του ρήγματος μέσω της σύνθετης διαδικασίας παρεμβολής, κυρίως τόσο εκ του αποτελέσματος, όσο και της αντιμετώπισής της ως ένα Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων. Αν και η προσαρμογή της σχετίζεται με περιοχές του αναγλύφου, οι οποίες δημιουργούνται από διαδικασίες απόθεσης, διάβρωσης, ύπαρξης υδρογραφικού δικτύου και εξομάλυνσης επιφανειών, ωστόσο το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Η επιφάνεια που εξάγεται είναι περισσότερο ομαλή και δεν δίνει περιττές εξάρσεις ή απότομες καμπυλότητες, για τις οποίες δεν υπάρχει δεδομένο αίτιο. Αποτελεί ένα είδος ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, το οποίο όμως ακολουθεί τις γεωτεκτονικές συνθήκες οι οποίες έδωσαν τη συγκεκριμένη δομή της διάρρηξης.

Οι συνθήκες αυτές είναι τόσο περίπλοκες και η γνώση τους τόσο ελλιπείς όσο και η πραγματική εικόνα της γεωμετρίας της, ειδικότερα όσο προχωράμε σε βάθος. Η ύπαρξη εξάρσεων στην επιφάνεια, απότομων αλλαγών στην κλίση προς πολλές διευθύνσεις εξαιτίας τεκτονικών και γεωλογικών αιτιών, ακόμα και η ταυτόχρονη ύπαρξη τεμνόμενων μικρότερων επιφανειών είναι πιθανή. Εκ του αποτελέσματος η προσέγγιση με τον παραπάνω συνδυασμό παρεμβολών, εξομοιώνει μεν τη διαδικασία με αυτή της εξαγωγής αναγλύφου της Γης, εν τούτοις δίνει ένα μέσο όρο των πιθανών σεναρίων της γεωμετρίας της επιφάνειας, αποφεύγοντας περιττές εξάρσεις και βυθίσματα. Δεν συμβαίνει το ίδιο ακριβώς με μια απλή διαδικασία χωρικής παρεμβολής με τη μέθοδο Kriging. Στην Εικόνα 40 γίνεται επίθεση των ισარიθμικών καμπύλων **Fault Trace EQ Numb Curves** στην επιφάνεια που εξήχθη από απλή διαδικασία *Kriging*, βάσει σημείων κλίσης **Dip**. Είναι ορατές οι διαφορές και οι κυρτώσεις κοντά στο ίχνος του ρήγματος, όπως και οι απότομες καμπές στην πρώτη, οι οποίες βάσει των στοιχείων που εισήχθησαν δεν έχουν λόγο ύπαρξης. Στην Εικόνα 41 γίνεται επίθεση της επιφάνειας που εξήχθη βάσει *Toro to Raster* πάνω στην προηγούμενη. Οι διαφορές είναι εμφανείς για το κεντρικό τμήμα της επιφάνειας κυρίως.



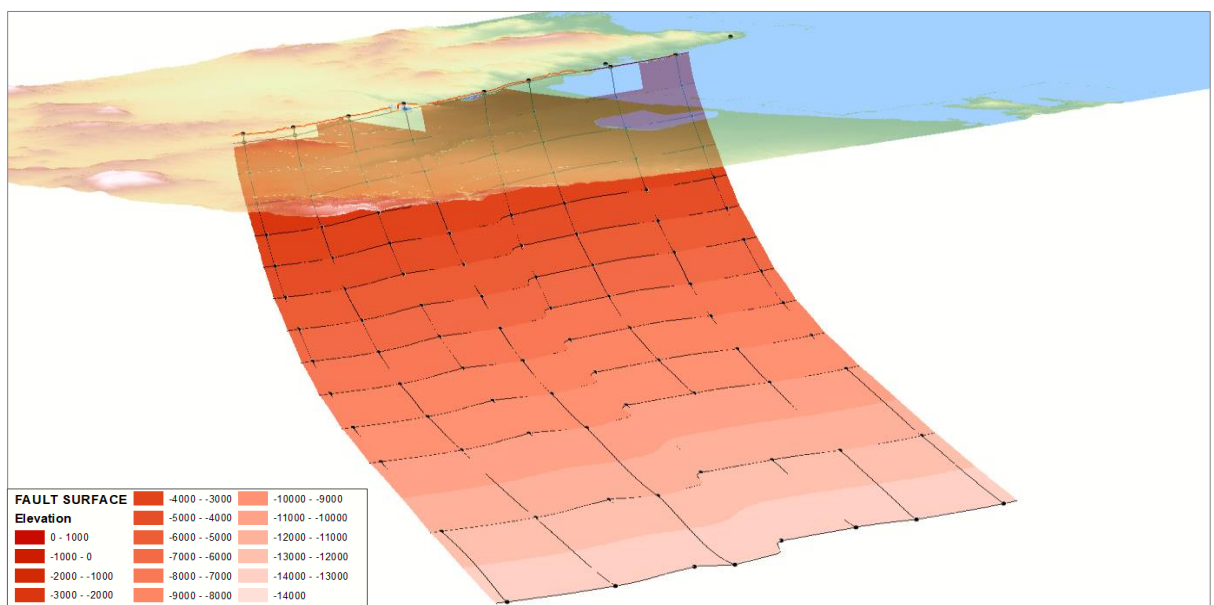
Εικ. 40 Σύγκριση μέσω επίθεσης των ισარიθμητικών καμπύλων στην επιφάνεια KRIGING 1 FAULT SURFACE που εξήχθη από απλή διαδικασία Kriging.



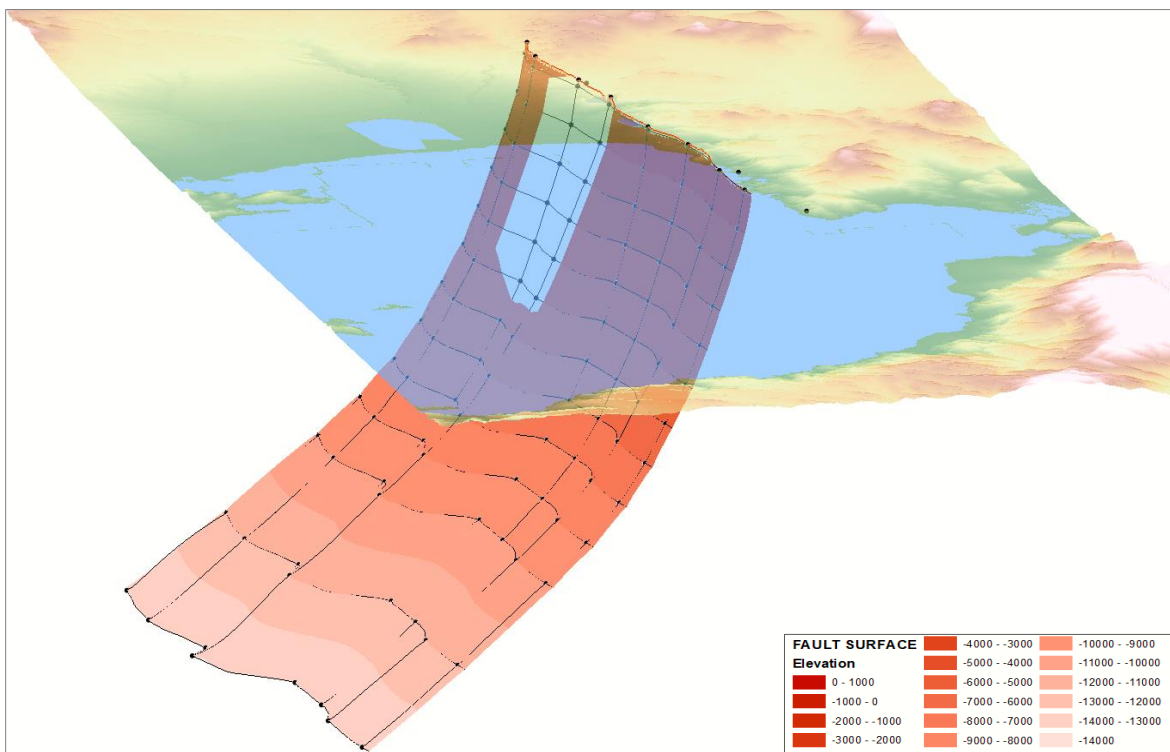


Εικ. 41 Σύγκριση μέσω επίθεσης στην παραπάνω επιφάνεια, της επιφάνειας TOPO TO RASTER FAULT SURFACE που προκύπτει από τη διαδικασία Topo to Raster

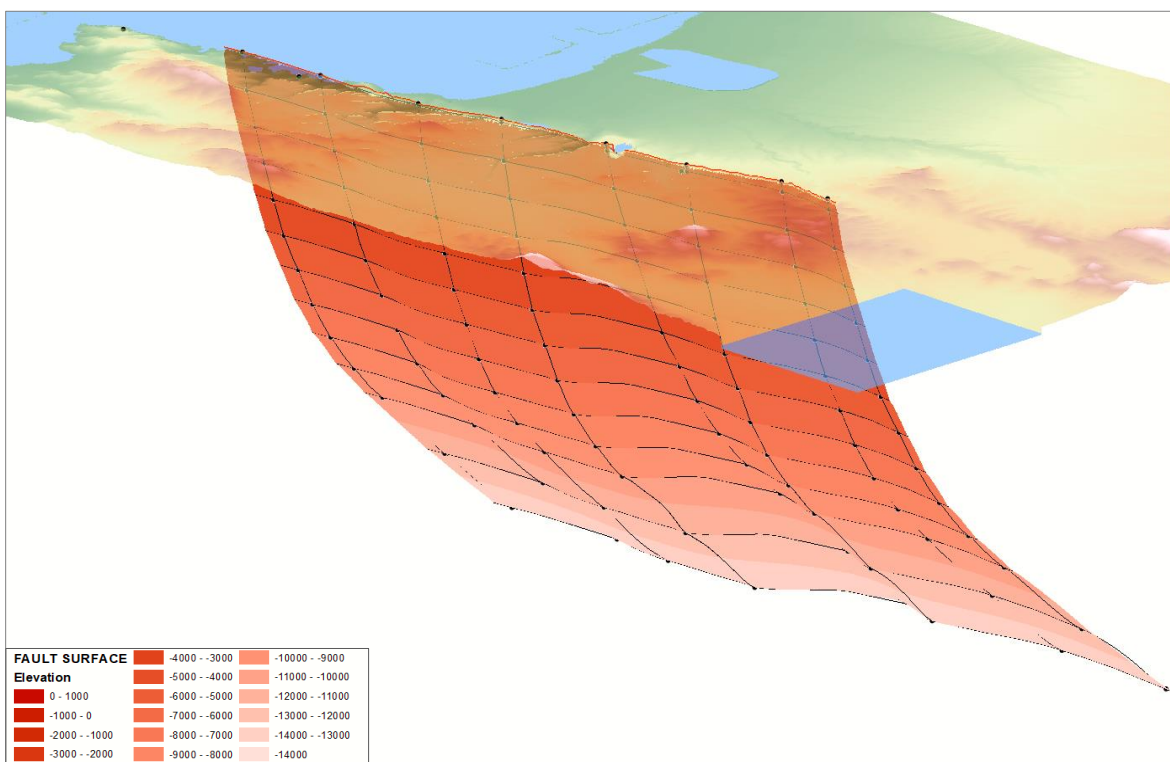
Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της μοντελοποίησης του ρήγματος της Νέας Αγκιάλου, μέσω της διαδικασίας *Topo to Raster* απεικονίζεται στις Εικόνες 42, 43 και 43 από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Το ίχνος του ρήγματος αναπαρίσταται με γραμμή κόκκινου χρώματος, οι ισარიθμητικές καμπύλες **Fault Trace EQ Numb Curves** ανά 1.000 m βάθους με μαύρο χρώμα, όπως και οι γραμμές μεταβολής της κλίσης **Dip Lines**. Τα παραπάνω ανήκουν στην επιφάνεια του ρήγματος και οπτικοποιημένα σχηματίζουν έναν κάναβο ορθογωνικού πλέγματος.



Εικ. 42 Τρισδιάστατη οπτικοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος με συνδυασμό raster υψομετρικών ζωνών και πλέγματος ισარიθμητικών καμπύλων και γραμμών μεταβολής της κλίσης. Το ίχνος του ρήγματος αναπαρίσταται με την κόκκινη γραμμή. Το ανάγλυφο αναπαρίσταται με DEM.



Εικ. 43 Τρισδιάστατη οπτικοποίηση από αντίθετη οπτική γωνία της επιφάνειας του ρήγματος με συνδυασμό raster υψομετρικών ζωνών και πλέγματος ισαριθμητικών καμπύλων και γραμμών μεταβολής της κλίσης. Το ίχνος του ρήγματος αναπαρίσταται με την κόκκινη γραμμή. Το ανάγλυφο αναπαρίσταται με DEM



Εικ. 44 Τρισδιάστατη οπτικοποίηση από διαφορετική οπτική γωνία της επιφάνειας του ρήγματος με συνδυασμό raster υψομετρικών ζωνών και πλέγματος ισαριθμητικών καμπύλων και γραμμών μεταβολής της κλίσης. Το ίχνος του ρήγματος αναπαρίσταται με την κόκκινη γραμμή. Το ανάγλυφο αναπαρίσταται με DEM.

### 3.7 Πύκνωση ισαριθμητικών καμπύλων και οπτικοποίηση επιφάνειας

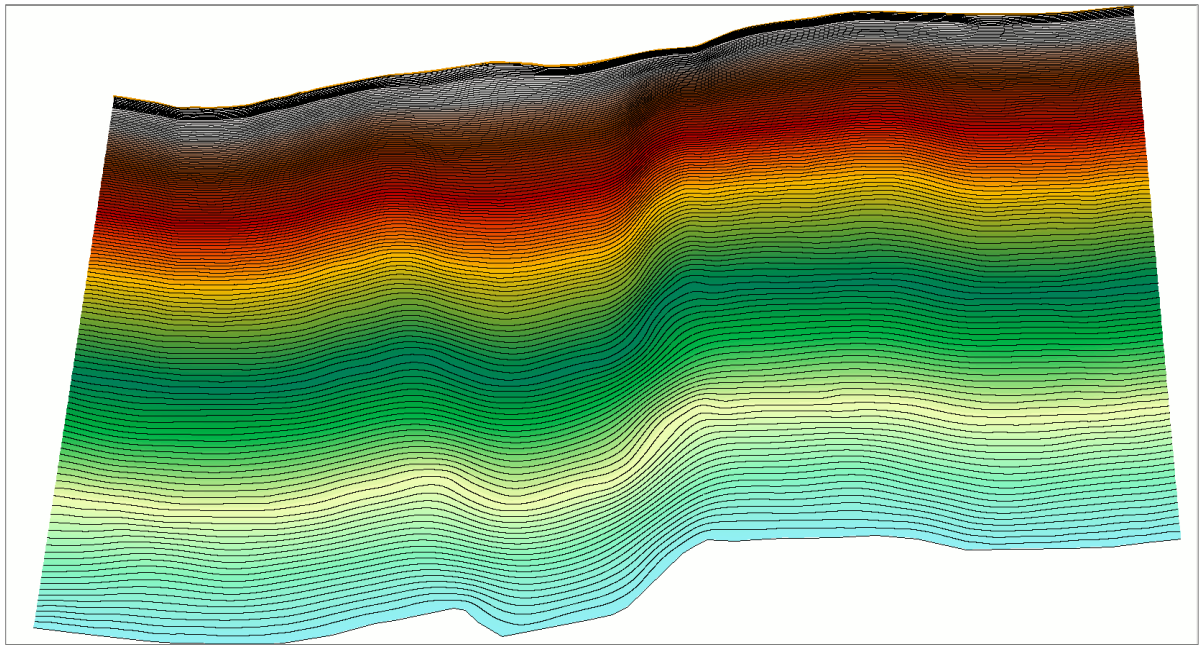
Για την οπτικοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος έως τώρα, έχει χρησιμοποιηθεί η raster επιφάνεια που προκύπτει από την χρήση του εργαλείου *Topo to Raster* του *ArcMap*. Η συγκεκριμένη διαδικασία παρεμβολής έδωσε μια επιφάνεια, η οποία έχει ομαλοποιήσει τις παραγόμενες ισαριθμητικές καμπύλες, και για την εξαγωγή της συμμετείχαν:

1. Οι αρχικές ισαριθμητικές καμπύλες του επιπέδου **Fault Trace EQ Numb Curves**, οι οποίες είναι γενικευμένες για τις ανάγκες μιας αφαιρετικής αναπαράστασης της γεωμετρίας της επιφάνειας. Όσο αυξάνεται το βάθος του ρήγματος αυξάνεται και η απουσία δεδομένων.
2. Το τρισδιάστατο σημειακό επίπεδο **Fault Trace 3D Points**, που ως παράγωγο του αντίστοιχου γραμμικό επιπέδου **Fault Trace 3D** εκφράζει την προβολή της τομής της επιφάνειας του ρήγματος με το οριζόντιο επίπεδο. Από το ανάγλυφο της περιοχής που αναπαρίσταται από το DEM, υπολογίστηκε το υψόμετρο των σημείων του ίχνους του ρήγματος με παρεμβολή χρησιμοποιώντας το εργαλείο *Interpolate Shape* του *3D Analyst* στον *ArcMap*.
3. Το πολυγωνικό επίπεδο **Fault Surface Polygon** περιλαμβάνει ένα και μοναδικό πολύγωνο, που αντιστοιχεί στην προβολή της επιφάνειας του ρήγματος στο οριζόντιο επίπεδο. Το περιγράμμα του περιλαμβάνει το ίχνος του ρήγματος, την βαθύτερη ισαριθμητική καμπύλη (-14000 μ) και εφάπτεται με τα άκρα των υπόλοιπων καμπύλων.

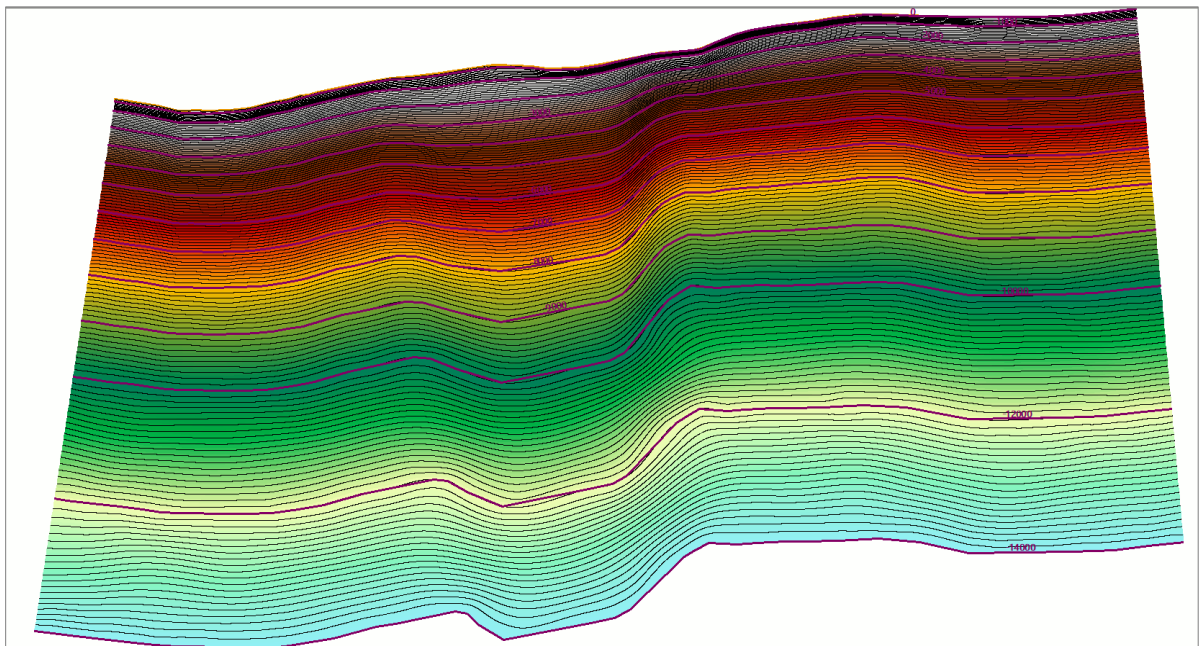
Για την ακριβέστερη αναπαράσταση και οπτικοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος είναι απαραίτητη η πύκνωση των ενδιάμεσων ισαριθμητικών καμπύλων των 1.000 m βάθους και ο προσδιορισμός του υψομέτρου τους. Η λογική πίσω από αυτή τη διαδικασία σκοπεύει στην πύκνωση τελικά των σημείων της επιφάνειας του ρήγματος με τρόπο που να ακολουθεί τα γεωμετρικά στοιχεία και τις δομές που έχουν εξαχθεί. Πυκνώνουμε τις καμπύλες εξάγοντας ισοϋψείς από την παραχθείσα raster επιφάνεια με το εργαλείο *Contours* ανά 100 m βάθους δημιουργώντας το επίπεδο **Fault Contures 100m** που φαίνεται στην Εικόνα 45. Αυτές ακολουθούν την ομαλή επιφάνεια που εξήχθη μέσω της διαδικασίας *Topo to Raster*.

Κατ' αυτόν τον τρόπο γενικεύουμε την επιφάνεια, θεωρώντας ότι είναι μια μέση προσέγγιση της γεωμετρίας αυτής του ρήγματος, ενώ διατηρεί τις μεταβολές που γνωρίζουμε ότι υπάρχουν σε μεγαλύτερο βάθος. Την μορφή και γεωμετρία τους μπορούμε να παρατηρήσουμε στις Εικόνα 45. Ερμηνεύοντας την Εικόνα 46 παρατηρούμε ότι οι καμπύλες είναι πιο ομαλές από αυτές που αρχικά υπολογίσαμε. Είναι εμφανείς η διαφοροποίησή τους κυρίως στα σημεία καμπής, με τις αρχικά υπολογισμένες ισαριθμητικές καμπύλες **Fault Trace EQ Numb Curves**.

Η διαφοροποίηση αυτή αποτελεί και αντικείμενο προβληματισμού πάνω στη γενικότερη αντιμετώπιση της τρισδιάστατης μοντελοποίησης, με το δυνατό λιγότερες τοπικές εξάρσεις γεωμετρίας της επιφάνειας, όταν δεν υπάρχει γνωστό αίτιο. Επίσης αξιολογείται η αποδοχή και αξιοποίηση του μοντέλου μεταβολής της κλίσης της εικόνας 25 [1], θεωρώντας το ορθό και το δυνατό ακριβές. Όπως και το ότι το παραπάνω μοντέλο εφαρμόζεται για τις 8 διευθύνσεις της κλίσης και δεδομένα που προέρχονται από 4 σημεία μετρήσεων υπαίθρου και 4 υπολογιζόμενων εν είδη πύκνωσης επάνω στο ίχνος του ρήγματος [2]. Τέλος, ο μικρός αριθμός δεδομένων ειδικότερα όσο πάμε βαθύτερα, αντιμετωπίζεται από τη γενίκευση της μεθόδου, αλλά δεν καλύπτει πιθανές διαφοροποιήσεις, από μη γνωστά αίτια.



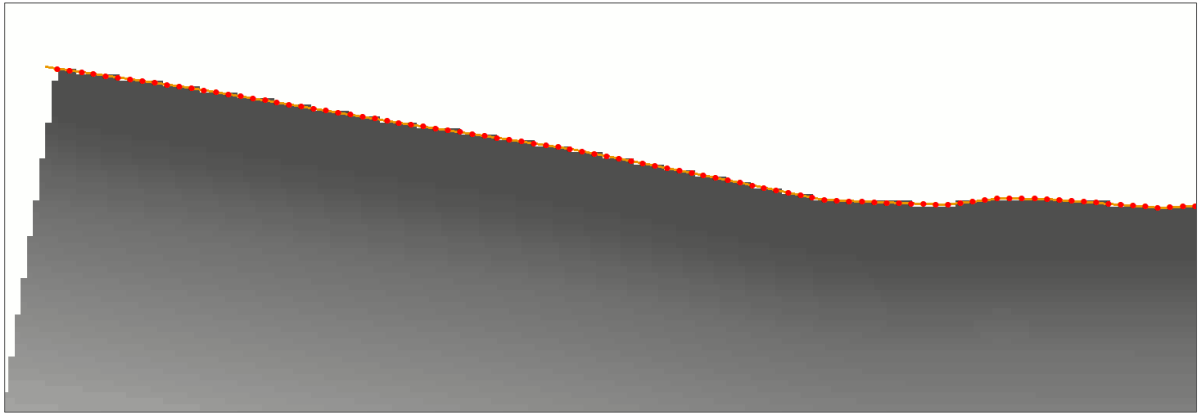
Εικόνα 45 Ισαριθμητικές Fault Contures 100m πάνω στην Raster επιφάνεια ρήγματος TOPO TO RASTER FAULT SURFACE ανάλυσης 10m με ανάλυση pixel 10 m.



Εικόνα 46 Ισαριθμητικές Fault Contures 100m και σε επίθεση Ισαριθμητικές Fault Trace EQ Numb Curves επάνω στη raster επιφάνεια ρήγματος ft\_surf\_10m με ανάλυση εικονοστοιχείου 10 m. Παρατηρείται η διαφορά τους ειδικά στο κεντρικό τμήμα της επιφάνειας του ρήγματος.

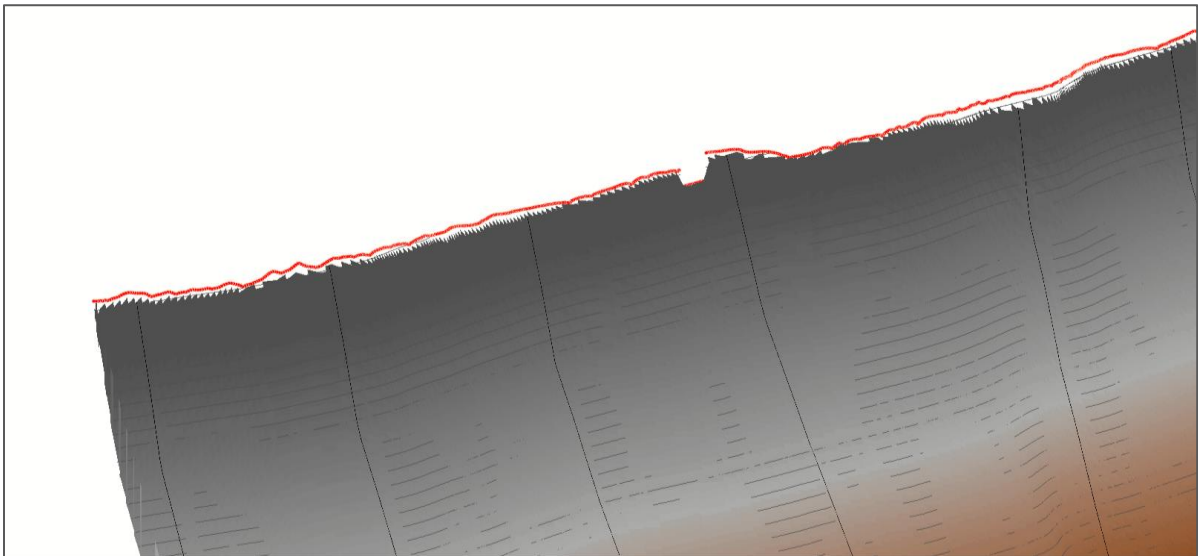
### 3.8 Προβλήματα στην οπτικοποίηση της επιφάνειας με raster αρχείο

Τα προβλήματα στην οπτικοποίηση της επιφάνειας μέσω raster αρχείου είναι ορατά σε μεγέθυνση, εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές που υπάρχει επίθεση με το ίχνος του ρήγματος και παρουσιάζονται στην Εικόνα 47. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι τα φατνία του εξαγόμενου raster αρχείου (ΨΜΥ), είναι τετράγωνα με ακμές που έχουν προσανατολισμό προς τις 4 διευθύνσεις του επιπέδου, ενώ το περίγραμμα της επιφάνειας του ρήγματος, έχει μεταβαλλόμενο προσανατολισμό. Αν και η ανάλυση 10x10 m είναι αρκετά υψηλή, σε κλίμακες 1:5.000 και άνω, τα προβλήματα στην οπτικοποίηση είναι εμφανή ακόμα και σε 2 διαστάσεις.



Εικ. 47 Διαφοροποιήσεις και χωρικά σφάλματα της raster επιφάνειας του ρήγματος σε σχέση με τη θέση των σημείων του ίχνους του ρήγματος ανά 20 m, απεικόνιση σε 2 διαστάσεις

Το πρόβλημα γίνεται μεγαλύτερο και πιο σύνθετο, στην τρισδιάστατη οπτικοποίηση στον *ArcScene*. Για οποιαδήποτε γωνία προβολής, τα περιμετρικά φατνία απεικονίζονται με αυξημένη παραμόρφωση, όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 48. Αυτό συμβαίνει καθώς στο προαναφερθέν αίτιο προστίθεται το ότι δεν μπορούν να αποτελέσουν επακριβώς το περίγραμμα μιας επιφάνειας η οποία έχει και μεταβλητό προσανατολισμό στις 3 διαστάσεις του χώρου. Το ίδιο συμβαίνει σε οποιαδήποτε επιφάνεια, μιας και αυτές αποτελούνται από τετράγωνα φατνία.



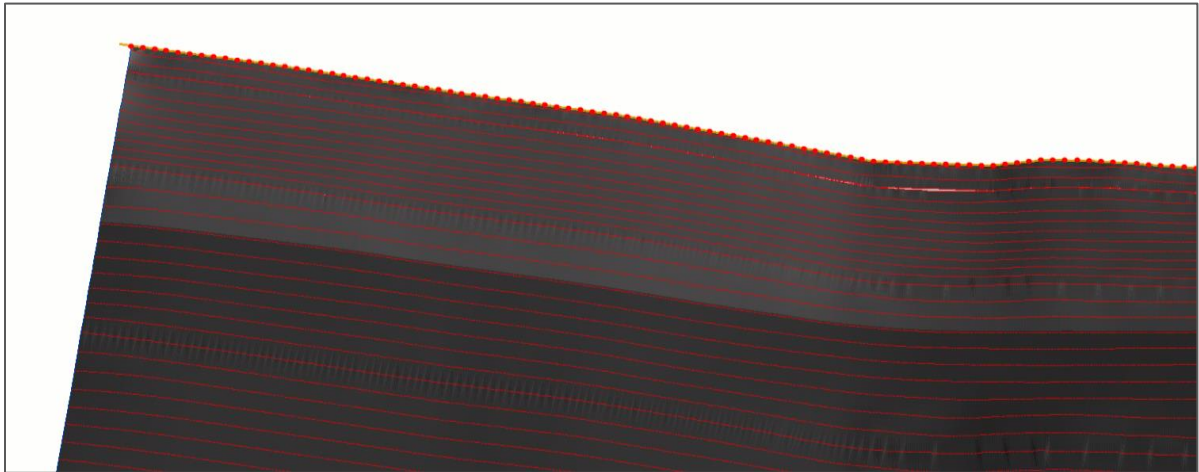
Εικ. 48 Διαφοροποιήσεις και χωρικά σφάλματα της raster επιφάνειας του ρήγματος με τη θέση των σημείων και της γραμμής του ίχνους του ρήγματος ανά 20 μέτρα, απεικόνιση σε 3 διαστάσεις

### 3.9 Τελική οπτικοποίηση με TIN και αντιμετώπιση προβλημάτων

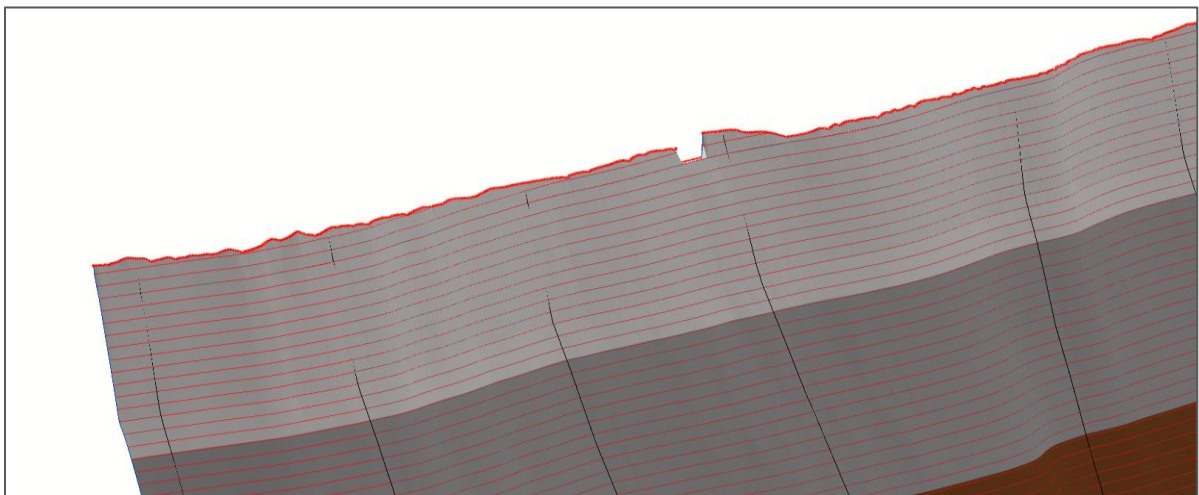
Για το τελικό στάδιο της μοντελοποίησης και ορθής οπτικοποίησης σε τρεις διαστάσεις, δημιουργούμε το αντίστοιχο Δίκτυο Ακανόνιστων Τριγώνων που αντιστοιχεί στην επιφάνεια που εξήχθη προηγουμένως με *Toro To Raster*. Με το εργαλείο *Create TIN* του *3D Analyst*, εξάγουμε το TIN με τη συμμετοχή των επιπέδων:

1. **Fault Contours 100m** αφού έχει αντικατασταθεί η ισαριθμητική των -14.000 m με αυτήν του επιπέδου **Fault Trace EQ Numb Curves** και διορθωθεί τυχόν σφάλματα στη γεωμετρία.
2. **Fault Surface Polygon** όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ως το όριο της επιφάνειας.
3. **Fault Trace 3D Points** όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ως το ίχνος του ρήγματος.

Το TIN που προκύπτει εμφανίζει αρκετά πυκνό δίκτυο τριγώνων που καλύπτει όλη την επιφάνεια του πολυγώνου, τα οποία ακολουθούν ακριβώς το περίγραμμά του, χωρίς να δημιουργούνται σφάλματα όπως εξαιτίας της τετράγωνης δομής των φατνίων του raster. Στις παρακάτω Εικόνες 49 και 50 απεικονίζεται σε δύο και τρεις διαστάσεις αντίστοιχα, η επιφάνεια του TIN μαζί με τις ισαριθμητικές καμπύλες. Το πολύγωνο της επιφάνειας του ρήγματος καλύπτεται πλήρως από το δίκτυο των ακανόνιστων τριγώνων.

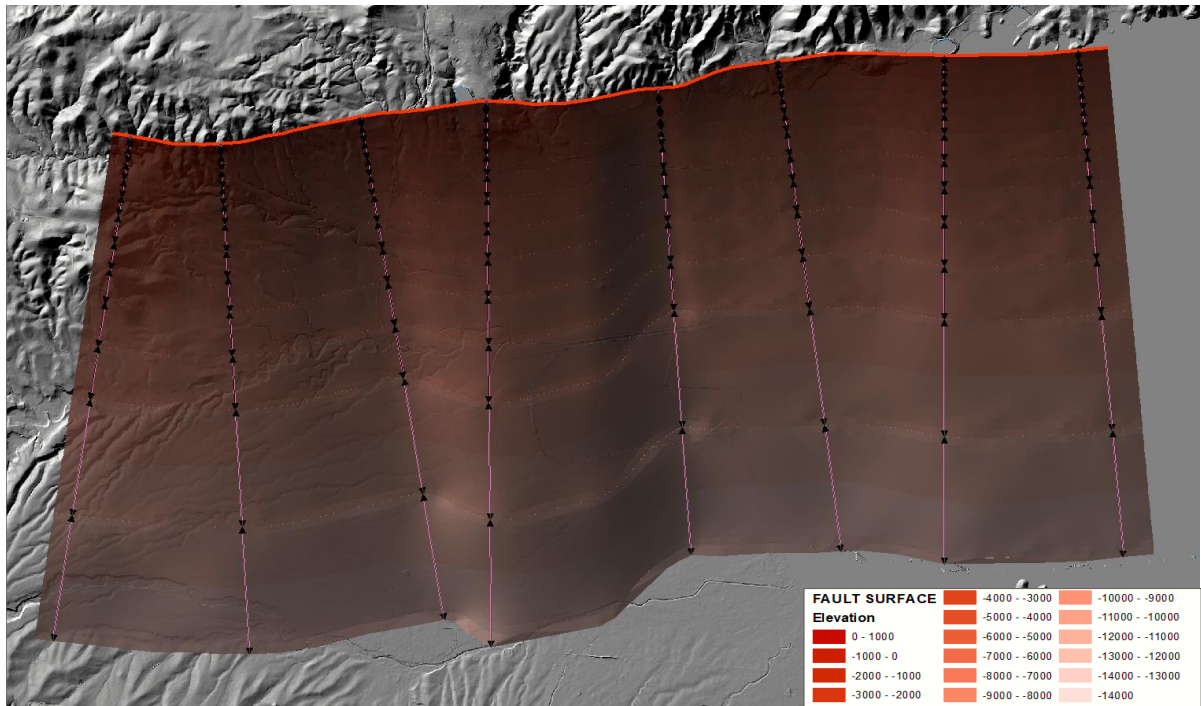


Εικ. 49 Τελική οπτικοποίηση επιφάνειας του ρήγματος σε μορφή TIN και τις ισαριθμητικές καμπύλες 100 m σε επίθεση (2D)



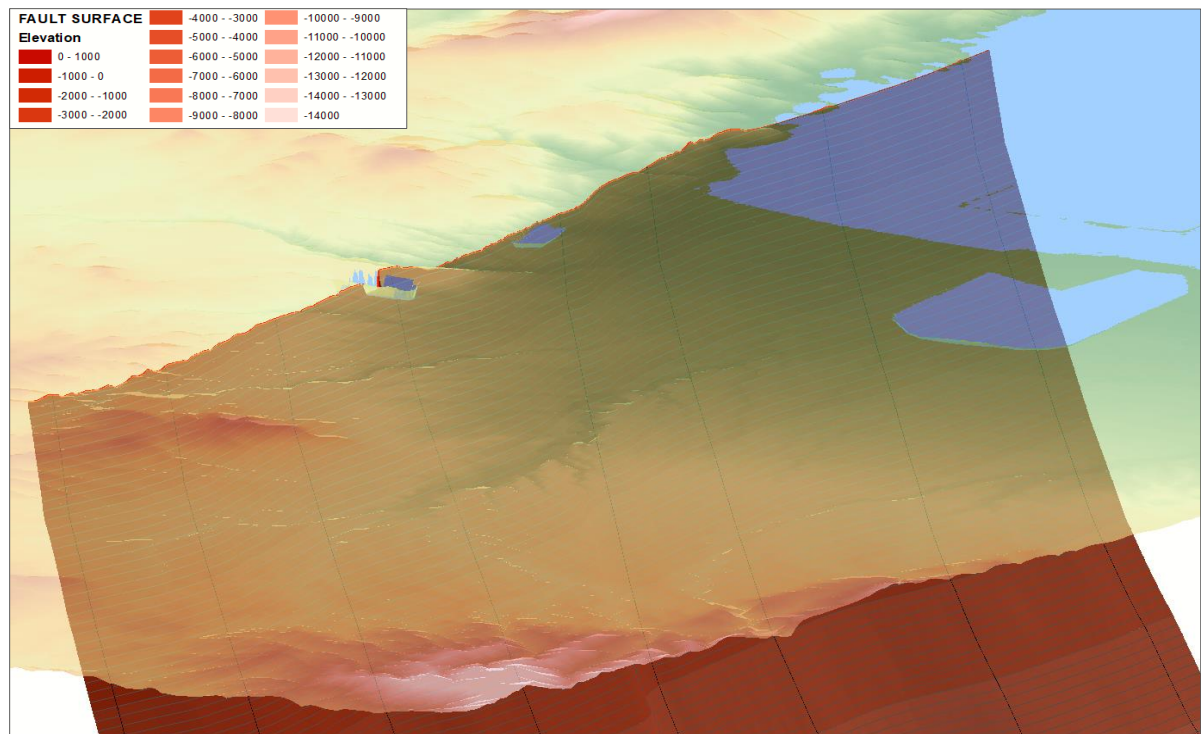
Εικ. 50 Τελική οπτικοποίηση επιφάνειας του ρήγματος σε μορφή TIN και τις ισαριθμητικές καμπύλες 100 m σε επίθεση (3D)

Στις παρακάτω Εικόνα 50 απεικονίζεται σε δύο διαστάσεις η επιφάνεια του ρήγματος, πάνω σε φωτοσκιασμένο ανάγλυφο της περιοχής που καλύπτει.

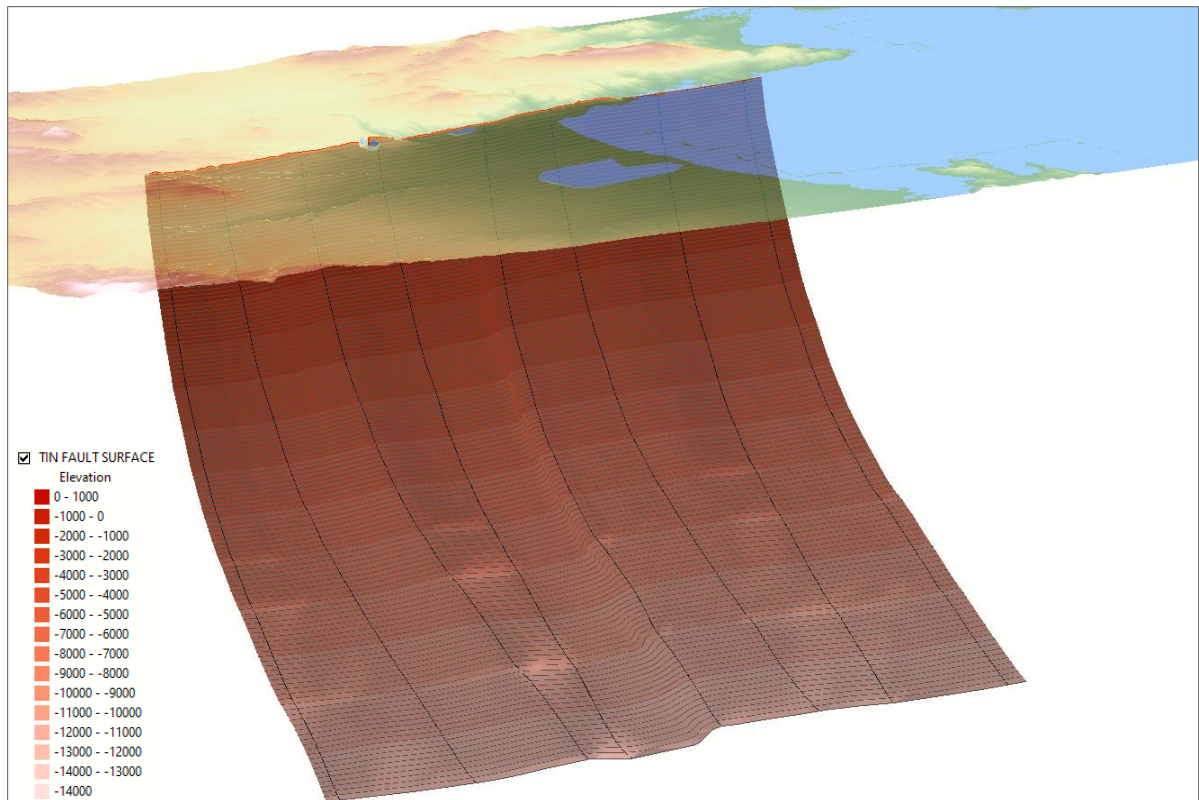


Εκ. 51 Τελική 2D οπτικοποίηση επιφάνειας του ρήγματος υπό μορφή TIN σε φωτοσκιασμένο ανάγλυφο

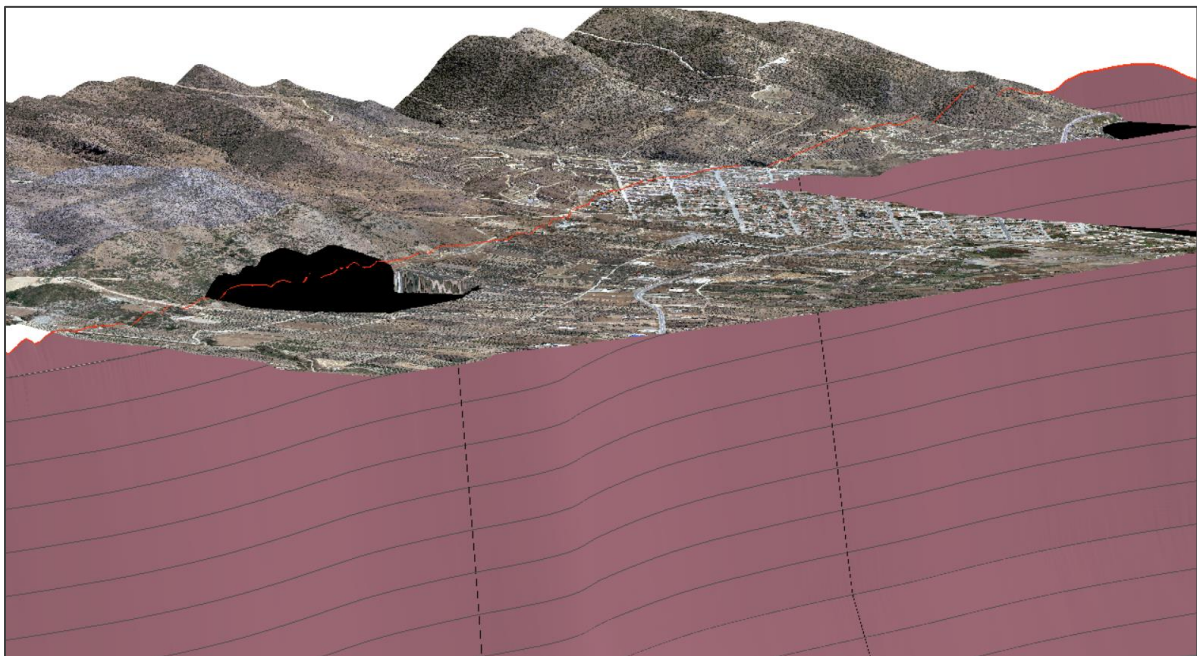
Στις παρακάτω Εικόνες 52 και 53 απεικονίζεται σε τρεις διαστάσεις η επιφάνεια του ρήγματος, μαζί με τις ισარიθμητικές καμπύλες ανά 100 m και το DEM της περιοχής, από διαφορετικές απόψεις.



Εκ. 52 Άποψη από τη 3D οπτικοποίηση της επιφάνειας του ρήγματος υπό μορφή TIN σε ΨΜΕ με διαφάνεια



Εικ. 53 Άποψη από τη 3D οπτικοποίηση επιφάνειας του ρήγματος υπό μορφή TIN σε ΨΜΕ με διαφάνεια



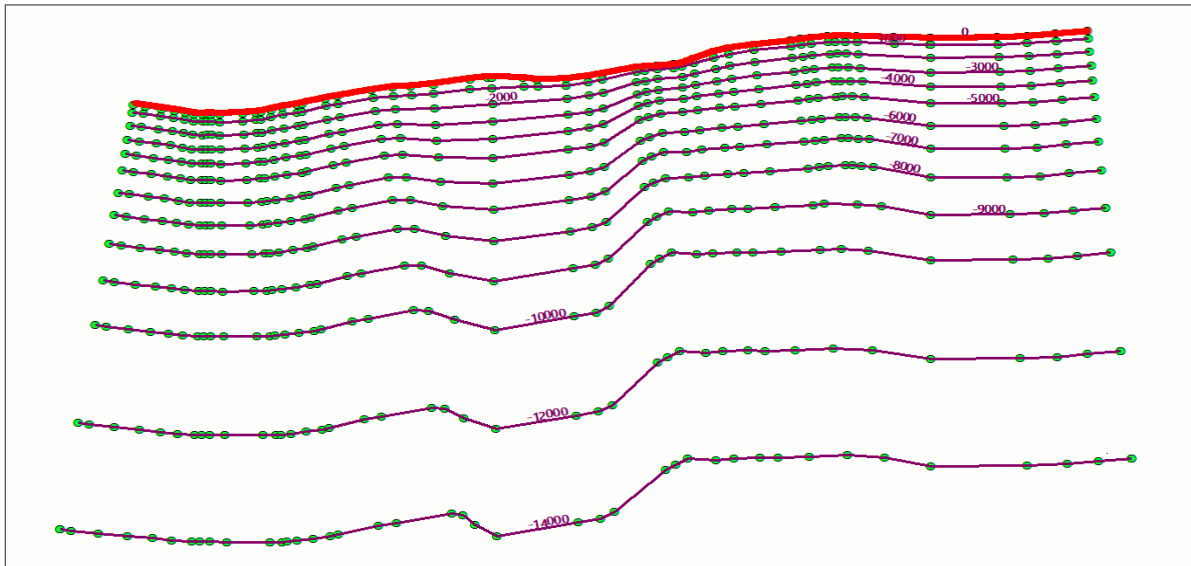
Εικ. 54 Άποψη από τη 3D οπτικοποίηση επιφάνειας του ρήγματος υπό μορφή TIN σε ορθοφωτοχάρτες ανάλυσης 0,25 m του ΝΠΔΔ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ

Στις επάνω Εικόνα 54 απεικονίζεται σε τρεις διαστάσεις η επιφάνεια του ρήγματος, μαζί με τις ισαριθμητικές καμπύλες ανά 100 m σε συνδυασμό με ορθοφωτοχάρτες της περιοχής, από διαφορετικές απόψεις. Το ίχνος του ρήγματος αναπαρίσταται με κόκκινη γραμμή.



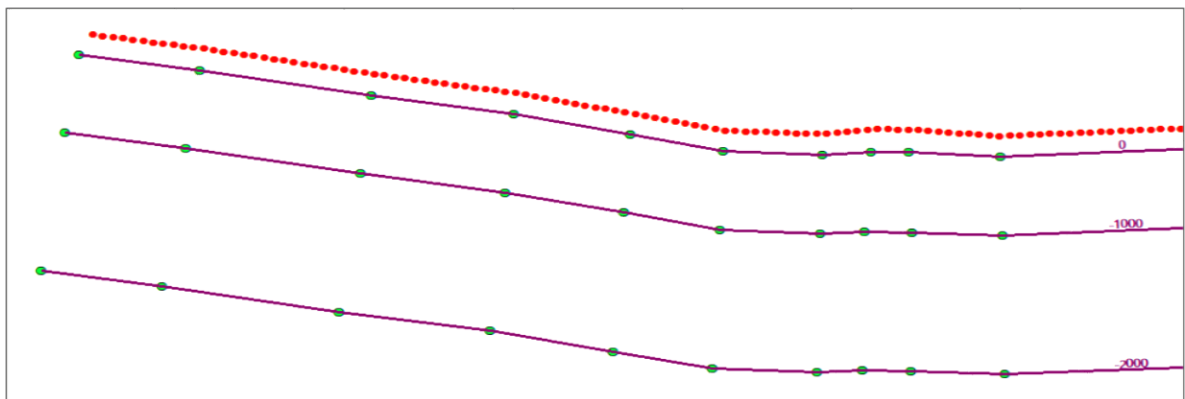
### 3.10 Εξαγωγή επιφάνειας με πύκνωση σημείων και παρεμβολή Kriging

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία εξαγωγής επιφάνειας μέσω παρεμβολής Kriging. Από τις υπολογισμένες ισარიθμητικές καμπύλες ανά 1.000 m βάθους **Fault Trace EQ Numb Curves**, εξάγουμε όσα σημεία αντιστοιχούν στις κορυφές (vertices), τα οποία έχουν το ίδιο υψόμετρο για κάθε μία. Η διαδικασία πραγματοποιείται με το εργαλείο *Feature Vertices To Points (Data Management)* και εξάγεται το επίπεδο **Fault Trace EQ Numb Curves to Points**. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ο βαθμός γενίκευσης στη γεωμετρία των ισარიθμητικών αυξάνεται ελαφρώς στα βαθύτερα, γεγονός που εκφράζει τον αντίστοιχο αυξανόμενο βαθμό έλλειψης δεδομένων. Αυτό αντικατοπτρίζεται και στη γεωμετρία των σημείων, που προέκυψαν από τις κορυφές των καμπύλων, όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 55.



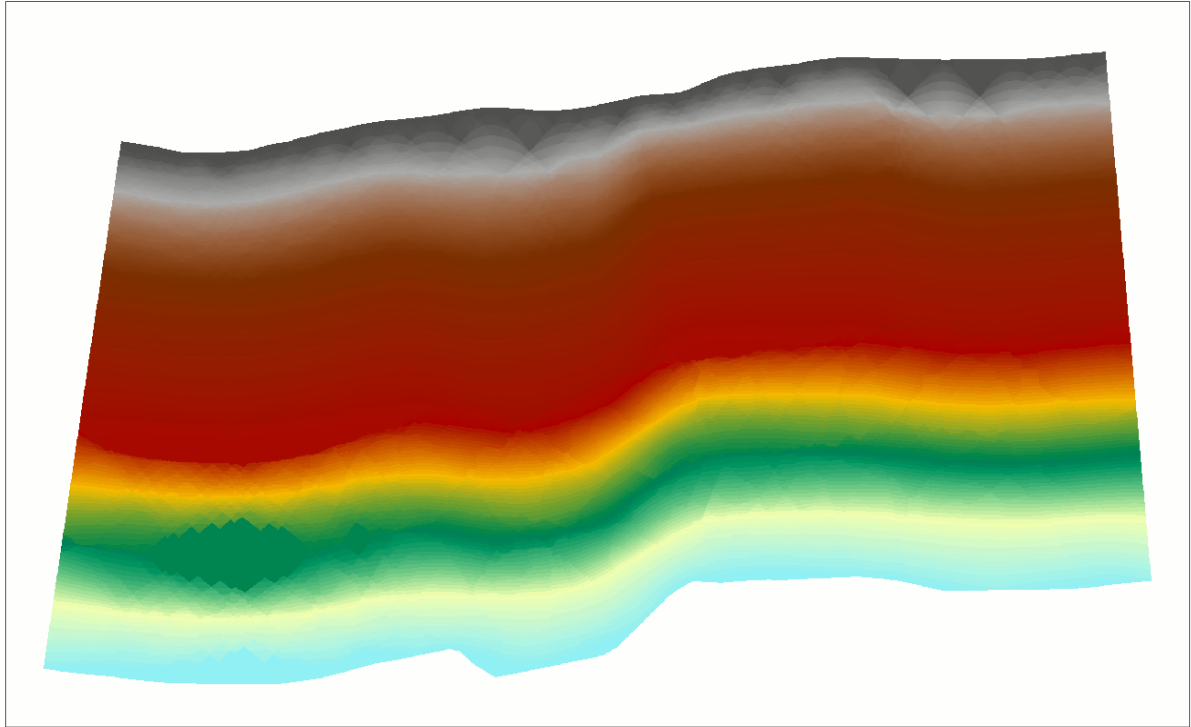
Εικ 55. Εξαγωγή σημείων από τις κορυφές των ισარიθμητικών καμπύλων και από πύκνωση των σημείων του ίχνους του ρήγματος ανά 20 m.

Σε αντίθεση έρχεται η πυκνή δομή των σημείων της τομής της επιφάνειας του ρήγματος με το ανάγλυφο, καθώς η διορθωμένη γεωμετρία του προκύπτει από ΨΜΕ και ορθοφωτοχάρτες μεγάλης ανάλυση και λεπτομέρειας. Κατά συνέπεια η ορθή αναπαράσταση, με το δυνατό μικρότερα «κενά», οδηγεί στην πύκνωση των σημείων του ίχνους. Τα υψόμετρα τους προέκυψαν από την λεπτομερή ανάλυση της προβολής του στο ΨΜΕ ανά 20 μέτρα απόσταση, όπως αναφέρεται και πιο πάνω.

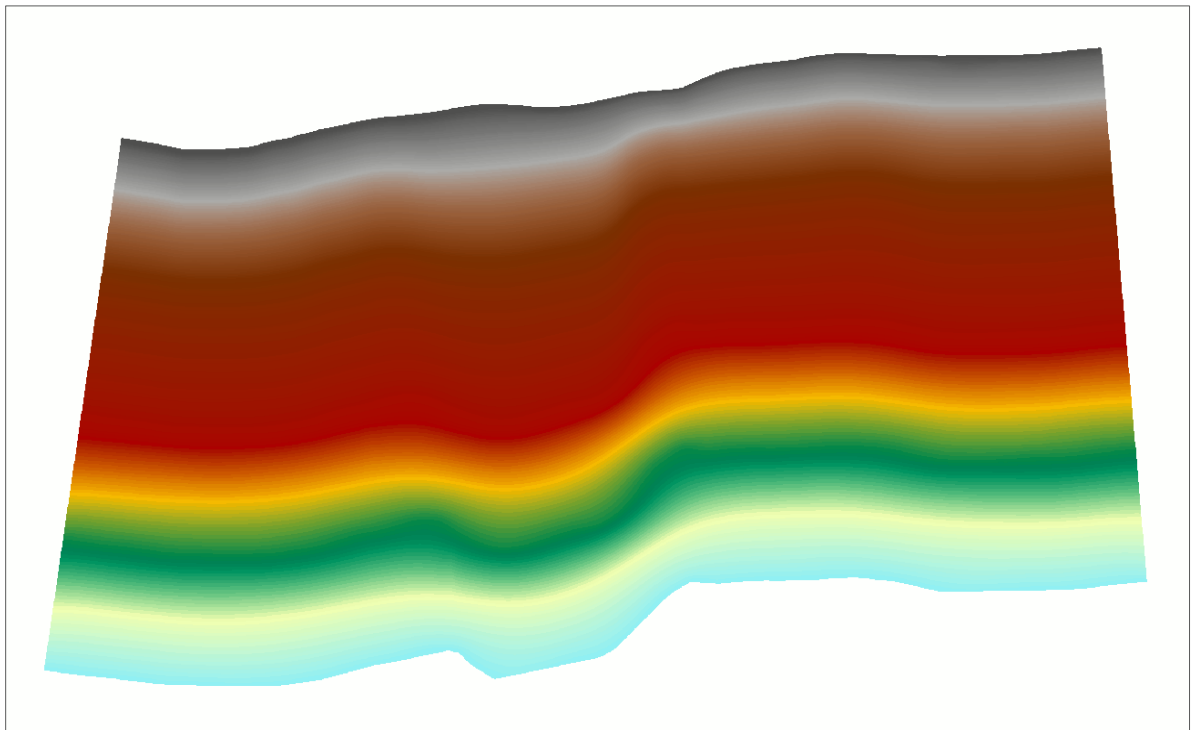


Εικ 56. Διαφορά πύκνωσης σημείων στο ίχνος και τις ισარიθμητικές καμπύλες

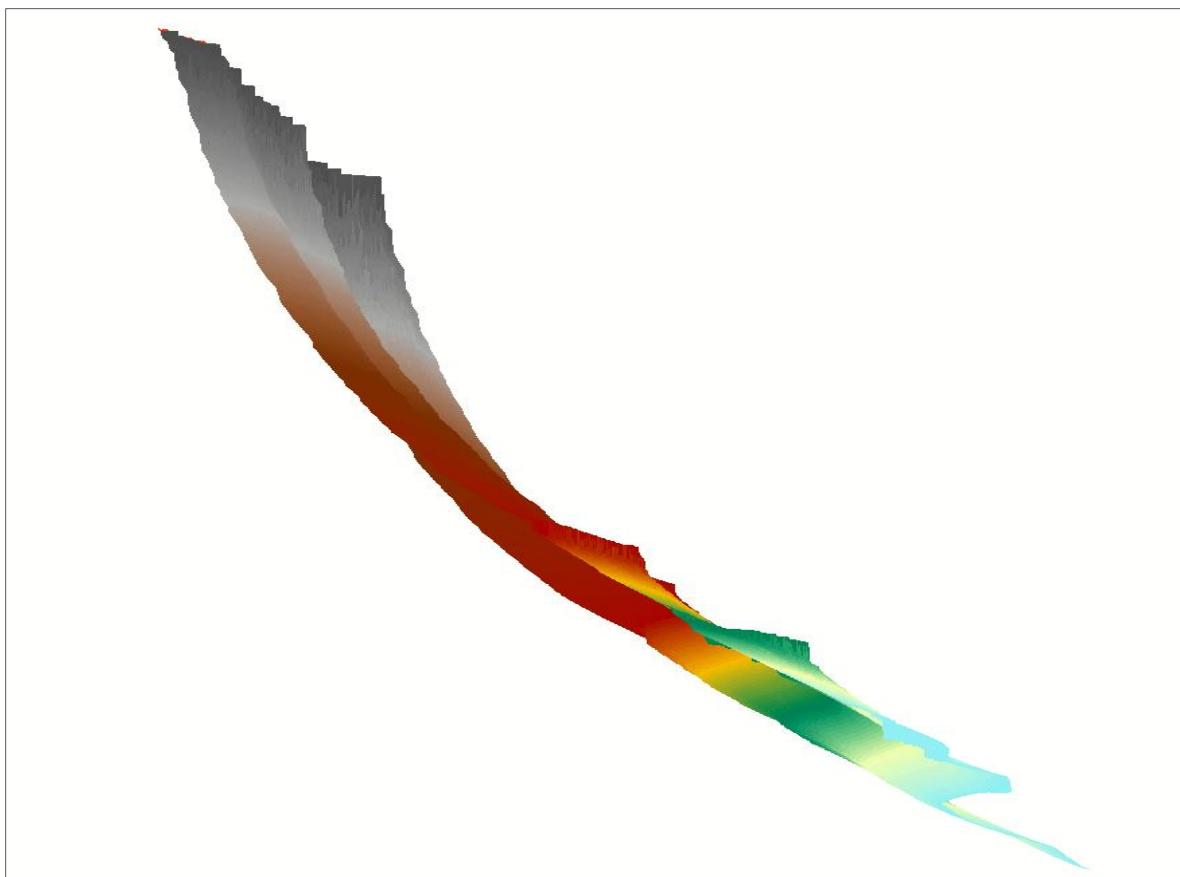
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής Kriging και αποκόπτοντας στα όρια του πολυγώνου της προβολής της επιφάνειας του ρήγματος, εξάγουμε την επιφάνεια KRIGING 2 RASTER FAULT SURFACE. Στις Εικόνες 57 και 59 παρουσιάζεται η επιφάνεια σε σύγκριση με την προηγούμενη εξαχθείσα από τη διαδικασία *Topo to raster*, σε 2D και 3D αντίστοιχα. Στην Εικόνες 58 και 60 παρουσιάζεται με ίδιο συμβολισμό η επιφάνεια που εξήχθη μέσω *Topo to Raster*, σε 2D και 3D.



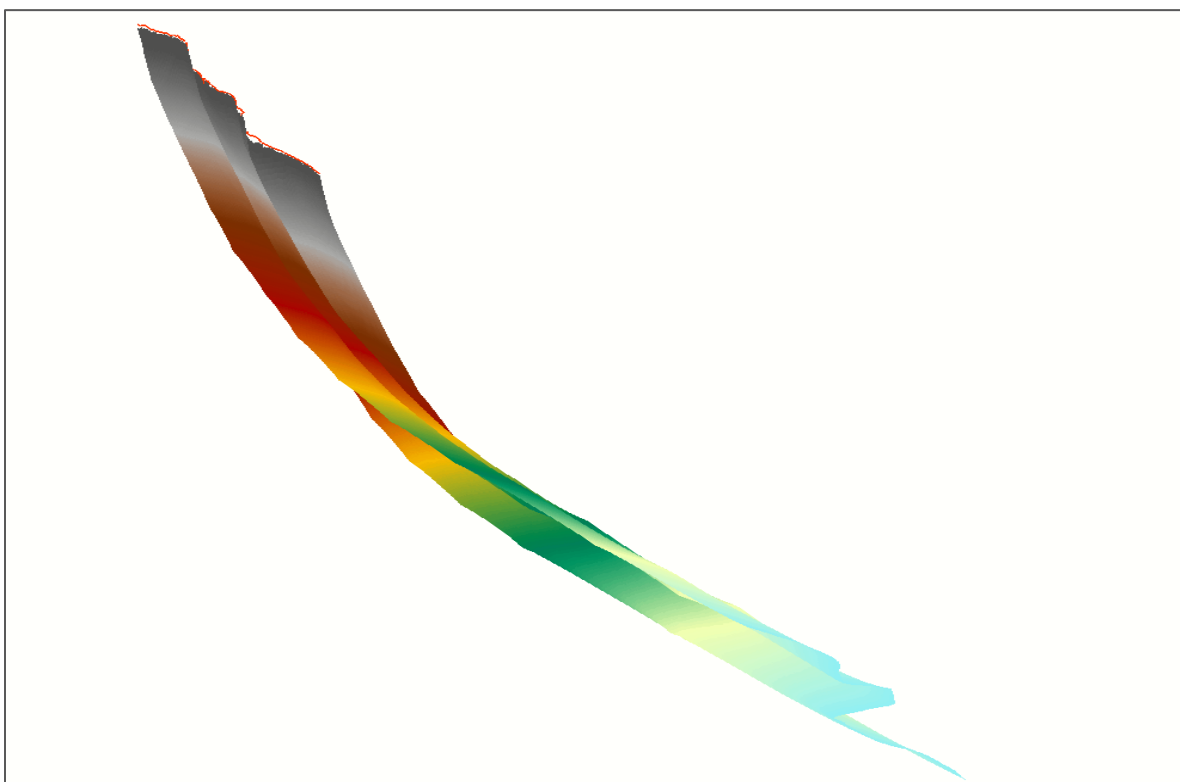
Εικ. 57. Επιφάνεια του ρήγματος μέσω Kriging (με γραμμική συνάρτηση ημι-μεταβλητότητας) σε 2D



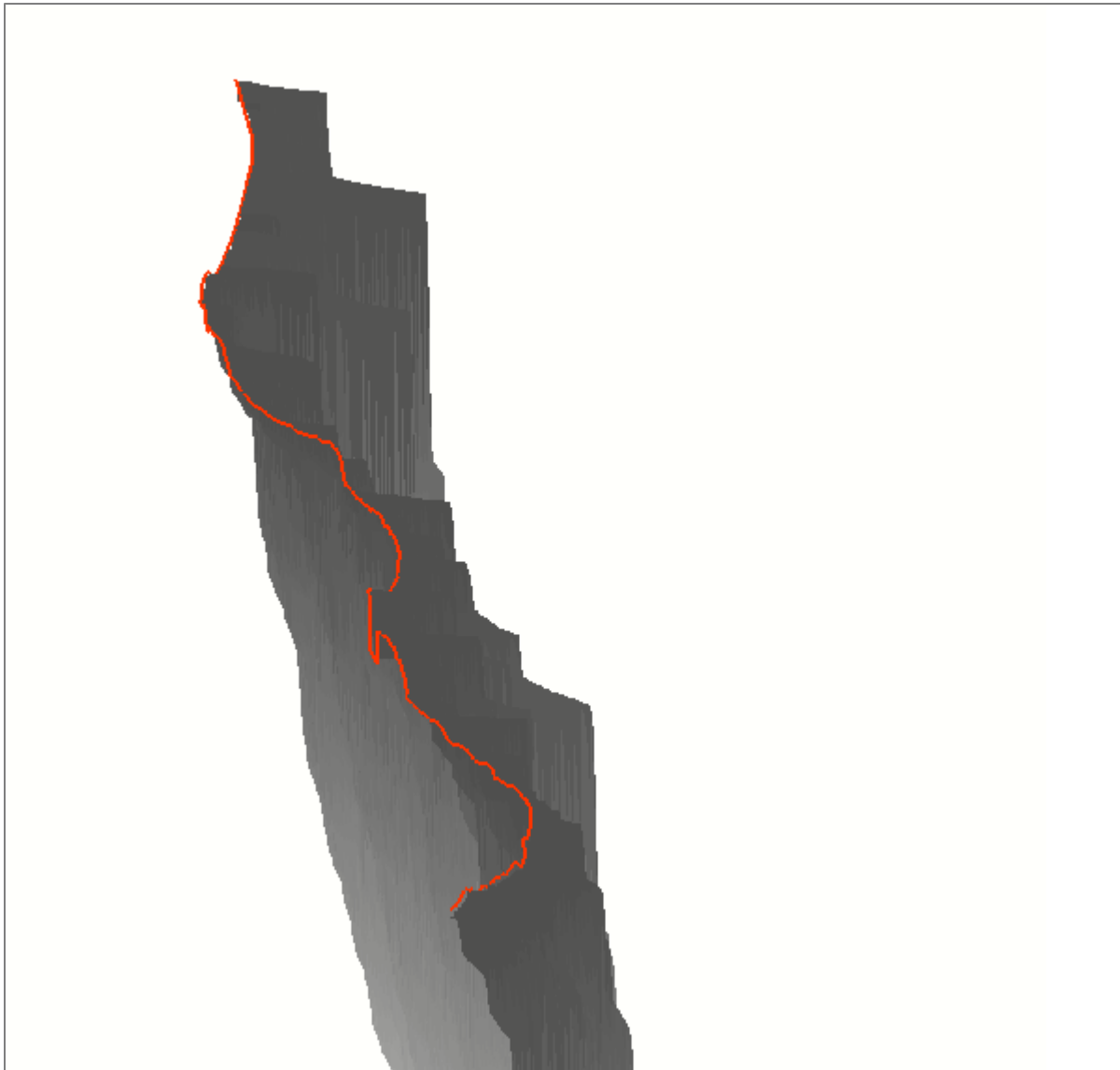
Εικ. 58. Επιφάνεια του ρήγματος μέσω *Topo to Raster* σε 3D



Εικ 59. Επιφάνεια του ρήγματος μέσω Kriging (με γραμμική συνάρτηση ημι-μεταβλητότητας) σε 3D



Εικ. 60. Επιφάνεια του ρήγματος μέσω Topo to Raster σε 3D



**Εικ. 61. Προβλήματα της επιφάνειας KRIGING 2 RASTER FAULT SURFACE κοντά στο ίχνος του ρήγματος.**

Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 61, η εξαχθείσα επιφάνεια έχει προβληματικά τμήματα κοντά στο ανάγλυφο σε σχέση με το ίχνος του ρήγματος αλλά και προχωρώντας σε βάθος (Εικόνα 59). Σε σύγκριση με την επιφάνεια που εξάγεται μέσω Topo To Raster (Εικόνα 60), δημιουργούνται ακανόνιστες μη ομαλές περιοχές οι οποίες είναι ορθότερο να ακολουθούν μια ομαλή γεωμετρία χωρίς εξάρσεις, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα που να συνηγορούν για αυτό.

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά πιο πάνω, η διαδικασία Topo to Raster είναι προσαρμοσμένη στο ανάγλυφο της επιφάνειας της Γης, δημιουργώντας πιο ομαλές επιφάνειες με συνέχεια. Παρουσιάζει ελεγχόμενες ή απότομες μεταβολές, μόνο εάν εισαχθούν κατάλληλα δεδομένα ακραίας ή μεγάλης μεταβολής της κλίσης όπως υδροκρίτες ή ποτάμια.

Κατά συνέπεια την κρίνουμε ως πιο κατάλληλη για τις ανάγκες της οπτικοποίησης της επιφάνειας του ρήγματος, καθώς δεν δημιουργεί επιμέρους επιφάνειες και εξάρσεις χωρίς γνωστά αίτια. Δίνει έμμεσα το βαθμό ασάφειας, έλλειψης δεδομένων και ακριβούς γνώσης της γεωμετρίας της, παρέχοντας μια αρκετά καλά προσεγγιστική μοντελοποίηση και απεικόνιση σε τρεις διαστάσεις.

## **4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθοδολογίας**

1. Για την μοντελοποίηση της επιφάνειας του ενεργού ρήγματος της Νέας Αγχιάλου, χρησιμοποιήθηκαν σημειακά δεδομένα εργασίας υπαίθρου για την κλίση και την διεύθυνσή της, όπως και το χαρτογραφημένο ίχνος, πάνω στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις [2].
2. Καθώς αυτά δεν επαρκούν για την προσέγγιση της γεωμετρίας του ρήγματος και ελλείπει δεδομένων από γεωφυσικές διασκοπήσεις ή γεωτρήσεις, έγινε αξιοποίηση ήδη επεξεργασμένων σεισμολογικών δεδομένων. Αυτά είναι χωρικά και αριθμητικά και προκύπτουν από υπόκεντρα σεισμών συνδεδεμένων με το ρήγμα και τους αντίστοιχους μηχανισμούς γένεσης. Αποτυπώνονται σε κατακόρυφη τομή της επιφάνειας του ρήγματος [1], η οποία θεωρούμε ότι ισχύει κατ' αναλογία κατά μήκος της και ελεγχόμενη κρίνεται ως μια αξιόπιστη προσέγγιση.
3. Οι συντεταγμένες των μηχανισμών γένεσης και η κλίση του επιπέδου που δίνουν για αυτές έρχονται σε συμφωνία με την εξαχθείσα γεωμετρία, όπως και με την κατακόρυφη τομή που αξιοποιήθηκε. Η μεγάλη διαφοροποίηση της κλίσης, εντάσσεται στην γενικότερη γεωμετρία των λιστρικών ρηγμάτων, τα οποία δημιουργούνται σε εφελκυστικά πεδία, όπως αυτό της ευρύτερης περιοχής μελέτης.
4. Τα δεδομένα των υπόκεντρων των αντίστοιχων σεισμικών γεγονότων, δεν είναι καθίστανται αξιοποιήσιμα από το παρόν πόνημα, καθώς αυτά έχουν μεγάλες χωρικές αποκλίσεις της τάξης των 3-4 km ανά ερευνητή, όπως και μεγάλα χωρικά σφάλματα, της ίδιας τάξης. Κατά συνέπεια κρίθηκε χρησιμότερη η χρήση της εξαχθείσας κατακόρυφης τομής από τον κλάδο της Σεισμολογίας [1], η οποία συμφωνεί με τη γεωλογική γνώση για τα λιστρικά ρήγματα, την εργασία υπαίθρου για τις επιφανειακές γωνίες κλίσης [2] και τα δεδομένα των μηχανισμών γένεσης.
5. Κατ' αυτόν τον τρόπο εισάγουμε την τρίτη διάσταση στο ζητούμενο, υπολογίζοντας την εξέλιξη της κλίσης κατά βάθος, για συγκεκριμένες διευθύνσεις άρα και την κατακόρυφη τομή της επιφάνειας κατά μήκος τους. Έτσι υπολογίζουμε σημεία γνωστών συντεταγμένων τα οποία ανήκουν και στην επιφάνεια του ρήγματος, με γνωστά δηλαδή υψόμετρα.
6. Κατ' αντιστοιχία από τον γενικό προσανατολισμό και την γεωμετρία του ίχνους του ρήγματος, το οποίο είναι η τομή της επιφάνειας με το ανάγλυφο, εξάγουμε βάσει των παραπάνω ισαριθμητικές καμπύλες ανά 1000 m βάθους. Βάσει αυτών και του ίχνους, εξάγουμε επιφάνειες μέσω παρεμβολών, ελέγχοντας την γενική τους γεωμετρία ως προς την ορθότητά και συγκρίνουμε. Αυτές συμφωνούν με τα δεδομένα μηχανισμών γένεσης, οι οποίοι δίνουν κλίση περίπου 40ο για βάθη από 10000 m και κάτω, ενώ η κλίση στο ίχνος είναι κατά μέσο όρο 80ο.
7. Οι τρεις επιφάνειες που εξήχθησαν, προέκυψαν: α) Από απλή διαδικασία με παρεμβολή *Kriging*. β) Από πύκνωση των ισαριθμητικών καμπύλων και διαδικασία σύνθετης παρεμβολής μέσω σύνθετης παρεμβολής *Topo to Raster*, που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή ΨΜΕ και γ) Από πύκνωση των ισαριθμητικών καμπύλων και διαδικασία με παρεμβολή *Kriging*.
8. Κατά τη σύγκριση η δεύτερη επιφάνεια βρέθηκε να καλύπτει περισσότερο τις ανάγκες της μοντελοποίησης και της ορθότερης οπτικοποίησης. Αυτό γιατί δεν παρουσίασε μεταβολές εξάρσεις για τις οποίες δεν υπάρχει γνωστό αίτιο, ενώ αποτέλεσε μια ορθότερη αφαιρετική προσέγγιση της γεωμετρίας σε συνθήκες βάθους, εκφράζοντας παράλληλα το βαθμό έλλειψης γνώσης.
9. Η τελική οπτικοποίηση έγινε με εξαγωγή TIN από τα παραπάνω δεδομένα και ύστερα από πύκνωση των ισαριθμητικών καμπύλων ανά 100 μέτρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίστηκαν προβλήματα στην οπτικοποίηση, προερχόμενα από τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των φατνίων των raster αρχείων, τα οποία ήταν εμφανή περισσότερο σε 3 διαστάσεις.

## 4.2 Προβλήματα και ζητήματα που αντιμετωπίστηκαν

Κατά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης του ίχνους του ρήγματος, των σημείων μέτρησης κλίσης, του υπολογισμού των ισαριθμητικών καμπύλων, όπως και των σημείων από τα οποία αυτές διέρχονται, αντιμετωπίστηκαν τα παρακάτω ζητήματα και οι αντίστοιχοι προβληματισμοί:

1. Η χαρτογράφηση του ίχνους του ρήγματος στην κλίμακα 1: 50000 του μορφοτεκτονικού χάρτη [2], είναι πολύ ακριβής για τα δεδομένα της εργασίας υπαίθρου, καθώς πραγματοποιείται σε τοπογραφικό υπόβαθρο της ΓΥΣ 1:5000, με συνένωση τμημάτων και τελική απόδοση. Ωστόσο εμπεριέχει χωρικό σφάλμα καθώς δεν είναι δυνατό να έχει την ακρίβεια μιας χαρτογράφησης με GPS για κάθε σημείο του ίχνους. Έτσι κατά την ψηφιοποίηση η χωρική ακρίβεια βελτιώθηκε με τη χρήση ορθοφωτογραφιών και ΨΜΕ, έτσι ώστε τα τμήματα του ίχνους που βρίσκονται εντός ορατών κατόπτρων ή εξάρσεων του αναγλύφου, να συμπίπτουν χωρικά.
2. Η διαδικασία αυτή όμως δεν είναι δυνατό να καλύψει το ίχνος στο σύνολό του, καθώς αυτό σε αρκετά τμήματα βρίσκεται «θαμμένο» κάτω από προσχώσεις ή αγρούς και στην γεωλογική έρευνα θεωρείται πιθανό. Επομένως κατά προσέγγιση θεωρούμε ότι διέρχεται από τις περιοχές που παρουσιάζουν μια διαφοροποίηση στο ανάγλυφο, ή στο ΨΜΕ. Παρ όλα αυτά η χωρική ακρίβεια του ίχνους δεν είναι η ίδια με αυτή που θα προέκυπτε από μια χαρτογράφηση με GPS, με πυκνά σημεία και χρήση δορυφορικών εικόνων όπου αυτές θα μπορούσαν να παρέχουν δεδομένα που δεν θα ήταν δυνατό να δώσει η εργασία υπαίθρου.
3. Κατά συνέπεια θεωρούμε ότι το γενικό σφάλμα του ψηφιοποιημένου ίχνους μπορεί να είναι 5 μέτρα, ενώ για τις περιοχές που δεν είναι ορατό ακόμα και 30 μέτρα. Το σφάλμα αυτό κρίνεται μικρό σε σχέση με το μήκος του ρήγματος το οποίο είναι 20 περίπου χιλιόμετρα και δεν θα επηρεάσει τις ανάγκες της μοντελοποίησης και της οπτικοποίησης.
4. Ένα ζήτημα που προέκυψε κατά την ανάλυση και επεξεργασία του ψηφιοποιημένου ίχνους είναι ότι στον αναλογικό χάρτη, δεν κυρτώνεται επαρκώς ή/και ορθά: Δηλαδή αντίθετα με την φορά της κλίσης στις ανυψώσεις των αυχένων του ανάγλυφου και σύμφωνα με την κλίση στα κοιλά, όπως οι κοίτες. Αποτέλεσμα αυτού είναι κατά τη διαδικασία αποτύπωσης, της προβολής δηλαδή στο οριζόντιο επίπεδο, να μην υπάρχουν οι κατά κλίση κυρτώσεις στα βυθίσματα του αναγλύφου καθώς αντιστοιχούν σε τμήματα της επιφάνειας του ρήγματος μικρότερου υψομέτρου. Ανάλογα δεν υπάρχουν και οι αντίθετα με την κλίση κυρτώσεις στους αυχένες, περιοχές δηλαδή της επιφάνειας του ρήγματος μεγαλύτερου υψομέτρου. Η απουσία αυτών των στοιχείων της γεωμετρίας, υφίσταται εξ' αιτίας της κλίμακας χαρτογράφησης αλλά και της δυσχέρειας στην αποτύπωση κατά την εργασία υπαίθρου, όταν δεν υπάρχει σημείο επισκόπησης μεγαλύτερου υψομέτρου. Η πλησιέστερη αποτύπωση του ίχνους του ρήγματος θα παράξει και την αντίστοιχη ισαριθμητική των 0 μέτρων, η οποία αποτελεί και την «μήτρα» για τις υπόλοιπες κατά βάθος.
5. Κατά την ανάλυση και τον υπολογισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος στο χώρο παρατηρείται ότι η κύρτωση της δημιουργεί επιμέρους τμήματα τα οποία συμβατικά θεωρούμε ότι είναι επίπεδα. Επάνω σε κάθε μία από τις 8 διευθύνσεις μετρούμενης γωνίας κλίσης, η κλίση μεταβάλλεται σύμφωνα με την κατακόρυφη τομή της Εικόνας 25. Υπολογίζεται ανά 1000 m και οι επιμέρους, διαδοχικές γωνίες κλίσης εξελίσσονται ανάλογα με την γωνία μέτρησης στην επιφάνεια. Κατά συνέπεια, η κατά μήκος του ρήγματος διαφοροποίηση της μεταβολής της κλίσης δημιουργεί κυρτώσεις στην επιφάνεια σε συνδυασμό με την επανάληψη της γενικής γεωμετρίας και προσανατολισμό του ίχνους ανά 1000 μέτρα. Τα επιμέρους τμήματα Sn, εκφράζουν την προβολή της μεταβολής της κλίσης προς μια διεύθυνση, στο οριζόντιο επίπεδο.
6. Εάν υφίστανται επιπλέον διαφοροποιήσεις του σχήματος κάθε επί μέρους τμήματος της από αίτιο που δεν έχουμε δεδομένα, ο υπολογισμός του συνόλου της γεωμετρίας γίνεται πιο περίπλοκος.

Έτσι ελλείπει τέτοιων δεδομένων αρκούμαστε στην μοντελοποίηση γενικευμένης μορφής, μοντελοποιώντας βάσει των παραπάνω συμβάσεων και οπτικοποιώντας τις πιο πιθανές μεταβολές, χωρίς να είμαστε εις θέση να αποκλείσουμε επιπλέον διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία. Η δημιουργία μιας ρηξιγενούς επιφάνειας στη φύση, πιθανώς να ακολουθεί κάποιο μαθηματικό μοντέλο, το οποίο εκ της λογικής να δημιουργεί την μορφή της.

7. Η γεωμετρία και θέση του ορίου μεταξύ δύο διαδοχικών τμημάτων της επιφάνειας του ρήγματος θα ήταν γνωστή μόνο αν γνωρίζαμε τις επί μέρους γωνίες κλίσης στις θέσεις που τέμνονται με το ανάγλυφο. Δηλαδή για κάθε αλλαγή της διεύθυνσης του ίχνους (strike) θα πρέπει να υπάρχει μια μέτρηση γωνίας, η οποία θα αντιστοιχεί στην κλίση του τμήματος της επιφάνειας του ρήγματος και μάλιστα για τα πρώτα 2 km το πολύ, ενώ η εξέλιξη της μεταβολής της είναι θεωρητική. Η επιφάνεια αυτή θα πρέπει να ακολουθεί το μοντέλο της κατακόρυφης τομής της Εικόνας 25 και ανάλογα με την μετρούμενη γωνία στην επιφάνεια.
8. Επιπλέον θα πρέπει να υπάρχουν δεδομένα σχετικά με το βαθμό ανισοτροπίας του μέσου, δηλαδή των πετρωμάτων που διαρρηγνύονται, μιας και αυτή καθορίζει τον τρόπο και την μεταβολή της διάχυσης των τάσεων, άρα και τη μεταβολή της γωνίας κλίσης. Τέλος θα πρέπει να θεωρείται πάντα πιθανή ή κατά τόπους ύπαρξη μικρότερων ρηγμάτων, τα οποία συναντώνται με την επιφάνεια, επηρεάζουν τη γεωμετρία της αλλά δεν είναι χαρτογραφημένα καθώς δεν φτάνουν ως το ανάγλυφο.
9. Κατά συνέπεια η μέθοδος είναι προσεγγιστική κατά την οποία γίνεται προσπάθεια χρήσης των κατάλληλων γεωμετρικών υπολογισμών και παρεμβολής για την προσομοίωση των τιμών της κλίσης και διεύθυνσής της για το σύνολο της επιφάνειας του ρήγματος.

### 4.3 Περαιτέρω επισημάνσεις, προβληματισμοί και μελλοντική διερεύνηση

Τα προηγούμενα ζητήματα που προέκυψαν και αντιμετωπίστηκαν γεννούν τους παρακάτω προβληματισμούς και επισημάνσεις

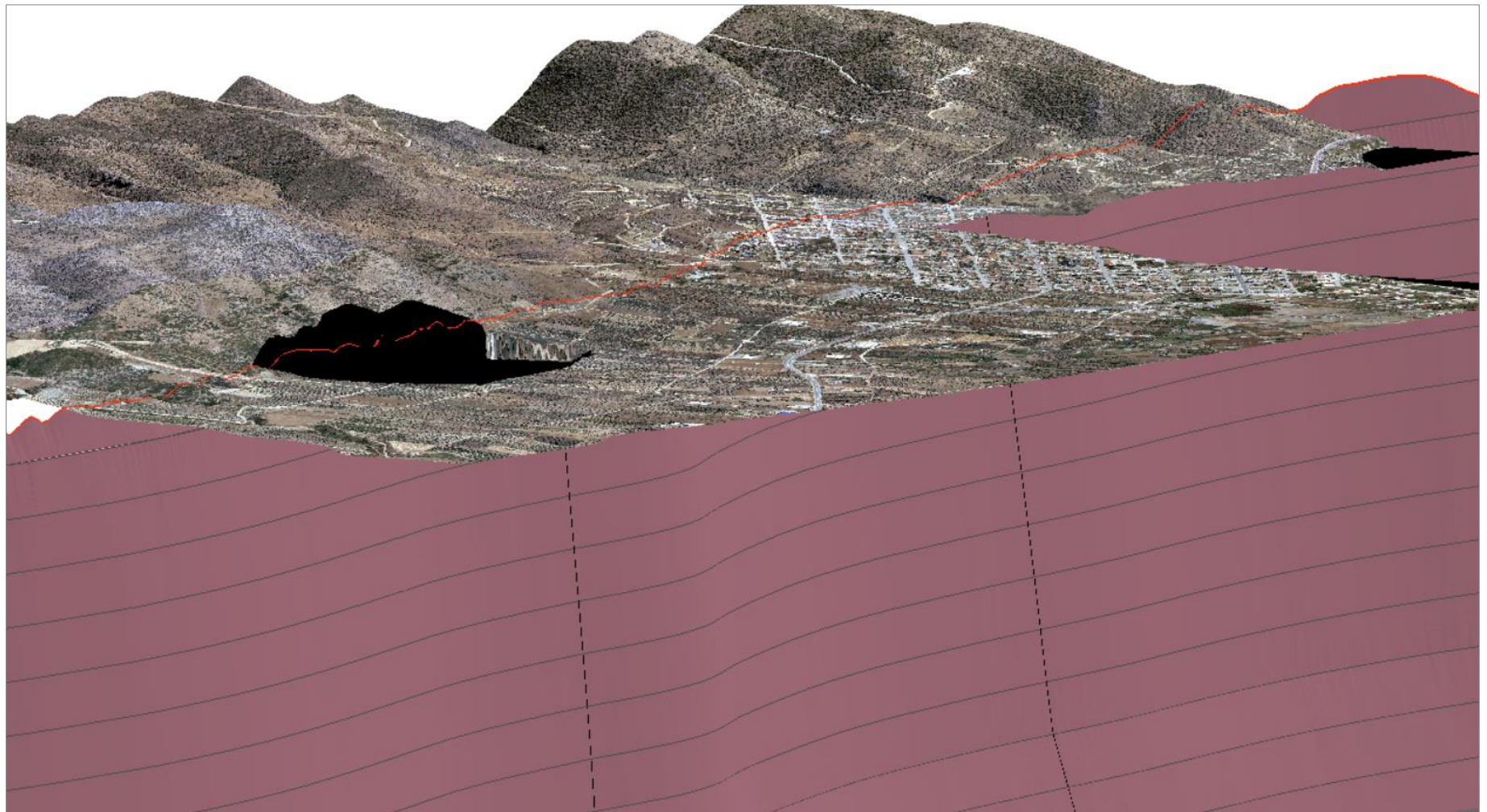
1. Ο βαθμός έλλειψης γνώσης της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος αυξάνεται με το βάθος για τους λόγους που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Επιπλέον τα σεισμικά δεδομένα δεν είναι αξιοποιήσιμα ως σημειακά που ανήκουν σε αυτή, καθώς έχουν μεγάλο τυπικό χωρικό σφάλμα. Ο υπολογισμός της μεταβολής της κλίσης της σε βάθος, γίνεται με βάση την κατακόρυφη τομή της Εικόνας 25 με αναλογικό υπολογισμό, σύμφωνα με τις γνωστές κλίσεις 80ο στην επιφάνεια και 40ο στα 10 km βάθους. Εάν τα σεισμικά δεδομένα είχαν μικρό σφάλμα, θα ήταν δυνατή η επιπλέον προσέγγιση του ρυθμού μεταβολής της κλίσης μέσω βελτίωσης της χωρικής ακρίβειας των ισαριθμητικών καμπύλων. Η εκτεταμένη και εξειδικευμένη στατιστική τους επεξεργασία, θα μπορούσε να συνεισφέρει στην εξαγωγή διαφορετικών επιφανειών για κάθε πηγή ανά ερευνητή. Ο μέσος όρος αυτών των επιφανειών θα μπορούσε επίσης να αποτελεί ένα χρήσιμο μεταδεδομένο, μεθοδολογίες που ξεφεύγουν από το παρόν πόνημα.
2. Από τις κυρτώσεις της εξέλιξης της προβολής των ισαριθμητικών καμπύλων στο οριζόντιο επίπεδο όπως π.χ. στην Εικόνα 51, θα ήταν πιθανό να αναμένουμε κι άλλες επιφάνειες που τέμνουν την κύρια. Ο συνδυασμός της μελέτης της γεωμετρίας τους, της γνώσης της γεωλογίας σε σύγκριση με το ανάγλυφο και την ροή των ποταμών, θα έδινε μια πιθανότητα ύπαρξης τους ή μη. Όπως και κάποιου πιθανού - μη τεκτονικού - αίτιου για αυτές τις γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις.
3. Ένα επιπλέον ερώτημα που προκύπτει είναι σε ποιο βαθμό υπάρχει αντιστοιχία στη μεταβολή της κλίσης των κατακόρυφων επιμέρους τμημάτων της επιφάνειας για ίδιες γωνίες αυτής, μετρούμενες στο ίχνος του ρήγματος, καθώς το κάθε ένα μπορεί να εξελίσσεται διαφορετικά. Κατ' επέκταση και σύμφωνα με τους προηγούμενους προβληματισμούς, πως σχετίζονται τελικά οι μετρήσεις της κλίσης στο ίχνος, με την πραγματική εικόνα της γεωμετρίας της επιφάνειας του ρήγματος σε βάθος.
4. Κατά συνέπεια γεννάται το ερώτημα: Η γεωμετρία του ίχνους του ρήγματος, ποιας επιφάνειας είναι τελικά η τομή με το ανάγλυφο, μιας και υπάρχουν πολλές που θα μπορούσαν να δίνουν το ίδιο ίχνος. Αν όντως η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης για κάθε επιμέρους τμήμα της επιφάνειας είναι σταθερή και μειούται με το βάθος, μπορεί να προβλεφθεί η συνολική επιφάνεια με μεγαλύτερη ακρίβεια με μοντέλο αφαιρετικής ή ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic), ως συνδυασμό κανόνων γεωλογίας, μηχανικών ιδιοτήτων και ανισοτροπίας των πετρωμάτων, και επιπλέον αναμενόμενων δομών;
5. Το τελευταίο και σημαντικό ερώτημα που τίθεται είναι το αν θα μπορούσε να προβλεφθεί η γεωμετρία της επιφάνειας με ένα σύνθετο μαθηματικό μοντέλο που να διαθέτει τοπολογικές σχέσεις και κανόνες. Αυτά θα πρέπει να περιλαμβάνουν περιορισμούς αλλά και ενδείξεις αποκλίσεων της υπάρχουσας μορφής συγκρινόμενης με γνωστά αποτελέσματα από γνωστά αίτια. Κατ' επέκταση, σε ποιο βαθμό θα ήταν χρήσιμο να είναι ένα τέτοιο μοντέλο προσανατολισμένο σε εξειδικευμένους κανόνες προς την κατεύθυνση της ανεύρεσης διαφοροποιήσεων, ή επιπλέον δομών. Όπως για παράδειγμα, όταν δεν συνάδει πλήρως μια εξαχθείσα επιφάνεια, με την χωρική κατανομή μιας σεισμικής ακολουθίας, μηχανισμών γένεσης ή τις διαφορικές επιταχύνσεις των διαρρηχθέντων πετρωμάτων. Η ύπαρξη δεδομένων βαρυτικών, σεισμικών, ηλεκτρικών διασκοπίσεων, όπως και δεδομένων γεωτρήσεων, είναι πολύ σημαντική για τις τρισδιάστατες μοντελοποιήσεις, χρησιμοποιούνται στις μεθοδολογίες κατά κόρον, κατ' επέκταση και στην παρούσα περίπτωση θα έδινε πιο ακριβές αποτέλεσμα.



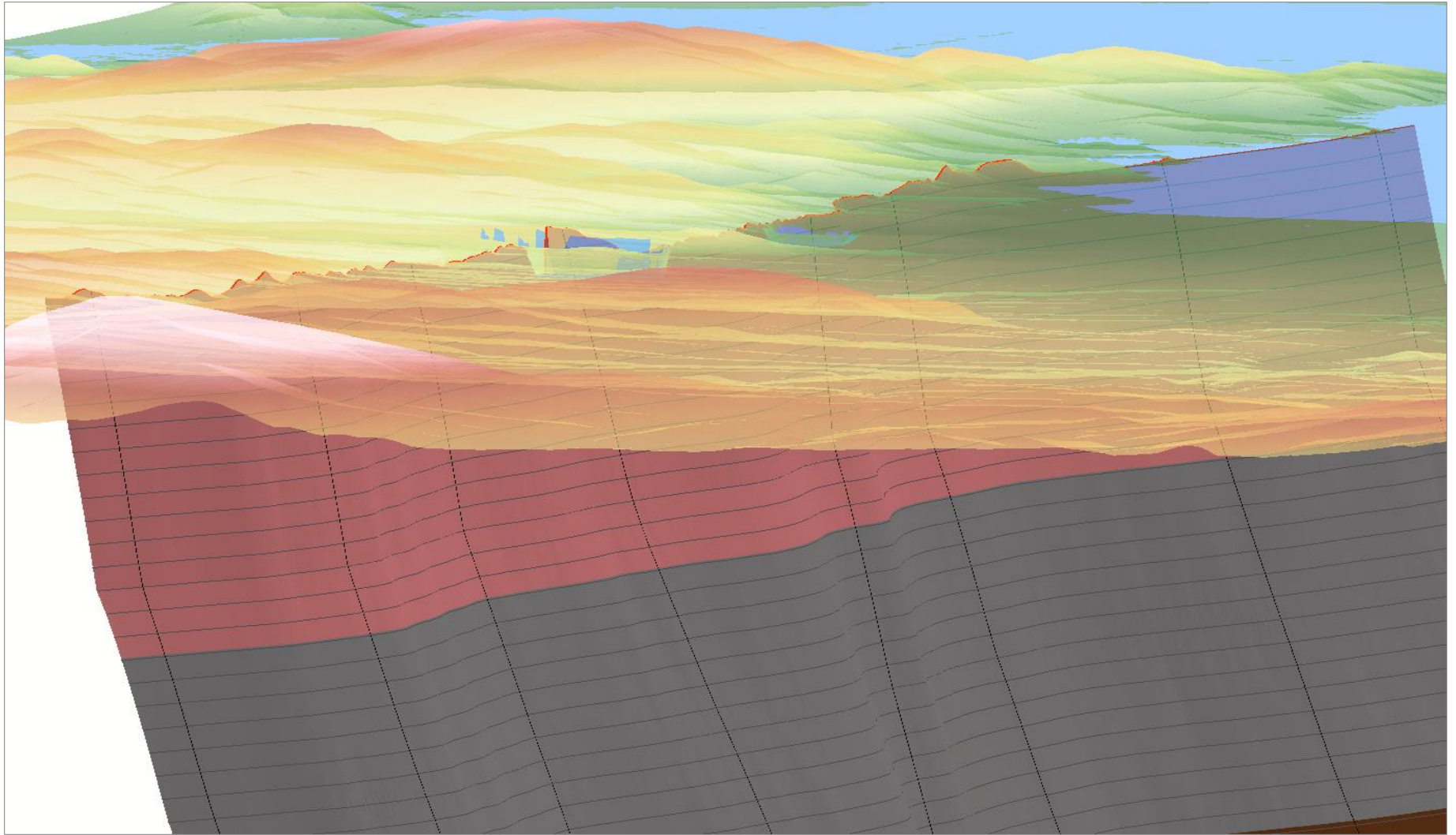
## **5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1.] Papazachos B. C., Panagiotopoulos D. G., Tsapanos T. M., Mountrakis D. M. and G. Ch. Dimopoulos, (1983): *A study of the 1980 summer seismic sequence in the Magnesia region of Central Greece*. Geophysical Laboratory, University of Thessaloniki, Greece Geological and Palaeontological Laboratory, University of Thessaloniki, Greece Received 1983 February 17; in original form 1982 November 24
- [2.] Γαλανάκης Δ. (1995): *Νεοτεκτονική δομή και στρωματογραφία των νεογενών-τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης Αλμυρού-Παγασητικού, Πηλίου, διαύλου Ωρέων-Τρικεριού και Μαλιακού*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας Φυσικής γεωγραφίας, Α.Π.Θ.
- [3.] Caputo R. (1995): *Inference of a seismic gap from geological data: Thessaly (Central Greece) as a case study: Thessaly (Central Greece) as a case study*. ANNALI DI GEOFISICA, VOL XXXVIII, N
- [4.] Papadimitriou E., Karakostas V. (2003): *Episodic occurrence of strong ( $M_w \geq 6.2$ ) earthquakes in Thessalia area (central Greece)*. Department of Geophysics, University of Thessaloniki, GR-54124 Thessaloniki, Greece, Received 6 December 2002; received in revised form 24 July 2003; accepted 4 August 2003, Earth and Planetary Science Letters 215 (2003) 395-409
- [5.] Νάκος Β. (2015): *Αναλυτική Χαρτογραφία*. ΕΜΠ 2015
- [6.] Δερμιτζάκης Μ., Λέκκας Σπ. (1986): *Διερευνώντας τη Γη – Εισαγωγή στη Γενική Γεωλογία*. Β' έκδοση - ΕΚΠΑ
- [7] Pavlis T. and Mason K. (2017): *The New World of 3D Geologic Mapping*. Department of Geological Sciences, The University of Texas at El Paso, El Paso, Texas 79968, USA – The Geology Society of America – 2017
- [8] Dongdong Pan, Zhenhao Xu, Xinming Lu, Longquan Zhou, Haiyan Li (2020): *3D scene and geological modeling using integrated multi-source spatial data: Methodology, challenges, and suggestions*. Tunneling and Underground Space Technology, June 2020
- [9] Thiele S., Jessell M., Lindsay M., Ogarko V., Wellmann F. J., Pakyuz-Charrier E. (2016): *The topology of geology 1: Topological analysis*. Journal of Structural Geology, October 2016
- [10] Κάβουρας Μ., Δάρρα Αθ., Κονταξάκη Σ., Τομαή Ε., Κόκλα Μ., Πανόπουλος Γ. Νάκος Β. (2016) *Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας*. ΕΜΠ
- [11] Thornton J., Mariethoz G., Brunner P., (2019): *A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research*. Sci Data. 2019 Dec
- [12] Aswar D. S., Ullagaddi P. B. (2017): *An Overview 3-D Geological Modelling Part I- Basics of 3-D Geological Modelling (IJLEMR)*, November 2017
- [13] Zhangang Wang, Honggang Qu, Zixing Wu, Hongjun Yang, Qunle Du (2016): *Formal representation of 3D structural geological models*. Computers & Geosciences May 2016
- [14] Calcagno P., Childs J.P., Courrioux G., Guillen A. (2008): *Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules*. Physics of the Earth and Planetary Interiors - December 2008
- [15] Τσούλος Λ., Σκοπελίτη Αν. Στάμου Λ. (2015): *Ψηφιακή Χαρτογραφία και Απόδοση*. ΕΜΠ
- [16] Παπανικολάου Δ. (1986): *Γεωλογία της Ελλάδας*. ΕΚΠΑ

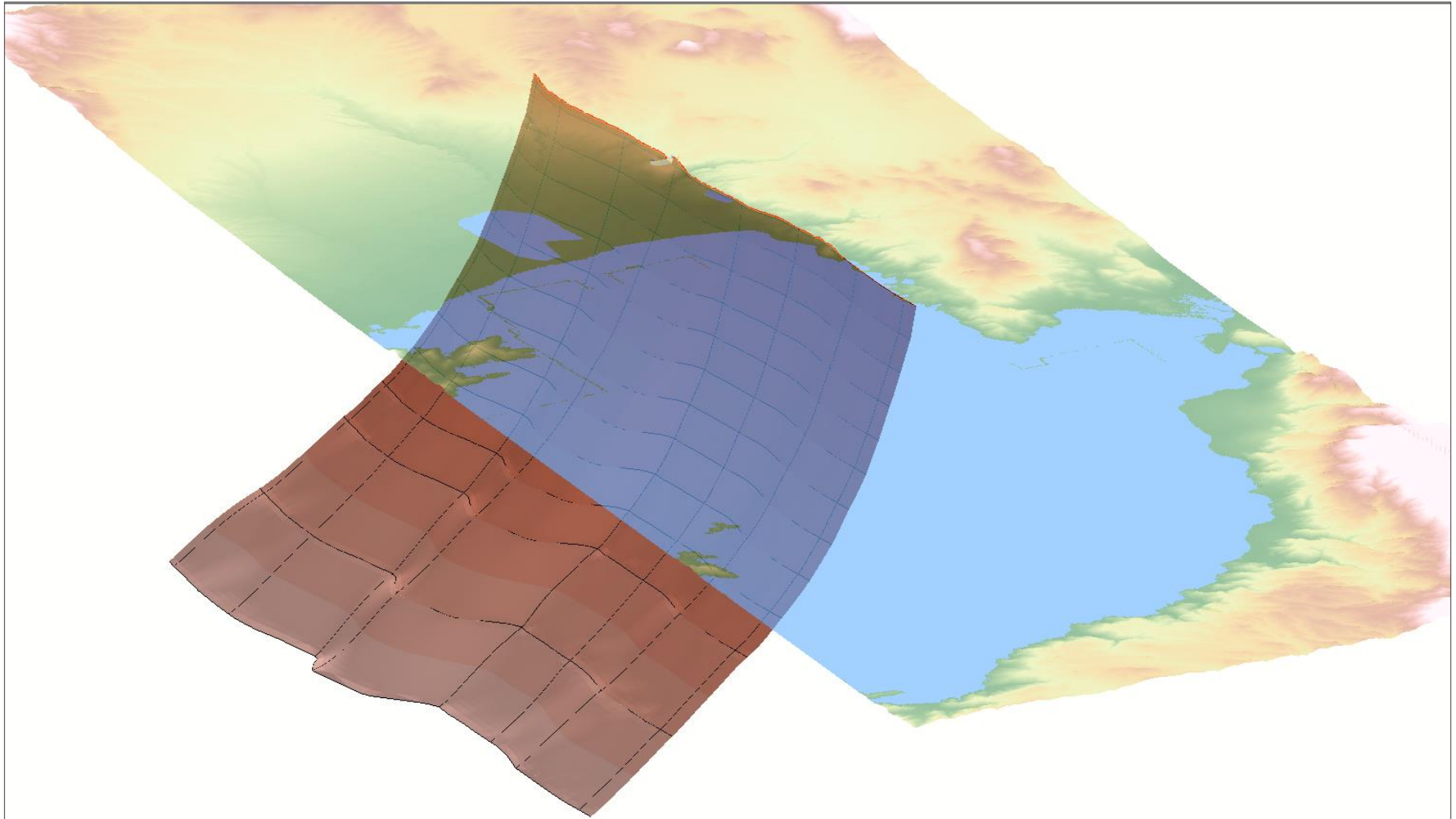
## 6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ



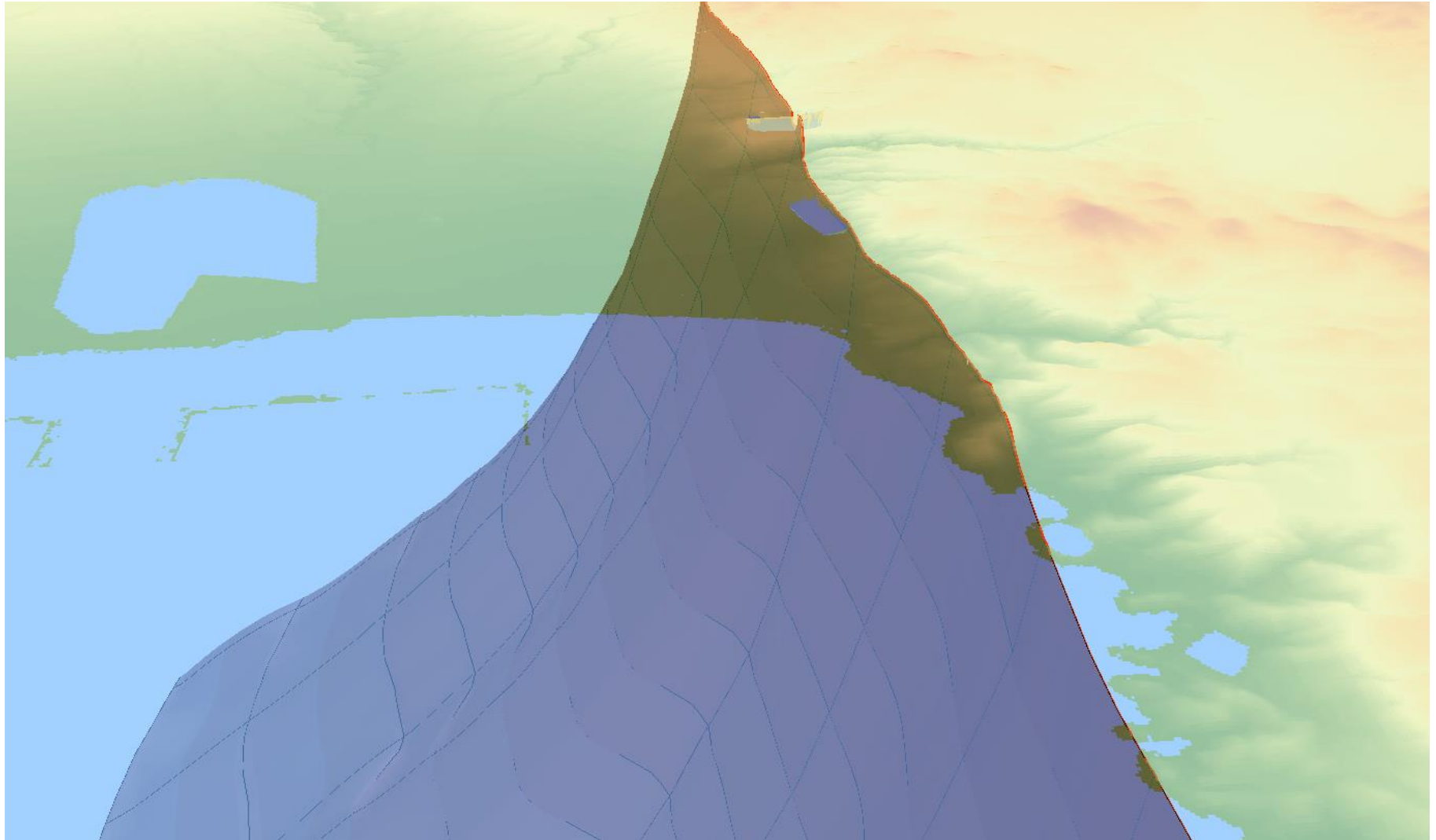
Άποψη της επιφάνειας του ρήγματος, οπτικοποιημένης με TIN, σε συνδυασμό με ορθοφωτοχάρτες, σε 3D. Το ίχνος του ρήγματος αναπαισάται με την κόκκινη γραμμή, ενώ οι ισαριθμητικές καμπύλες με τις γκρι.



Άποψη της επιφάνειας του ρήγματος, οπτικοποιημένης με TIN, σε συνδυασμό με DEM, σε 3D. Το ίχνος του ρήγματος αναπαριστάται με την κόκκινη γραμμή, ενώ οι ισαριθμητικές καμπύλες με τις γκρι.



Άποψη της επιφάνειας του ρήγματος, οπτικοποιημένης με TIN, σε συνδυασμό με DEM, σε 3D. Το πάχος του ρήγματος αναπαριστάται με την κόκκινη γραμμή, ενώ οι ισαριθμητικές καμπύλες με τις γκρι.



Άποψη της επιφάνειας του ρήγματος, οπτικοποιημένης με TIN, σε συνδυασμό με DEM, σε 3D. Το ίχνος του ρήγματος αναπαισιτάται με την κόκκινη γραμμή, ενώ οι ισαριθμητικές καμπύλες με τις γκρι.