



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ



ΜΑΡΙΑ ΓΡΥΛΙΩΝΑΚΗ

**ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ  
ΤΗΣ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ (ΗΠΑ)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2022





ΜΑΡΙΑ ΓΡΥΛΙΩΝΑΚΗ  
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5573

## ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ (ΗΠΑ)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Τεκτονικής και Στρωματογραφίας

### **Επιβλέπων**

Επίκουρος Καθηγητής, Χατζηπέτρος Αλέξανδρος

© Γρυλιωνάκη Μαρία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Τεκτονικής και Στρωματογραφίας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΓΕΩΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ  
(ΗΠΑ)

– *Διπλωματική Εργασία*

© Grylioniaki Maria, School of Geology AUTH, Dept. of Structural Geology and Stratigraphy, 2022

All rights reserved.

GEOTECTONIC EVOLUTION AND ACTIVE TECTONICS OF CALIFORNIA  
(USA)

– *Bachelor Thesis*



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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

**Εικόνα Εξωφύλλου:** Ο δόμος *Half Dome* στην κοιλάδα *Yosemite* (Εθνικό Πάρκο *Yosemite*).







## ❖ Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη.....                                                              | 8  |
| 1. Η λιθοσφαιρική πλάκα της Β. Αμερικής.....                               | 10 |
| 1.1 Τεκτονικά όρια πλάκας.....                                             | 10 |
| 1.2 Το ενεργό δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικής στην Περιειρηνική ζώνη..... | 12 |
| 1.3 Κινηματική πλάκας.....                                                 | 16 |
| 1.4 Δομή του εσωτερικού της Β. Αμερικάνικης πλάκας.....                    | 18 |
| 2 Το ενεργό γεωτεκτονικό περιβάλλον της Καλιφόρνια.....                    | 20 |
| 2.1 Η γεωτεκτονική εξέλιξη της Καλιφόρνια.....                             | 20 |
| 2.1.1 Προκάμβριο.....                                                      | 21 |
| 2.1.2 Παλαιοζωικός Αιώνας.....                                             | 22 |
| 2.1.3 Μεσοζωικός Αιώνας.....                                               | 24 |
| 2.1.4 Καινοζωικός Αιώνας.....                                              | 26 |
| 3. Η αρχαία ζώνη υποβύθισης της Farallon στην Καλιφόρνια.....              | 28 |
| 3.1 Η σφήνα επαύξησης - Παράκτιες οροσειρές,.....                          | 28 |
| 3.2 Εμπροσθοτόξια λεκάνη - Κεντρική κοιλάδα Καλιφόρνια.....                | 32 |
| 3.3 Το ηφαιστειακό τόξο - Η οροσειρά Sierra Nevada.....                    | 34 |
| 3.3.1 Η γεωλογία, ο σχηματισμός και η εξέλιξη της Sierra Nevada.....       | 34 |
| 3.3.2 Ο βαθόλιθος της Sierra Nevada.....                                   | 39 |
| 3.3.2.1 Ο βαθόλιθος στην κοιλάδα Yosemite.....                             | 42 |
| 3.3.3 Το τέμαχος Sierra Nevada – Great Valley (SNGV Block).....            | 45 |
| 3.4 Η οπισθοτόξια λεκάνη Basin & Range.....                                | 47 |
| 4. Το ρήγμα του Αγίου Αντρέα.....                                          | 50 |
| 4.1 Το σύστημα ρηγμάτων Αγίου Ανδρέα – Κόλπου Καλιφόρνια.....              | 51 |
| 4.1.1 Η τεκτονική εξέλιξη του συστήματος.....                              | 52 |
| 4.1.2 Η διάνοιξη του Κόλπου της Καλιφόρνια.....                            | 53 |
| 4.2 Η ρηξιγενής ζώνη του Αγίου Αντρέα.....                                 | 54 |
| 4.3 Τμηματοποίηση της ρηξιγενούς ζώνης του Αγίου Αντρέα.....               | 58 |
| 4.4 Γεωλογικά στοιχεία.....                                                | 62 |
| 4.5 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά κατά μήκος του ρήγματος.....             | 62 |
| 4.6 Μέτρηση μετατόπισης στο ρήγμα.....                                     | 67 |
| 4.7 Σεισμικότητα.....                                                      | 69 |
| 5. Χάρτες.....                                                             | 73 |
| Βιβλιογραφία.....                                                          | 77 |



## Περίληψη

Η εργασία έχει σκοπό την περιγραφή βασικών γεωλογικών δομών που συνθέτουν το ενεργό γεωτεκτονικό περιβάλλον της Καλιφόρνια. Η Καλιφόρνια, όπως και ολόκληρο το δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικής ανήκει στον Περιειρηνικό δακτύλιο και χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα και παραμόρφωση. Στον Μεσοζωικό αποτελούσε περιβάλλον υποβύθισης της ωκεάνιας πλάκας Farallon κάτω από την ηπειρωτική πλάκα της Β. Αμερικής, αποτέλεσμα της οποίας ήταν ο σχηματισμός του ηφαιστειακού τόξου της Sierra Nevada, των Παράκτιων οροσειρών, της εμπροσθοτόξιας λεκάνης της Κεντρικής Καλιφόρνια και της οπισθοτόξια λεκάνης στην επαρχία Basin & Range. Από το Ολιγόκαινο και μετά με την ολοκλήρωση της υποβύθισης της Farallon στην περιοχή της Καλιφόρνια και την επαφή του δυτικού περιθωρίου της με την πλάκα του Ειρηνικού, σχηματίζεται η ρηξιγενής ζώνη του Αγίου Αντρέα σε ένα νέο γεωτεκτονικό περιβάλλον μετασχηματισμού. Ταυτόχρονα λαμβάνει χώρα και η διάνοιξη του Κόλπου της Καλιφόρνια εξαιτίας των πλαγιοεφελκυστικών τάσεων. Μέχρι και σήμερα το ρήγμα του Αγίου Αντρέα θεωρείται ένα από τα πιο επικίνδυνα ρήγματα με τους επιστήμονες να προειδοποιούν ότι εισέρχεται σε περίοδο σεισμικής έξαρσης.

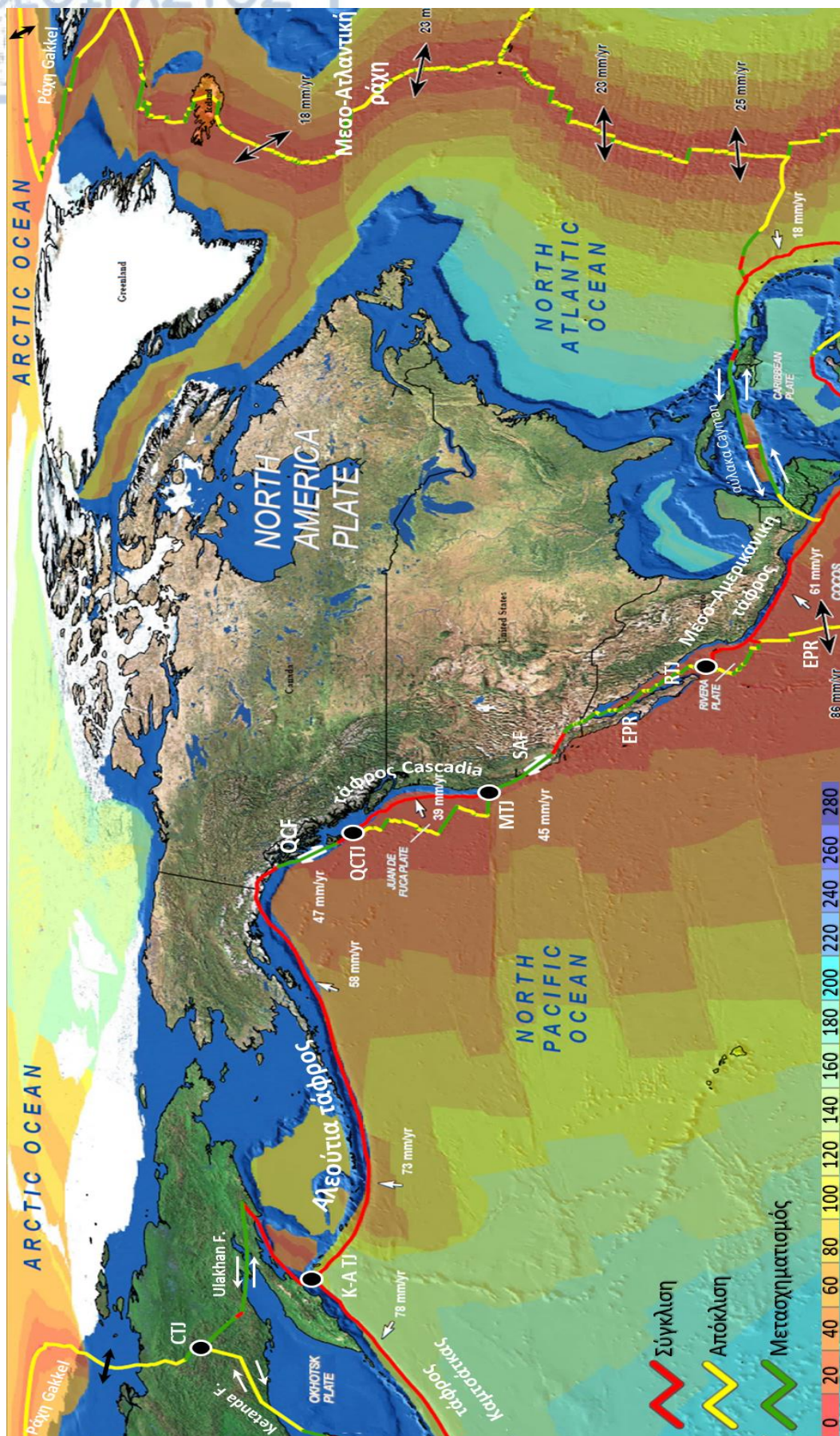
**Λέξεις κλειδιά :** Καλιφόρνια, δυτικό περιθώριο, πλάκα Β. Αμερικής, πλάκα Ειρηνικού, ζώνη υποβύθισης Farallon, ρήγμα Αγίου Αντρέα, Παράκτιες οροσειρές, Sierra Nevada, επαρχία Basin & Range

## Abstract

The purpose of this paper is to describe the basic geologic structures that form the active geotectonic environment of California. California, as well as the entire western margin of the North American plate, is part of Circum-Pacific belt and is characterized by intense seismicity and deformation. During Mesozoic period California was a subduction zone of the oceanic plate Farallon beneath the continental plate of North America, which resulted in the formation of the Sierra Nevada volcanic arc, the Coastal Ranges, the fore-arc basin of Central Valley of California and the back-arc basin of Basin & Range province. After Oligocene with the completion of Farallon's subduction in the California region and the contact of its western margin with the Pacific Plate, the San Andreas fault zone was formed in a new geotectonic environment of transformation. At the same time, the opening of Gulf of California is occurring due to transtensional stresses. To this day San Andreas fault is considered one of the most dangerous faults with scientists warning that is entering a period of intense seismic activity.

**Key words :** California, western margin, N. American Plate, Pacific Plate, Farallon Subduction Zone, San Andreas Fault, Coastal Ranges, Sierra Nevada, Basin & Range Province





Εικόνα 1. Γεωτεκτονικός χάρτης με τα όρια της Β. Αμερικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας και την ηλικία του ωκεάνιου φλοιού σε εκατομμύρια χρόνια. Οι ταχύτητες μετρώνται θεωρώντας την Αφρικανική πλάκα ως σημείο αναφοράς (τροποποιημένο από California Institute of Technology Tectonics Observatory).

## 1. Η λιθοσφαιρική πλάκα της Β. Αμερικής

Πριν την περαιτέρω ανάλυση του δυτικού περιθωρίου της πλάκας κρίνεται σκόπιμη η τοποθέτηση της στον παγκόσμιο τεκτονικό χάρτη και η σύντομη περιγραφή των ορίων που την απαρτίζουν, καθώς αποτελούν περιβάλλοντα επαφής με άλλες λιθοσφαιρικές πλάκες και έχουν ιδιαίτερα γεωδυναμικό ενδιαφέρον. Η λιθοσφαιρική πλάκα της Β. Αμερικής είναι η δεύτερη μεγαλύτερη σε έκταση πλάκα, μετά την πλάκα του Ειρηνικού, με έκταση  $\sim 75.900.000 \text{ km}^2$  και περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της Β. Αμερικής, την Γροιλανδία, τις Αλεούτιες νήσους, την Κούβα, τις Μπαχάμες, την δυτική πλευρά της Ισλανδίας, το ανατολικότερο τμήμα της Ρωσίας και τις Αζόρες. Αυτή αλληλεπιδρά με πολλές άλλες μεγαλύτερες και μικρότερες ηπειρωτικές και ωκεάνιες πλάκες και μεταξύ τους σχηματίζονται περιθώρια συγκλίνοντα, αποκλίνοντα, μετασχηματισμού και παθητικά. Έτσι διαμορφώνονται διαφορετικά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα κατά μήκος του ορίου της πλάκας το καθένα με τα δικά του χαρακτηριστικά και παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον από άποψη τεκτονικής.

### 1.1 Τεκτονικά όρια πλάκας

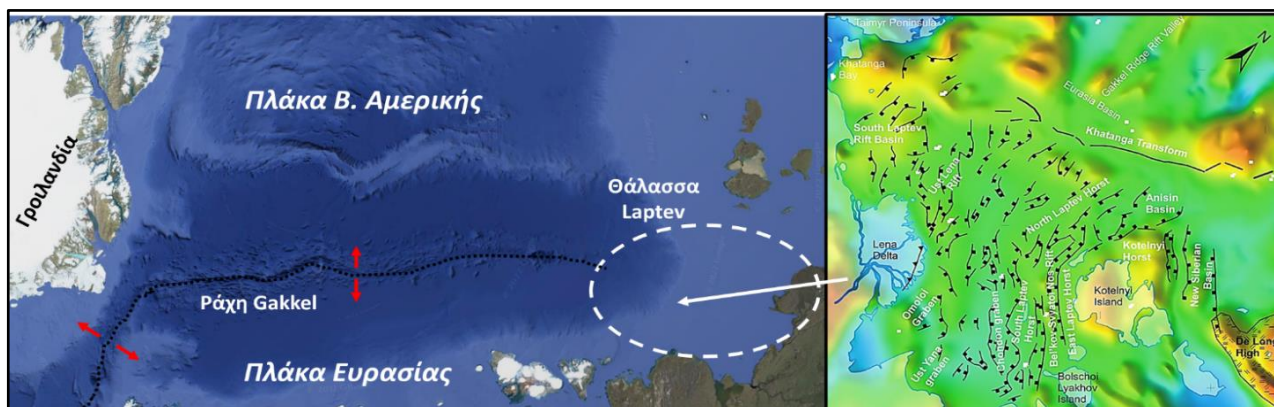
Μέσα στον γεωλογικό χρόνο τα περιθώρια πέριξ της πλάκας άλλαζαν διαρκώς λόγω της ενεργού τεκτονικής μέχρι να αποκτήσουν την σημερινή τους μορφή. Σήμερα το δυτικό περιθώριο της πλάκας είναι ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο κατά μήκος του οποίου συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικότητας και ηφαιστειότητας ολόκληρης της πλάκας. Αντίθετα το ανατολικό περιθώριο είναι παθητικού τύπου και απουσιάζει ή παρατηρείται ελάχιστη τεκτονική δραστηριότητα όπως συμβαίνει και στην ευρύτερη περιοχή της Καναδικής ασπίδας. Τα όρια της πλάκας περιγράφονται αριστερόστροφα σύμφωνα με τον χάρτη στην **Εικόνα 1**.

Το βορειότερο όριο της πλάκας οριοθετείται από την μεσοωκεάνια ράχη Gakkel, μια ράχη μήκους 1800 km στον Αρκτικό ωκεανό μεταξύ Σιβηρίας και Γροιλανδίας, που συνδέει την Μέσο-Ατλαντική ράχη με την διάρρηξη στην θάλασσα Laptev (*Laptev Sea Rift*) και απομακρύνει την Ευρασιατική από την Β. Αμερικάνικη πλάκα (**Εικόνα 1.1**). Ωστόσο διαφέρει από άλλες, τόσο ως προς τον ρυθμό επέκτασης του θαλάσσιου πυθμένα όσο και ως προς την εκδήλωση ηφαιστειότητας κατά μήκος της. Η ράχη Gakkel χαρακτηρίζεται από μια πολύ μικρή ταχύτητα διάνοιξης που κυμαίνεται από 6 mm/έτος πλησίον της διάρρηξης Laptev έως και 16,5 mm/έτος κοντά στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα της Γροιλανδίας και για αυτό χαρακτηρίζεται ως ultraslow (**Mazur S. et al., 2015**). Ο μικρός ρυθμός επέκτασης οφείλεται στο γεγονός ότι μαγματική δράση δεν παρατηρείται κατά μήκος ολόκληρου του άξονα της ράχης αλλά περιορίζεται σε ορισμένα τμήματα αυτού. Η σποραδικότητα των μαγματικών φαινομένων πιθανότατα να οφείλεται στις ανώμαλα χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν σε φλοιό και μανδύα, άποψη που ενισχύεται και από την καταγραφή σεισμών βάθους με μέγεθος  $M_w > 5,5$  στην ράχη (**Schlindwein V. et al., 2015**).

Από την θάλασσα Laptev συνεχίζει σε περιβάλλον ηπειρωτικής διάρρηξης στην ΒΑ Σιβηρία μέχρι την οροσειρά Chersky, όπου ο εφελκυσμός δίνει την θέση του σε πλάγια συμπίεση. Η οροσειρά αναδύθηκε από την σύγκρουση του ηπειρωτικού τεμάχους Kolyma-Omolon με τον Σιβηρικό κρατώνα και αποτελεί τριπλό κόμβο (CTJ). Από την σύγκρουση των τεμαχών και τις πολλαπλές επωθήσεις τεκτονικών καλυμμάτων κατά το Μ. Κρητιδικό (**Filatova N. I. & Khain V. E., 2008**) σχηματίστηκε το ρήγμα



Ulakhan, ένα αριστερόστροφο ρήγμα με ανάστροφη συνιστώσα που αποτελεί το σύγχρονο όριο μεταξύ Οχοτσικής και Β. Αμερικανικής πλάκας (**Mackey K. G. et al., 2007**). Το ρήγμα Ulakhan στα ανατολικά τερματίζει στον τριπλό κόμβο Καμτσάτσκας-Αλεούτιων νήσων (K-A TJ) και ενώνει την τάφρο της Καμτσάτσκας (ή Κουριλών νήσων) με την Αλεούτια τάφρο. Οι δύο τάφροι σχηματίστηκαν από την υποβύθιση της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την Οχοτσική και Β. Αμερικάνικη πλάκα αντίστοιχα.



**Εικόνα 1.1.** Η ανάπτυξη της μεσοωκεάνιας ράχης Gakkel στον Αρκτικό Ωκεανό (Google Earth). Εντός της στικτής περιοχής σε μεγέθυνση το σύστημα ωκεάνιας διάνοιξης Laptev Sea Rift με πολλαπλά κανονικά ρήγματα που σχηματίζουν τεκτονικά κέρατα και λεκάνες πλούσιες σε υδρογονάνθρακες (Mazur S. et al., 2015).

Το όριο της της Β. Αμερικάνικης λιθосφαιρικής πλάκας από την Αλεούτια τάφρο μέχρι και την Κ. Αμερική εντάσσεται στο Περιειρηνικό σύστημα και περιλαμβάνει ολόκληρο το βόρειο και ΒΔ τμήμα του. Εκεί συναντώνται τα σημαντικότερα περιβάλλοντα υποβύθισης αλλά και μετασχηματισμού. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το ενεργό δυτικό περιθώριο ακολουθούν στο υποκεφάλαιο 1.2.

Το ανατολικό όριο της πλάκας καθορίζεται ως επί το πλείστον από την μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού, που ήδη από το Ιουρασικό άρχισε να διανοίγει τον Ατλαντικό Ωκεανό και να απομακρύνει την Ευρασία. Ο κόλπος του Μεξικού, οι ανατολικές ακτές της Αμερικής αλλά και αυτές που βρέχονται από τον Αρκτικό ωκεανό είναι τεκτονικά ανενεργές περιοχές και αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα παθητικού περιθωρίου ή αλλιώς περιθώρια Ατλαντικού τύπου. Εκεί δεν λαμβάνει χώρα καμία σύγκρουση και υποβύθιση, ενώ η σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα απουσιάζουν. Η τεκτονική ηρεμία συμβάλει στον σχηματισμό τεράστιων παράκτιων πεδιάδων που διαρρέονται από μεγάλους ποταμούς, οι οποίοι μεταβαίνοντας από την μικρής κλίσης υφαλοκρηπίδα προς την απότομη ηπειρωτική κατωφέρεια αρχίζουν να διαβρώνουν και να σχηματίζουν υποθαλάσσια φαράγγια (*canyons*). Μέσα στα *canyons* δημιουργούνται τουρβιδιτικά ρεύματα που μεταφέρουν και αποθέτουν τεράστιους όγκους ιζημάτων σχηματίζοντας ριπίδια στην έξοδο τους προς την αβυσσική πεδιάδα.

Η μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού συνεχίζει βορειότερα και καταλήγει στον Αρκτικό ωκεανό όπου και ενώνεται με την ράχη Gakkel. Η ράχη του Ατλαντικού είναι μια ωκεάνια ζώνη διάνοιξης που έχει και επιφανειακή εμφάνιση. Στην Ισλανδία ο άξονας της ράχης ανυψώνεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (**Εικόνα 1.2**) και διακρίνεται εύκολα από τις μεγάλου μήκους και βάθους διαρρήξεις που διατρέχουν το νησί. Η έντονη ροή θερμότητας στην μεσοωκεάνια ράχη και η ύπαρξη θερμής κηλίδας (*hot spot*) είναι υπεύθυνη για την ύπαρξη πολλαπλών γεωθερμικών πεδίων και ηφαιστειών που εκχύνουν λάβες βασαλτικής σύστασης. Κάτω από το επίπεδο της θάλασσας διακρίνεται μια σειρά υποθαλάσσιων ηφαιστειακών βουνών και στον



πυθμένα της ράχης σχηματίζονται 'μαύρες καμινάδες' (*black smokers*) που από τους υδροθερμικούς πόρους αναδύουν ρευστά πλούσια σε μέταλλα.



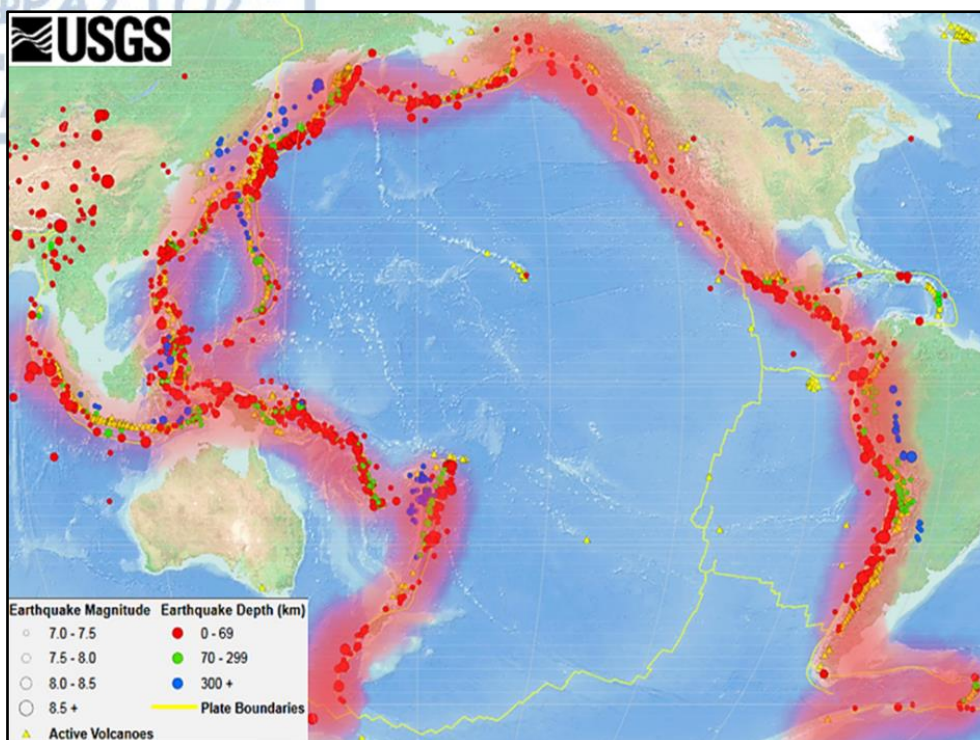
**Εικόνα 1.2.** Απλοποιημένος χάρτης της Μεσοατλαντικής ράχης που χωρίζει την Ισλανδία και την επεκτείνει σε διεύθυνση Α-Δ με ρυθμό 2,5 cm/έτος (USGS). Αεροφωτογραφία τμήματος της ρηξιγενούς ζώνης που αντιστοιχεί στο κόκκινο τετράγωνο του διπλανού χάρτη (Εθνικό πάρκο Þingvellir).

## 1.2 Το ενεργό δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικής στην Περιειρηνική ζώνη

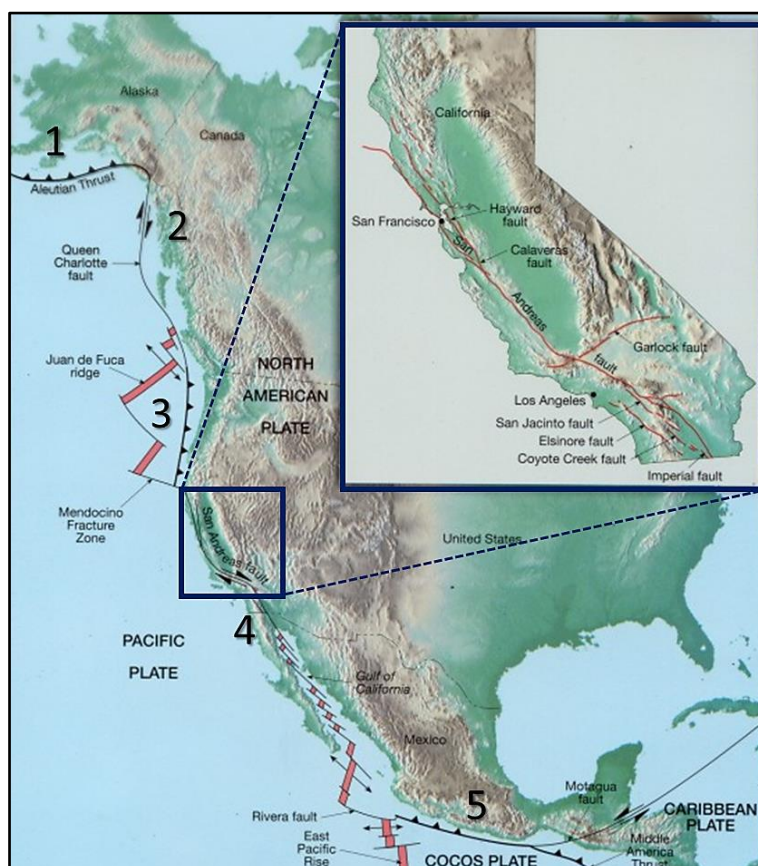
Ολόκληρη η δυτική πλευρά της Β. Αμερικανικής πλάκας αποτελεί ενεργό περιθώριο και εντάσσεται στην Περιειρηνική ζώνη. Η Περιειρηνική ζώνη (**Εικόνα 1.3**) μαζί με την Μελανησιακή-Ευρασιατική ζώνη συγκροτούν τις κυριότερες γεωγραφικές ζώνες ηπειρωτικού συστήματος διάρρηξης. Πέριξ του Ειρηνικού ωκεανού εντοπίζονται τα σπουδαιότερα ενεργά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα με όλες τις νέες ορογενέσεις, τις εστίες σεισμών βάθους και επιφανειακών, τα νησιωτικά και ηφαιστειακά τόξα και τα ανδεσιτικά-ασβεσταλκαλικά ηφαίστεια. Στον Περιειρηνικό δακτύλιο εντοπίζονται τρεις διαφορετικοί τύποι υποβύθισης :

- **Τύπος Κορδιλέρας** με υποβύθιση ωκεάνιου φλοιού κάτω από ηπειρωτικό, όπως συμβαίνει και στο δυτικό περιθώριο της Βόρειας και Νότιας Αμερικής.
- **Τύπος Ιαπωνίας** με υποβύθιση ωκεάνιου φλοιού κάτω από ωκεάνιο.
- **Τύπος Αλάσκας** με ταυτόχρονη υποβύθιση του ωκεάνιου φλοιού κάτω και από ωκεάνιο και ηπειρωτικό.

Το δυτικό περιθώριο δεν αποτελεί ένα ενιαίο γεωτεκτονικό περιβάλλον αλλά αποτελείται από επιμέρους τύπους περιβαλλόντων, στα οποία παρατηρούνται διαφορετικά είδη τεκτονικών δομών και παραμορφώσεων. Εκτός από τις εφίπνευτικές κινήσεις της Β. Αμερικανικής πλάκας πάνω σε άλλες ωκεάνιες, υπάρχουν και τμήματα της που κινούνται παράλληλα με την πλάκα του Ειρηνικού πάνω σε μεγάλα ρήγματα μετασχηματισμού όπως το Queen Charlotte (QCF) στον Καναδά-Αλάσκα και του Αγίου Αντρέα (SAF) στην Καλιφόρνια, που συνδέουν μεταξύ τους τις τάφρους των αναλικομένων περιθωρίων. Η περιγραφή των γεωτεκτονικών περιβαλλόντων γίνεται με βάση την **Εικόνα 1.4**.



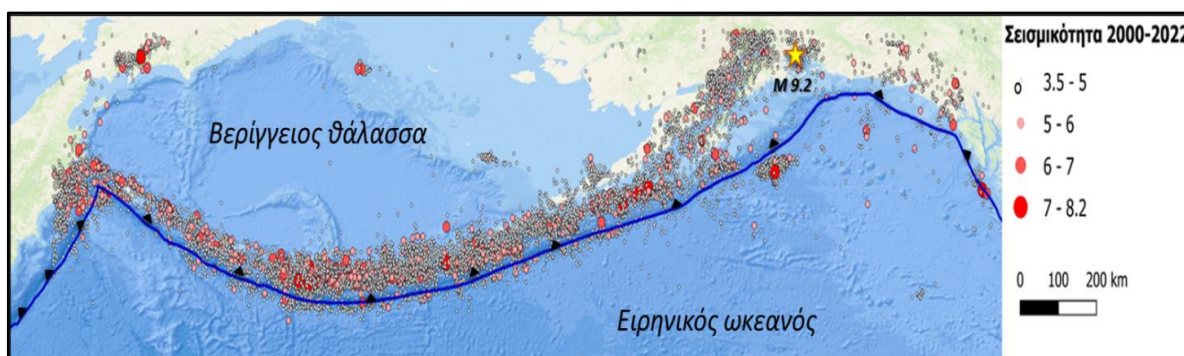
Εικόνα 1.3. Ο Περιεργητικός δακτύλιος με τα ενεργά ηφαίστεια και τις εστίες σεισμών  $M_w = 7+$  για τα έτη 1900-2013 (USGS).



Εικόνα 1.4. Το ενεργό δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικανικής πλάκας. Σε μεγέθυνση το σύστημα ρηγμάτων του Αγίου Αντρέα με τα σημαντικότερα ρήγματα αυτού (τροποποιημένο από Edward J. Tarbuck & Frederick K. Lutgens © Prentice-Hall).



1. Βόρεια του Περιειρηνικού δακτυλίου, η υποβύθιση της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την Β. Αμερική γίνεται με μεγάλες κλίσεις ( $\sim 45^\circ$ ) κατά μήκος της νότιας ακτογραμμής της Αλάσκας στις Αλεούτιες νήσους (**Εικόνα 1.5**). Δυτικά της ζώνης υποβύθισης λαμβάνει χώρα υποβύθιση ωκεάνιου φλοιού κάτω από ωκεάνιο και προοδευτικά προς τα ανατολικά ο ωκεάνιος φλοιός βυθίζεται κάτω από τον ηπειρωτικό. Ο ρυθμός σύγκλισης των πλακών είναι  $57 \pm 6$  mm/έτος (**Savage J. C. et al., 1999**). Στο όριο των πλακών σχηματίζεται το Αλεούτιο νησιωτικό τόξο, στο κυρτό μέρος του οποίου σχηματίζεται η Αλεούτια τάφρος, μήκους 3.400 km με σημαντικά βάθη. Εσωτερικά αναπτύσσεται το ηφαιστειακό τόξο με μια σειρά ανδεδιτικών ηφαιστειών και στο κοίλο μέρος του τόξου βρίσκεται η περιθωριακή θάλασσα του Βερίγγειου με σχετικά μικρά βάθη. Κατά μήκος του τόξου η ηφαιστειότητα και σεισμικότητα είναι ισχυρή με τα μεγέθη των σεισμών να ξεπερνούν συχνά τα  $M_w=8$  με συνοδά θαλάσσια βαρυτικά κύματα (*tsunami*). Τέτοιοι σεισμοί ανήκουν στην κατηγορία των μεγαεπιπνευτικών σεισμών (*megathrust earthquakes*) που γίνονται πάνω σε ανάστροφα ρήγματα της συμπίεστικής ζώνης στην τάφρο π.χ. ο σεισμός του 1964 στην Αλάσκα με μέγεθος  $M_w=9,2$ . Η Αλεούτια τάφρος αναπτύσσεται σε διεύθυνση Α-Δ, όμως στον κόλπο της Αλάσκας η παράταξη αλλάζει απότομα προς τα ΝΑ και τερματίζει στο ρήγμα Queen Charlotte (QCF).



**Εικόνα 1.5.** Κατανομή σεισμικών εστιών κατά μήκος του Αλεούτιου τόξου για τα έτη 2000-2022. Στο χάρτη σημειώνεται και το επίκεντρο του μεγάλου σεισμού του 1964 (QGIS).

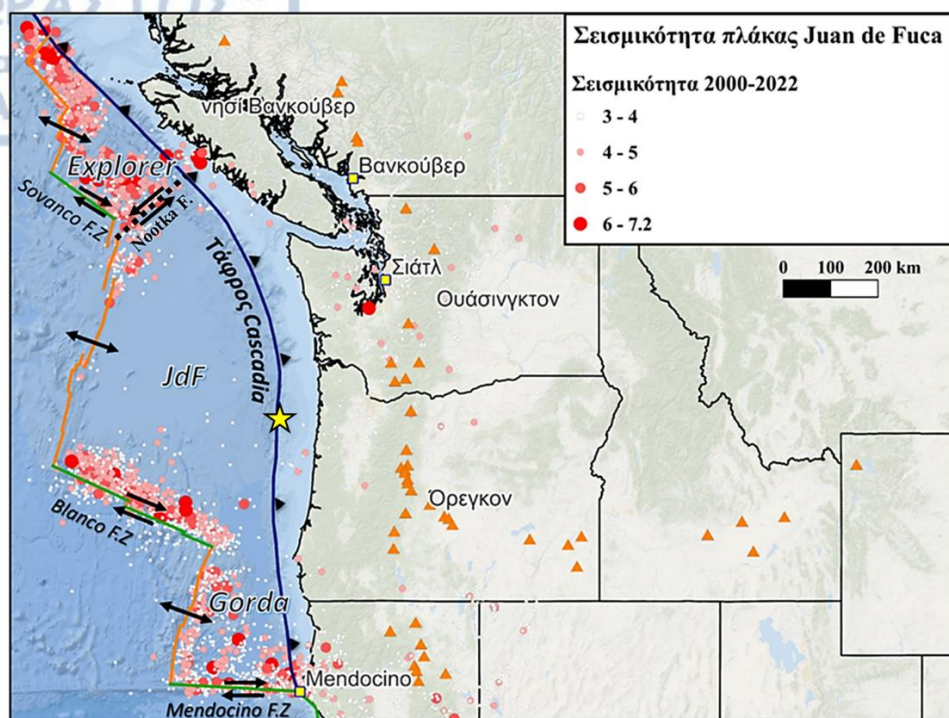
2. Το δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού Queen Charlotte διατρέχει τις ακτές του Καναδά και της Αλάσκας, συνδέοντας την τάφρο των Αλεούτιων νήσων με αυτή της Cascadia και τερματίζει στον τριπλό κόμβο Queen Charlotte (QCTJ) μεταξύ του Ειρηνικού, της Β. Αμερικής και της μικροπλάκας Explorer. Ο ρυθμός ολίσθησης μεταξύ των πλακών εκατέρωθεν του ρήγματος είναι 4,8-5 cm/έτος (**Hayward T. W. & Bostock M. G., 2017**). Το ρήγμα είναι παρόμοιο με αυτό του Αγίου Αντρέα με μόνη διαφορά ότι σχεδόν σε όλο το μήκος του βρίσκεται υποθαλάσσια. Η σεισμικότητα του ρήγματος είναι έντονη και από το 1900 μέχρι σήμερα έχουν συμβεί πέντε σεισμοί με μεγέθη  $M_w=7+$ .
3. Η τάφρος Cascadia ξεκινάει από τον τριπλό κόμβο Queen Charlotte βόρεια του νησιού Vancouver στον Καναδά και τερματίζει στον τριπλό κόμβο Mendocino (MTJ). Ο σχηματισμός της τάφρου και του ηφαιστειακού τόξου Cascade ήταν αποτέλεσμα υποβύθισης της ωκεάνιας πλάκας Juan de Fuca (JdF) κάτω από την Β. Αμερική με κατεύθυνση ΒΑ και ρυθμό 4 cm/έτος (**Suyehiro K. & Mochizuki K., 2002**). Η τάφρος βρίσκεται σε απόσταση μόλις 160 km από τις ΒΔ ακτές χωρίς να έχει μεγάλο βάθος, εξαιτίας της πλάγιας υποβύθισης της Juan de Fuca με μικρή

γωνία κλίσης  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$  (**DiPietro Joseph A., 2018**). Η Juan de Fuca δεν είναι μια ενιαία ωκεάνια πλάκα αλλά αποτελείται από τρία τμήματα που το καθένα χαρακτηρίζεται από διαφορετικό ρυθμό σύγκλισης με την Β. Αμερική. Ο ωκεάνιος φλοιός τους επεκτείνεται από τρεις διακριτές ράχες εξάπλωσης (*ομώνυμες των πλακών*) με παράταξη ΒΑ, που συνδέονται με ρήγματα μετασχηματισμού. Το κεντρικό τμήμα της πλάκας θεωρείται η Juan de Fuca, το νότιο τμήμα της είναι η μικροπλάκα Gorda και το βόρειο τμήμα είναι η μικροπλάκα Explorer στο ΒΑ τμήμα της οποίας δεν λαμβάνει χώρα υποβύθιση και η ζώνη καταβύθισης είναι κλειδωμένη. Όσον αφορά την μικροπλάκα Explorer υπάρχουν διαφωνίες σχετικά με τον εάν αποτελεί ανεξάρτητη πλάκα, τμήμα της Juan de Fuca ή μια διατμητική ζώνη παραμόρφωσης μεταξύ των πλακών Β. Αμερικής και Ειρηνικού και για αυτό από ορισμένους επιστήμονες αναφέρεται ως 'ψευδοπλάκα' (**Kreemer C. et al., 1998**). Η πλάκα Juan de Fuca είναι πολύ νεαρής ηλικίας ( $< 10\text{ Ma}$ ) και η λιθόσφαιρα της είναι ακόμα λεπτή και θερμή για αυτό ενδοπλακικά η σεισμικότητα είναι ασθενής (**Εικόνα 1.6**). Στην ζώνη υποβύθισης οι σεισμοί megathrust είναι πολύ ισχυροί αλλά σπάνιοι με το τελευταίο σεισμό μεγέθους  $M_w$  8,7-9,2 να συμβαίνει το 1700. Οι επιστήμονες προβλέπουν ότι η πιθανότητα να σημειωθεί σεισμός μεγέθους 7,1+ σε αυτή τη ζώνη μέσα στα επόμενα 50 χρόνια είναι 37%.

4. Από τον τριπλό κόμβο Mendocino μέχρι τον τριπλό κόμβο Rivera (RTJ) λαμβάνει χώρα η παράλληλη κίνηση των πλακών Ειρηνικού - Β. Αμερικής στο δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού του Αγίου Αντρέα (SAF) και η ταυτόχρονη πλάγια διάνοιξη του κόλπου της Καλιφόρνια. Το σύστημα ρηγμάτων του Αγίου Αντρέα και του κόλπου της Καλιφόρνια αναλύεται εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.
5. Το όριο μεταξύ Β. Αμερικής και Ειρηνικού τερματίζει στον τριπλό κόμβο Rivera δυτικά των ακτών του Μεξικού ως αποκλίνον περιθώριο με την ράχη του Ανατολικού Ειρηνικού (*East Pacific Rise - EPR*). Νότια του τριπλού κόμβου, στο νότιο Μεξικό και στην Κεντρική Αμερική, η πλάκα της Β. Αμερικής έρχεται σε επαφή με τις ωκεάνιες πλάκες Rivera<sup>1</sup>-Cocos στα δυτικά και της Καραϊβικής στα ανατολικά. Η πλάκα Cocos αναλίσκεται στην Μέσο-Αμερικανική τάφρο (*Middle American Trench*) με ρυθμό 5 cm/έτος κάτω από την Β. Αμερική σχηματίζοντας την Υπερμεξικανική ηφαιστειακή ζώνη (*Trans-Mexican Volcanic Belt - TMVB*), ενώ κάτω από την πλάκα της Καραϊβικής αυξάνει σε 9 cm/έτος (**Manea, V. C. et al., 2013**) και σχηματίζει το ηφαιστειακό τόξο της Κεντρικής Αμερικής (*Central America Volcanic Arc - CAVA*). Το όριο μεταξύ της Καραϊβικής πλάκας και της Β. Αμερικανικής αντιπροσωπεύεται από την αύλακα-τάφρο Cayman, μια λεκάνη διάνοιξης (*pull apart basin*) που σχηματίστηκε από την δράση ενός σύνθετου συστήματος αριστερόστροφων ρηγμάτων μετασχηματισμού (**Εικόνα 1.7**). Στην ευρύτερη περιοχή της Κεντρικής Αμερικής η σεισμικότητα και ηφαιστειότητα είναι ακανόνιστα κατανεμημένη και παρατηρούνται εξαιρετικά μεγάλα γεγονότα βραδείας ολίσθησης.

<sup>1</sup> Η μικροπλάκα Rivera θεωρείται από πολλούς το βόρειο τμήμα της πλάκα Cocos, αν και διαχωρίστηκε από αυτή με ένα ασαφές όριο μετασχηματισμού πριν 10-5 Ma.





Εικόνα 1.6. Γεωτεκτονικός χάρτης της πλάκας Juan de Fuca. Οι εστίες των σεισμών επικεντρώνονται κατά μήκος των ρημάτων μετασχηματισμού που ενώνουν τα τμήματα της ράχης. Στον χάρτη σημειώνεται το επίκεντρο του σεισμού του 1700 (QGIS).



Εικόνα 1.7. Γεωτεκτονικός χάρτης του νότιου τμήματος της Β. Αμερικάνικης πλάκας στην Κεντρική Αμερική. Στον χάρτη απεικονίζονται βασικές τεκτονικές ζώνες και τα ηφαιστειακά τόξα της ευρύτερης περιοχής (QGIS).

Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση κυρίως στο τεκτονικό περιβάλλον της Καλιφόρνια με αναφορές στην επαρχία Basin & Range, που αναπτύσσεται στα ανατολικά της και χαρακτηρίζεται και από σημαντικό εφελκυσμό και ταφροποίηση, όπως συμβαίνει και στον Κόλπο της Καλιφόρνια.

### 1.3 Κινηματική πλάκας

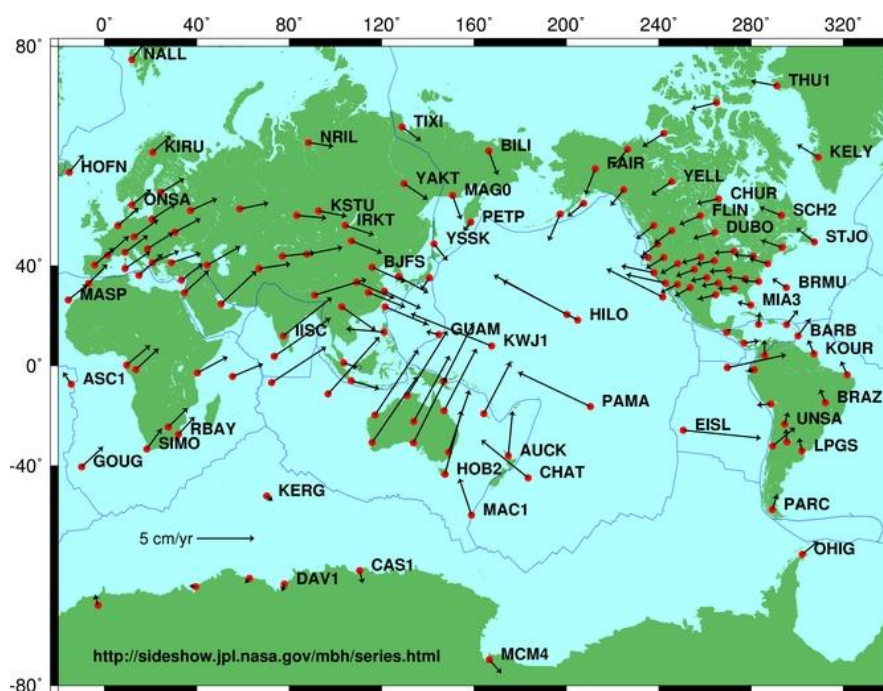
Η Β. Αμερικάνικη πλάκα αλληλεπιδρά με πολλές άλλες πλάκες με αποτέλεσμα η συνολική της κίνηση να επηρεάζεται ως ένα βαθμό από αυτές αλλά κυρίως από τα

ρεύματα μεταφοράς που αναπτύσσονται στον μανδύα, σύμφωνα με την θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών.

Οι πλάκες της Βόρειας και Νότιας Αμερικής συγκλίνουν αργά γύρω από έναν πόλο που βρίσκεται ανατολικά των Αντίλλων νήσων, ενώ ο πόλος κίνησης της Ευρασίας σε σχέση με τη Βόρεια Αμερική βρίσκεται κοντά στο νησί Sakhalin βόρεια της Ιαπωνίας (**Chase C. G., 1978**). Στην Μεσοατλαντική ράχη η πλάκα ωθείται προς τα δυτικά με ρυθμό περίπου 2,5 cm/έτος. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες δεν κινούνται με την ίδια ταχύτητα και κατεύθυνση σε όλη την έκτασή τους. Κάποιες ακολουθούν περιστροφική κίνηση π.χ. η Β. Αμερική που περιστρέφεται αριστερόστροφα, ενώ άλλες εκτελούν πιο ευθύγραμμες κινήσεις π.χ. η πλάκα του Ειρηνικού που κινείται προς τα ΒΔ με ταχύτητα 7-11 cm/έτος (**Εικόνα 1.8**). Ως επί το πλείστον, η λιθοσφαιρική πλάκα της Β. Αμερικής κινείται προς τα Δ-ΝΔ.

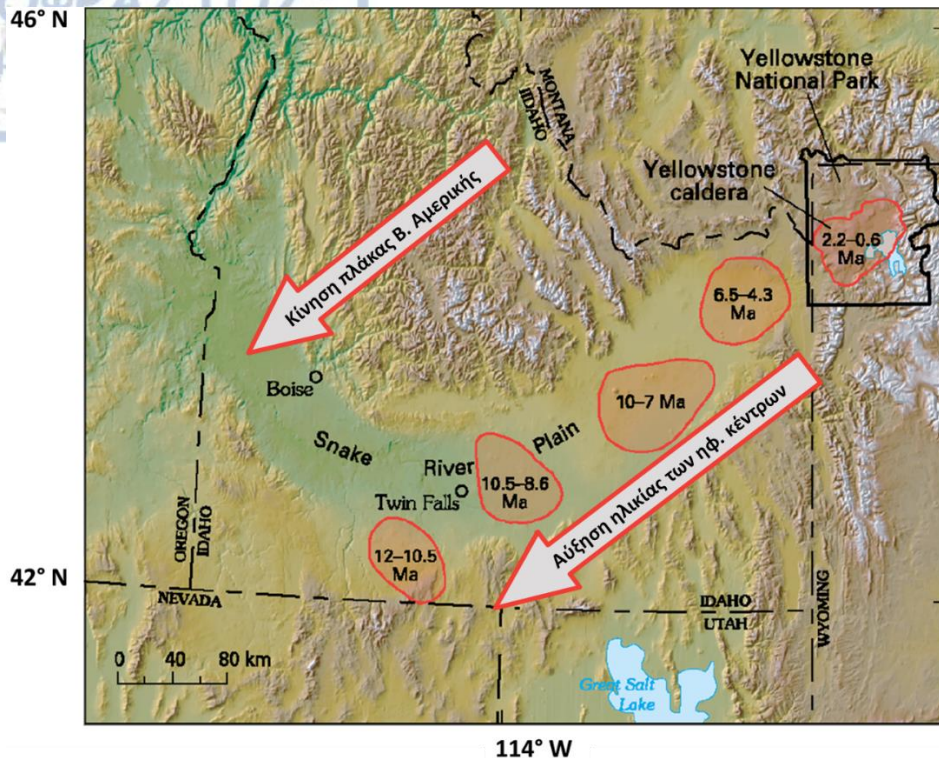
Ασφαλή συμπεράσματα για την κίνηση της πλάκας της Β. Αμερικής μπορούν να εξαχθούν από την μελέτη των θερμών κηλίδων (*hot spots*) και ιδιαίτερα αυτής του Yellowstone (**Εικόνα 1.9**). Οι θερμές κηλίδες συνιστούν αρχεία κινήσεων των πλακών και παρέχουν δείκτες με τους οποίους μπορεί να εξεταστεί η σχετική κίνηση μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας και των υποκείμενων περιοχών του μανδύα. Παλαιότερες μελέτες έδειξαν ότι η ταχύτητα του Yellowstone τα τελευταία 16 Ma ήταν αρκετά ακανόνιστη και οι μετρήσεις με βάση τις θέσεις της καλντέρας ήταν εξίσου αβέβαιες. Τα τελευταία χρόνια έγινε προσπάθεια προσδιορισμού της ταχύτητας λαμβάνοντας υπ' όψη και τον ευρύτερο χώρο της λιθόσφαιρας και όχι μόνο την θέση της καλντέρας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι τα τελευταία 10 Ma ο ρυθμός μετάθεσης της Β. Αμερικανικής πλάκας έχει σταθεροποιηθεί σε 2,2 cm/έτος (**Anders M. H., 1994**). Η κύρια διεύθυνση κίνησης της Β. Αμερικανικής πλάκας είναι προς τα Δ-ΝΔ με ταχύτητα 1,5-2,5 cm/έτος, απομακρυνόμενη από την μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού (**Faulds J. E. et al., 2005**).

Η μεγάλη έκταση της Β. Αμερικανικής πλάκας σε συνδυασμό με την αδυναμία προσέγγισης ορισμένων περιοχών για μελέτη οδηγούν σε ελλιπή στοιχεία και διαφορούμενες απόψεις μεταξύ των επιστημόνων.



Εικόνα 1.8. Κινήσεις των τεκτονικών πλακών μετρημένες με όργανα GPS (NASA).





**Εικόνα 1.9.** Χάρτης που απεικονίζει την σταδιακή μετατόπιση της καλδέρας του Yellowstone προς τα ΒΑ μαζί με τις θέσεις παλαιότερων ηφαιστειακών κέντρων. Η ηλικία τους αυξάνει προς τα ΝΔ υποδεικνύοντας την διεύθυνση κίνησης της πλάκας για τα τελευταία περίπου 12 Ma (Pierce K. L. & Morgan L. A., 1992).

#### 1.4 Δομή του εσωτερικού της Β. Αμερικάνικης πλάκας

Η σεισμική τομογραφία είναι μια σύγχρονη μέθοδος που επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την δομή του εσωτερικού της Γης μέσα από την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων. Η συλλογή των σεισμολογικών δεδομένων είναι πολυετής και γίνεται από σειсмоγράφους που έχουν εγκατασταθεί κατά μήκος και πλάτος της Β. Αμερικανικής ηπείρου.

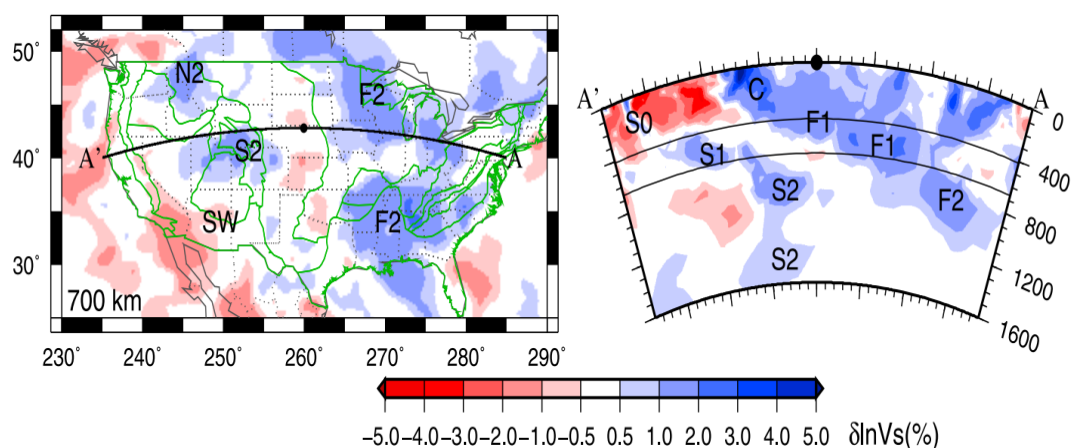
Ανάλυση της δομής του φλοιού και μανδύα της Β. Αμερικής που έγινε μέχρι τα 1700 km βάθος έδειξε ότι στον ανώτερο μανδύα (~400 km βάθος) υπάρχει μια ρίζα υψηλών ταχυτήτων ακριβώς κάτω από την Καναδική ασπίδα. Στο ανατολικό περιθώριο οι ταχύτητες είναι ενδιάμεσες, ενώ στο δυτικό οι ταχύτητες για τα ίδια βάθη είναι πολύ μικρότερες. Από τα πιο εντυπωσιακά ευρήματα που προέκυψαν από την ανάλυση των σεισμικών τομογραφιών (**Εικόνα 1.10**) ήταν :

- τα απομεινάρια της αρχαίας πλάκας Farallon. Ανατολικότερα κάτω από τις Μεσοδυτικές Πολιτείες, τα υπολείμματα της πλάκας λόγω της καταβύθισης σχημάτισαν μια αδύναμη ζώνη που εκτείνεται σε βάθος μέχρι τα 200 km. Εντός της ζώνης βρίσκεται το ρήγμα New Madrid, το οποίο έχει γεννήσει μερικούς από τους μεγαλύτερους σεισμούς στην Β. Αμερική (**Chen C., Zhao D., Wu S., 2014**). Κάτω από το βάθος των 400 km η πιο σημαντική δομή που βρέθηκε είναι μια ανωμαλία υψηλών ταχυτήτων, που παρατηρείται σε μια ευρεία περιοχή από την ανατολική Καραϊβική έως τις βόρειες ΗΠΑ. Κάτω από την Καραϊβική η ανωμαλία αυτή είναι σχεδόν κατακόρυφη και εκτείνεται από περίπου 700 km έως 1700 km βάθος. Πιο βόρεια, η ανωμαλία βυθίζεται προς τα ανατολικά με υψηλές ταχύτητες σε βάθος 700



km στις κεντρικές ΗΠΑ και σχετικά υψηλές ταχύτητες σε βάθος 1100 km κάτω από την ανατολική ακτή. Αυτή η ανωμαλία του κατώτερου μανδύα σχετίζεται με την υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας Farallon κάτω από την Β. Αμερικάνικη πλάκα (*Grand S. P., 1987*).

- ο μανδουακός θύλακας που τροφοδοτεί την θερμή κηλίδα του Yellowstone. Η επιβράδυνση των σεισμικών κυμάτων δηλώνει την παρουσία μαγματικού υλικού που ανέρχεται λόγω των ρευμάτων μεταφοράς από το όριο μανδύα-πυρήνα (CMB) μέχρι και τον ανώτερο μανδύα και προκαλεί διάτρηση του ηπειρωτικού φλοιού, αλλά και ο μαγματικός θάλαμος του υπερηφαιστείου εντοπίζεται σε βάθος τουλάχιστον 500 km από την επιφάνεια (*Huang H. et al., 2015*).



**Εικόνα 1.10.** Η τομή AA' δείχνει δύο συστήματα υποβύθισης: το νεότερο στα δυτικά (S0, S1, S2) και το παλαιότερο στα ανατολικά (F1, F2). Το C υποδηλώνει κρατονική περιοχή. Οι δυο μαύρες καμπύλες στην τομή αντιπροσωπεύουν τις ασυνέχειες του άνω μανδύα στα 410 και 660 km (Sigloch et al., 2008). Οι κόκκινες περιοχές αντιπροσωπεύουν ζώνες χαμηλών ταχυτήτων και παρατηρούνται ως επί το πλείστον στο δυτικό περιθώριο. Οι μπλε περιοχές αντιπροσωπεύουν υψηλότερες ταχύτητες, οι οποίες συσχετίζονται με κρύο και πυκνό υλικό όπως αυτό της πλάκας Farallon.

## 2 Το ενεργό γεωτεκτονικό περιβάλλον της Καλιφόρνια

Το γεωτεκτονικό περιβάλλον της Καλιφόρνια αντιπροσωπεύει μια αρχαία ζώνη υποβύθισης της Farallon, που όταν ολοκληρώθηκε έδωσε την θέση της σε ένα περιβάλλον μετασχηματισμού με την δημιουργία της ρηξιγενούς ζώνης του Αγίου Αντρέα. Ταυτόχρονα νοτιότερα λάμβανε χώρα η διάνοιξη του κόλπου της Καλιφόρνια.

Η Καλιφόρνια αποτελεί ένα συνονθύλευμα νησιωτικών τόξων, που από το Δεβόνιο άρχισαν να συγκρούονται μεταξύ τους αλλά και με τότε δυτικό περιθώριο, προκαλώντας πολλαπλά ορογενετικά επεισόδια που οδήγησαν σε έντονη μεταμόρφωση με πτυχωσιγενή και θραυσιγενή τεκτονική. Τα πετρώματα του δυτικού περιθωρίου δεν σχηματίστηκαν ταυτόχρονα ούτε υπέστησαν παρόμοια παραμόρφωση. Ακόμα και η θέση όμοιων σχηματισμών έχει μεταβληθεί εξαιτίας της δράσης νεότερων ρηγματών με αποτέλεσμα ίδια πετρώματα που κάποτε ήταν ενιαία σήμερα να απέχουν πολλά χιλιόμετρα μεταξύ τους.

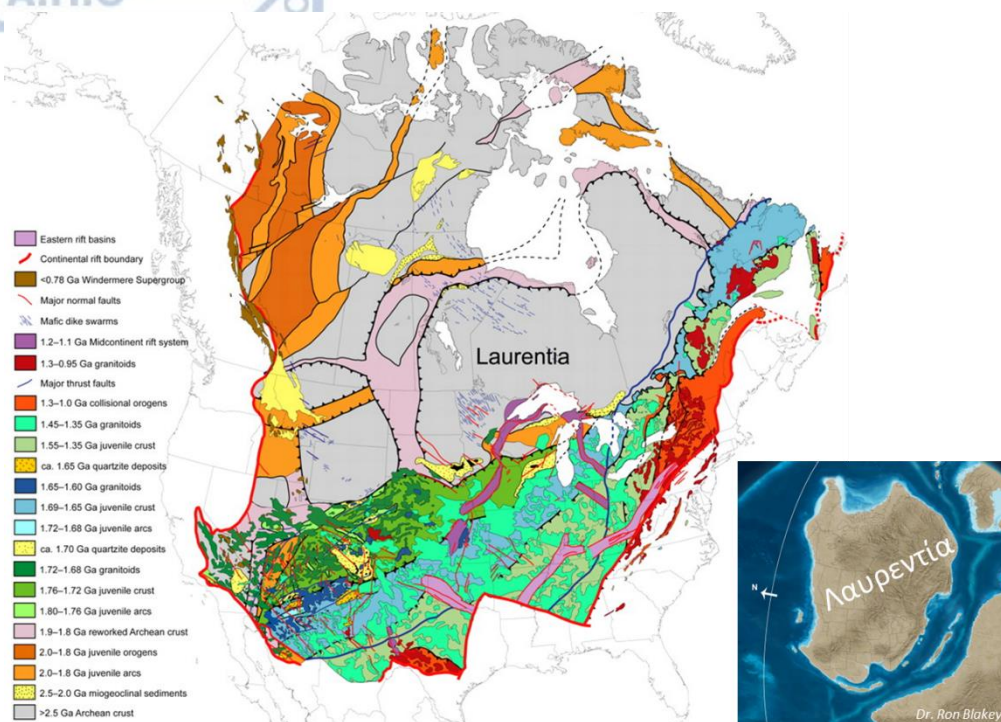
Η Καλιφόρνια είναι μέχρι και σήμερα τεκτονικά ενεργή και αυτό αποτυπώνεται στην σεισμικότητα, την ηφαιστειότητα-υδροθερμική δραστηριότητα και στην συνεχή ανύψωση των ορεινών όγκων. Παράλληλα οι διεργασίες της διάβρωσης και αποσάθρωσης σχηματίζουν ιζηματογενείς ακολουθίες μεγάλου πάχους, που αποτίθενται μέσα σε λεκάνες π.χ. στην Κεντρική κοιλάδα. Οι παραπάνω διεργασίες συνεχίζουν να διαμορφώνουν το τοπίο της Καλιφόρνια αλλά και ολόκληρο το δυτικό περιθώριο.

### 2.1 Η γεωτεκτονική εξέλιξη της Καλιφόρνια

Τα τεμάχια με τα οποία συγκρούστηκε το δυτικό περιθώριο της Καλιφόρνια μέσα στον γεωλογικό χρόνο καταγράφουν μια πολύπλοκη γεωλογική ιστορία σύγκρουσης, υποβύθισης και οριζόντιας μετατόπισης. Τα αλλόχθονα νησιωτικά τόξα μαζί με τα συνοδά ιζήματα βαθιάς θάλασσας και τα βασικά-υπερβασικά πετρώματα του ωκεάνιου φλοιού, που είχαν αποξυστεί, προστέθηκαν πάνω στο δυτικό περιθώριο συμβάλλοντας στην επαύξηση του φλοιού. Η κύρια ορογένεση έλαβε χώρα από το Ιουρασικό μέχρι το Τριτογενές και οδήγησε στο σχηματισμό μίας ευρείας ζώνης πτυχώσεων και επωθήσεων, δυτικά της οποίας η Β. Αμερικάνικη Κορδιλιέρα αποτελείται αποκλειστικά από προσκολλημένα αυτόχθονα και αλλόχθονα terranes διαφόρων ηλικιών, πετρολογικής σύστασης και προέλευσης. Γενικότερα το μεγαλύτερο μέρος του δυτικού περιθωρίου άρχισε να διαμορφώνεται πλήρως στις αρχές του Ιουρασικού με την σύγκρουση και συσσώρευση διαδοχικών νησιωτικών τόξων στην πλάκα της Β. Αμερικής, όταν αυτή άρχισε να κινείται προς τα δυτικά μετά τον διαχωρισμό της υπερηπείρου Πανγαίας.

Η περίπλοκη δομή και ο μεγάλος αριθμός των πεδίων που συγκρούστηκαν και εν τέλει επωθήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο είχε ως αποτέλεσμα την διατύπωση πολλών διαφορετικών θεωριών σχετικά με την εξέλιξη των ορογενών και του δυτικού περιθωρίου γενικότερα.

## 2.1.1 Προκάμβριο



**Εικόνα 2.** Η κρατονική περιοχή της Β. Αμερικής στο Προκάμβριο. Η επέκταση της γίνεται με την συσσώρευση διαφόρων πεδίων γύρω από τον σταθερό κρατώνα, για αυτό και οι ηλικίες των σχηματισμών αυξάνουν από τα περιθώρια της ηπείρου προς τον Αρχαίο φλοιό της Λαυρεντίας (Whitmeyer S. J. & Karlstrom K. E., 2007).

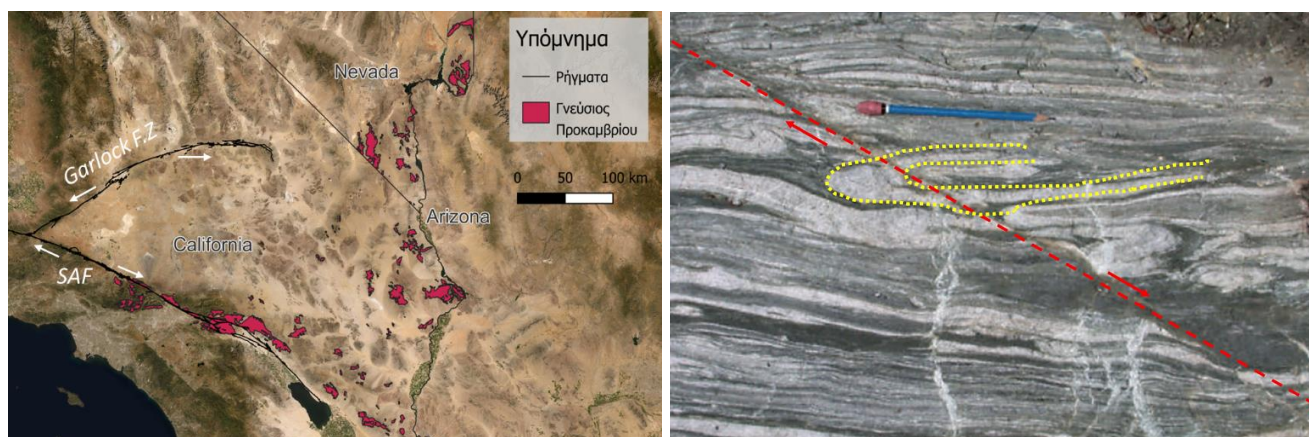
Από το Προκάμβριο (**Εικόνα 2**) μέχρι και τις αρχές του Παλαιοζωικού το δυτικό περιθώριο της Λαυρεντίας<sup>2</sup> ήταν ένα παθητικό περιθώριο, ανάλογο με τις σημερινές ανατολικές ακτές της Β. Αμερικής, στο οποίο αποτέθηκαν τυπικές ακολουθίες μειογεωσυγκλινικών ιζημάτων (**Holm-Denoma C. S. et al., 2011**). Στα αβαθή του γεωσυγκλινού αποτέθηκαν ανθρακικά και κλαστικά ιζήματα, ενώ στα βαθύτερα αργιλικό ή/και κερατολιθικό υλικό. Τα παλαιότερα πετρώματα που συναντώνται στην Καλιφόρνια είναι Προτεροζωικής ηλικίας 1,8-1,6 Ga και εντοπίζονται στην ανατολική έρημο Mojave, στα βουνά San Bernardino και στα βουνά San Gabriel (**Εικόνες 2.1-2**). Πρόκειται για μεταμορφωμένα πετρώματα υποβάθρου που προέρχονται από ακόμη πιο παλιά ιζηματογενή, πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα που βρέθηκαν σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και υπέστησαν μερική τήξη και ανακρυστάλλωση. Αυτά τα πετρώματα είναι παρόμοια σε ηλικία και σύσταση με τα πετρώματα του υποβάθρου στο Grand Canyon.

Κατά τον Ύστερο Προτεροζωικό μετά τον σχηματισμό του υποβάθρου με τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα, στην σημερινή περιοχή που βρίσκεται η έρημος Mojave είχαν σχηματιστεί αρχαίες οροσειρές που διαβρώθηκαν και σχημάτισαν ένα ομαλότερο ανάγλυφο ανάλογο με πεδιάδες. Εκτεταμένες επικλήσεις της θάλασσας που έλαβαν χώρα στο τέλος του Προτεροζωικού, πριν από περίπου 1 Ga, είχαν ως αποτέλεσμα η θάλασσα να εισχωρήσει στο εσωτερικό της ηπείρου και να σχηματίσει ρηχές θάλασσες. Στις ρηχές θάλασσες οι ιζηματογενείς αποθέσεις

<sup>2</sup> Είναι η κρατονική περιοχή της Β. Αμερικής με ηλικία 2-1,8 Ga.



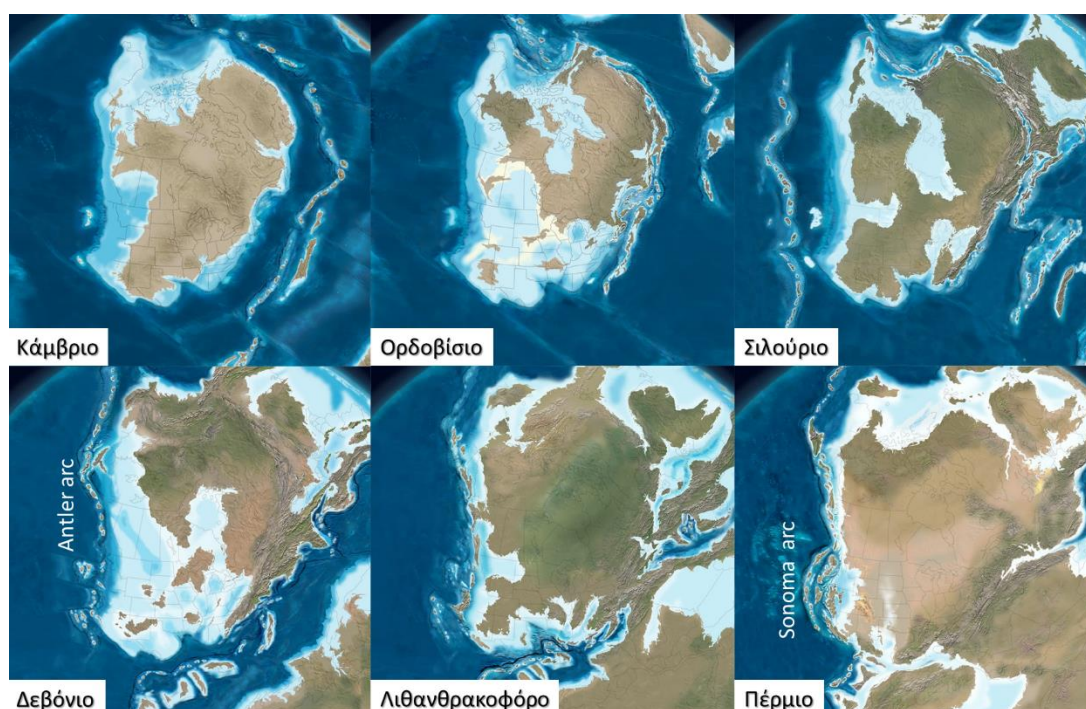
χαλαζιακού ψαμμίτη και ασβεστόλιθου-δολομίτη συσσωρεύτηκαν σε μια ευρεία υφαλοκρηπίδα του ηπειρωτικού περιθωρίου. Στην συνέχεια ακολούθησαν και άλλες επικλήσεις και αποσύρσεις της θάλασσας αποθέτοντας κάθε φορά ένα παχύ στρώμα ψαμμιτών, ασβεστόλιθων, δολομιτών, ιλυολίθων και τα αντίστοιχα μεταμορφωμένα παράγωγα τους χαλαζίτες, γνεύσιοι, μάρμαρα, σχιστόλιθοι. Αυτά τα πετρώματα εντοπίζονται κυρίως στην ανατολική πλευρά της ερήμου Mojave και στην περιοχή του Death Valley.



**Εικόνα 2.1** Χάρτης με τις θέσεις εμφάνισης του παλαιότερου γνευσίου Προκάμβριας ηλικίας. Στην Καλιφόρνια εμφανίζεται κυρίως στην ανατολική έρημο Mojave και στα βουνά San Gabriel, όπου κόβεται και μετατοπίζεται από το ρήγμα του Αγίου Αντρέα (QGIS).

**Εικόνα 2.2.** Φωτογραφία του ταινιωτού γνευσίου Mendenhall ηλικίας 1,7 Ga στα βουνά San Gabriel. Με κίτρινη στικτή γραμμή απεικονίζεται ισοκλινής πτυχή με μικρή γωνία ανοίγματος και παράλληλα πετρώγια που υποδηλώνει ισχυρή τεκτονική καταπόνηση κατά την πτύχωση. Ο γνεύσιος κόβεται από μεταγενέστερο δεξιόστροφο ρήγμα (DeLand J. T., 2003).

## 2.1.2 Παλαιοζωικός Αιώνας



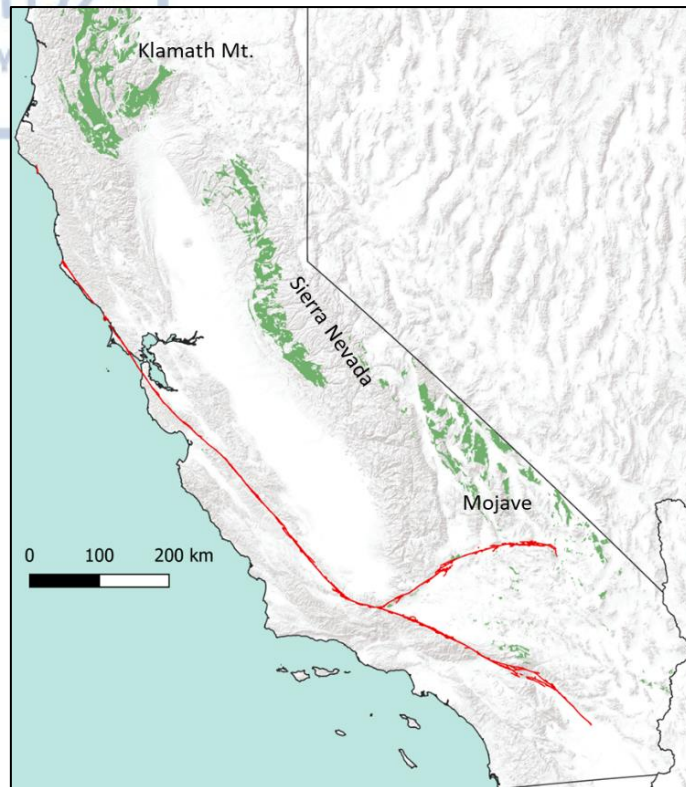
**Εικόνα 2.3** Παλαιογεωγραφικοί χάρτες του Παλαιοζωικού της Βόρειας Αμερικής (Ron Blakey).

Το περιθώριο παραμένει παθητικό μέχρι περίπου τα μέσα του Παλαιοζωικού. Κατά τη διάρκεια του Παλαιοζωικού τα πετρώματα της ανατολικής Καλιφόρνια σχημάτισαν μια ρηχή ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα από παχιές αποθέσεις θαλάσσιων ανθρακικών ιζημάτων, που σήμερα βρίσκονται κυρίως στην Sierra Nevada, στα όρη Klamath και ανατολικά της Mojave (**Εικόνα 2.4**). Τα Παλαιοζωικά πετρώματα είναι ασβεστόλιθοι και δολομίτες με πληθώρα απολιθωμάτων που μαρτυρούν πρώιμες μορφές θαλάσσιων ασπόνδυλων οργανισμών. Σε στρώματα του Καμβρίου υπάρχει αφθονία σε στρωματόλιθους και πρώιμη ασπόνδυλη πανίδα όπως τριλοβίτες. Η αλλαγές στην στάθμη της θάλασσας εξαιτίας αποσύρσεων-επικλήσεων ήταν συνεχής. Τα ανθρακικά πετρώματα με απολιθωμένα κοράλλια, βραχιονόποδα και άλλα ασπόνδυλα στο Death Valley ηλικίας Δεβόνιο-Μεσσιισίπιο δείχνουν ρηχή ιζηματογένεση σε τροπικό κλίμα και αντιπροσωπεύουν υφάλους που αναπτύσσονταν κατά μήκος της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας.

Μεγάλα τεμάχια Παλαιοζωικής ηλικίας του ηπειρωτικού περιθωρίου κινήθηκαν βορειότερα στο περιθώριο του Ειρηνικού και συγκρούστηκαν μεταξύ τους, μεταμορφώθηκαν, υπέστησαν υποβύθιση και επωθήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο. Μέχρι και σήμερα θεωρείται ότι οι ορογενέσεις του Παλαιοζωικού αποτέλεσαν την σημαντικότερη διαδικασία επαύξησης φλοιού του δυτικού περιθωρίου αν και τα όρια τους παραμένουν ασαφή. Οι δύο βασικές ορογενέσεις που έλαβαν χώρα στο Παλαιοζωικό είναι :

- η ορογένεση Antler (*Δεβόνιο-Μεσσιισίπιο*), που επηρέασε μια γραμμική ζώνη από τα σύνορα Καλιφόρνια-Νεβάδα μέχρι και βορειότερα στο Idaho. Τα αποτελέσματα της ορογένεσης είναι ορατά κυρίως μέσα σε παλαιά κροκαλοπαγή και μεταμορφωμένα πετρώματα του Δεβονίου της Νεβάδα και στο ρήγμα επώθησης Roberts Mt. με κλίση προς τα ανατολικά. Κατά την ορογένεση το παθητικό περιθώριο συγκρούστηκε με το νησιωτικό τόξο Antler στην σημερινή περιοχή της Nevada-Utah. Στο Μέσο Μισσιισίπιο η πολικότητα της ζώνης υποβύθισης άλλαξε προς τα ανατολικά και δημιουργείται μία οπισθοτόξια λεκάνη (*back-arc basin*) παρόμοια με αυτή της Ιαπωνίας.
- Κατά το Πέρμιο-Τριαδικό τμήμα της ανατολικής πλάκας του Ειρηνικού υποβυθίστηκε με φορά προς τα δυτικά κλείνοντας την οπισθοτόξια λεκάνη που είχε σχηματιστεί. Όταν ο ωκεάνιος φλοιός καταδύθηκε εντελώς τότε το νησιωτικό τόξο Sonoma που είχε σχηματιστεί συγκρούστηκε με την Β. Αμερικάνικη πλάκα στην σημερινή κεντρική Νεβάδα και επωθήθηκε πάνω σε αυτή (*Golconda thrust*). Αποτέλεσμα της σύγκρουσης ήταν το δυτικό περιθώριο να υποστεί μια νέα ορογενετική φάση γνωστή ως ορογένεση Sonoma.





Εικόνα 2.4. Εμφανίσεις των Παλαιοζωικών θαλάσσιων ιζημάτων στην Καλιφόρνια (QGIS).

Οι ορογένεσεις Antler και Sonoma είναι υπεύθυνες για την εκτόπιση των ευγεωσυγκλινικών ιζημάτων βαθιάς θάλασσας μαζί με τα πυριγενή πετρώματα τοποθετήθηκαν στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα του προηγούμενου παθητικού περιθωρίου. Κάθε επόμενη ορογένεση είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή συρρίκνωση του μειογεωσυγκλίνου προς τα ανατολικά (Holm-Denoma C. S. et al., 2011).

### 2.1.3 Μεσοζωικός Αιώνας



Εικόνα 2.5 Παλαιογεωγραφικοί χάρτες του Μεσοζωικού της Βόρειας Αμερικής (Ron Blakey).

Ο Μεσοζωικός Αιώνας (Εικόνα 2.5) ήταν ιδιαίτερα ταραχώδης για ολόκληρο το δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικής. Το μεγαλύτερο τμήμα της Καλιφόρνια αναδύεται από την θάλασσα, λόγω της προσαύξησης τεμαχών στο δυτικό περιθώριο από την υποβύθιση της Farallon. Αυτή η ορογενετική φάση, γνωστή ως Νεβάδια ορογένεση,



ξεκίνησε πριν ~210 Ma. Αυτό το ορογενετικό γεγονός ανύψωσε την οροσειρά της Sierra Nevada, που τότε αποτελούσε το ενεργό ηφαιστειακό τόξο στην ζώνη υποβύθισης της Farallon. Η έντονη μαγματική δραστηριότητα παρήγαγε τεράστιους όγκους γρανιτικού μάγματος, που σχημάτισε τον βαθόλιθο της Sierra Nevada. Η μαγματική δραστηριότητα ήταν αδιάκοπη καθ' όλη την Μεσοζωική περίοδο και κορυφώθηκε στο τέλος του Κρητιδικού πριν 100-80 Ma ιδιαίτερα στην νότια Sierra Nevada. Μεγάλες ζώνες πλουτωνιτών δόμησαν το υπόβαθρο της Sierra Nevada, των Εγκάρσιων οροσειρών της Καλιφόρνια, τις οροσειρές της χερσονήσου Baja (*Peninsular Ranges*) αλλά και ζώνες ηφαιστειακών πετρωμάτων που εντοπίζονται σε μια ευρύτερη περιοχή της ερήμου Mojave.

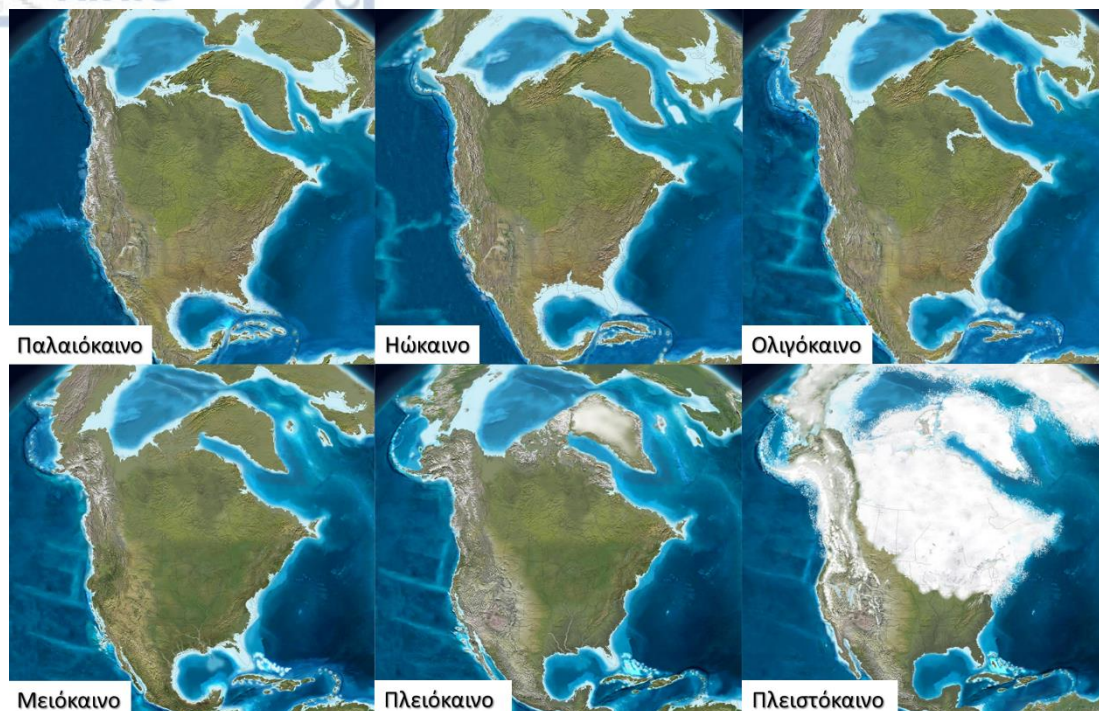
Σήμερα η αποκάλυψη αυτών των τεράστιων μαγματικών όγκων στην επιφάνεια της Γης οφείλεται στην έντονη διάβρωση και αποσάθρωση. Τέτοιες διεργασίες παρήγαγαν τεράστιες ποσότητες ιζημάτων, τις οποίες στην συνέχεια απέθεσαν μέσα σε θαλάσσιες λεκάνες όπως η Western Interior Seaway στα ανατολικά και ο Ειρηνικός στα δυτικά. Το μεγαλύτερο μέρος των χερσαίων και θαλάσσιων ιζηματογενών και ηφαιστειακών αποθέσεων θα διαβρωθεί και θα μεταφερθεί λόγω ανύψωσης από νέα ορογενετικά επεισόδια του Καινοζωικού. Ιζηματογενείς ακολουθίες σχιστόλιθων και ψαμμιτών μεγάλου πάχους του Ιουρασικού και του Κρητιδικού διατηρούνται μέχρι και σήμερα τοπικά κατά μήκος της δυτικής πλευράς των οροσειρών *Peninsular* και *Transverse* αλλά και πιο εσωτερικά όπως στα όρη McCoy. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα που διατηρούνται στην νότια Καλιφόρνια είναι ενδιάμεσου-υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης, τυπικές για βάθη φλοιού 10-20 km.

Στο Μέσο Ιουρασικό λαμβάνει χώρα η σύγκρουση του νησιωτικού τόξου *Stikinia* με το δυτικό περιθώριο. Η σύγκλιση τους είχε σαν αποτέλεσμα την σταδιακή υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας σε δύο αντίρροπες ζώνες υποβύθισης και την δημιουργία, σε αρχικό στάδιο, μιας ζώνης πτυχώσεων–επωθήσεων στο μειογεωσύγκλινο. Η υποβύθιση συνεχίστηκε μέχρι το τέλος του Μεσοζωικού και σχημάτισε ένα πρίσμα επαύξησης γνωστό ως 'Σύμπλεγμα Φραγκίσκου' (*Franciscan Complex*). Ακόμη, στα μέσα του Ιουρασικού με την διάνοιξη του Ατλαντικού, η Β. Αμερικάνικη πλάκα κινήθηκε προς τα δυτικά στον Ειρηνικό. Μέχρι τα 150 Ma η ακτογραμμή βρισκόταν κοντά στην σημερινή Κεντρική Κοιλιά της Καλιφόρνια.

Στο Κενομάνιο η σύγκρουση του περιθωρίου με το τεκτονοστρωματογραφικό πεδίο *Wrangellia* προκάλεσε την εκ νέου παραμόρφωση του δυτικού περιθωρίου και ολοκλήρωσε τα τελευταία στάδια παραμόρφωσης στην ζώνη πτυχώσεων–επωθήσεων. Στο Άνω Κρητιδικό η ορογένεση *Sevier* προκάλεσε εκ νέου επωθήσεις ιζηματογενών στρωμάτων και μαγματική διείσδυση στα ανατολικά του μαγματικού τόξου.

Η ορογένεση *Laramide* (Α. Κρητιδικό–Ηώκαινο) σχηματίζει νέες επωθήσεις και πτυχώσεις ανατολικότερα στην ενδοχώρα. Η υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας *Kula* με μικρή κλίση κάτω από το δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικής σχημάτισε τα Βραχώδη όρη στην ενδοχώρα κατά την ορογένεση *Laramide* (**Marshak S. et al., 2008**).

## 2.1.4 Καινοζωικός Αιώνας

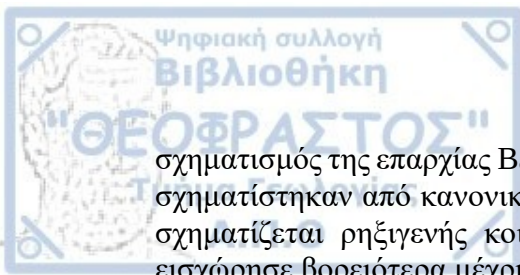


Εικόνα 2.6 Παλαιογεωγραφικοί χάρτες του Καινοζωικού της Βόρειας Αμερικής (Ron Blakey).

Κατά τη διάρκεια του Καινοζωικού (**Εικόνα 2.6**), το σύμπλεγμα Franciscan προσανεζήθηκε στην άκρη της Καλιφόρνια και θαλάσσια ιζηματογενή πετρώματα εναποτέθηκαν στην Κεντρική Κοιλάδα και σε αυτό που θα γινόταν οι Εγκάρσιες και οι Παράκτιες οροσειρές.

Στο Τριτογενές η υποβύθιση κατά μήκος του ηπειρωτικού περιθωρίου της Β. Αμερικής συνεχιζόταν αλλά η μαγματική δραστηριότητα των ηφαιστειακών τόξων είχε μειωθεί και ανά περιοχές είχε σταματήσει εντελώς. Προοδευτικά η ηφαιστειότητα μετακινήθηκε ανατολικότερα προς την ενδοχώρα προκαλώντας την ηφαιστειότητα στα Βραχώδη όρη. Τα ποτάμια μετέφεραν και απέθεταν τεράστιες ποσότητες ιζημάτων σε θαλάσσιες λεκάνες κατά μήκος του περιθωρίου. Μεγάλα συστήματα ρηγμάτων, που προηγήθηκαν του Αγίου Αντρέα, μετακίνησαν τεμάχια του κρυσταλλικού υποβάθρου από την νότια Καλιφόρνια προς τα βόρεια.

Στις αρχές του Μειόκαινου η υποβύθιση πλάκας Farallon στο δυτικό περιθώριο σταδιακά έδωσε την θέση της σε περιβάλλον μετασχηματισμού, όταν πλέον είχε καταδυθεί εντελώς κάτω από την περιοχή της Καλιφόρνια. Η μεσοωκεάνια ράχη μεταξύ του Ειρηνικού και της της Farallon μετανάστευσε προς τα ανατολικά κάτω την σημερινή Great Basin προκαλώντας της έκταση φλοιού. Στην περιοχή της Καλιφόρνια η πλάκα της Β. Αμερικής βρισκόταν σε επαφή με την πλάκα του Ειρηνικού όπως συμβαίνει και σήμερα. Στο τέλος του Μειόκαινου κατά μήκος των ακτογραμμών της Καλιφόρνια άρχισαν να υψώνονται οι Παράκτιες οροσειρές αποκαλύπτοντας τα πελαγικά ιζήματα που είχαν αποτεθεί στην ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα και σε θαλάσσιες λεκάνες. Το οργανικό υλικό αυτών των ιζημάτων έγινε η κύρια πηγή εκμετάλλευσης πετρελαίου και φυσικού αερίου στην Καλιφόρνια. Η συμπίεση και διάτμηση στα δυτικά ακολουθείται από εφελκυσμό στην ανατολική Mojave και στην Μεγάλη Λεκάνη (*Great Basin*). Αποτέλεσμα της έκτασης του φλοιού είναι ο



σχηματισμός της επαρχίας Basin and Range, μια περιοχή με παράλληλες οροσειρές που σχηματίστηκαν από κανονικά ρήγματα. Ταυτόχρονα στην χερσόνησο Baja άρχισε να σχηματίζεται ρηξιγενής κοιλάδα μεταξύ αυτής και του Μεξικού και η θάλασσα εισχώρησε βορειότερα μέχρι την λίμνη Salton Sea.

Στο Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο το κλίμα γίνεται ψυχρότερο και οι παγετώνες που σχηματίστηκαν επηρέασαν μέσω της παγετώδους διάβρωσης το ανάγλυφο των οροσειρών, δημιουργώντας κοιλάδες όπως αυτή στο Yosemite. Κατά την διάρκεια των παγετωδών περιόδων οι αλπικοί παγετώνες λάξεψαν απότομα φαράγγια στην Sierra Nevada και σχημάτισαν παγετώδεις λίμνες όπως η λίμνη Tahoe, η μεγαλύτερη αλπική λίμνη της Β. Αμερικής. Τα ρήγματα και οι πτυχές διαμόρφωσαν το ανάγλυφο όπως το ξέρουμε σήμερα, με ανυψώσεις των οροσειρών δυτικά του ρήγματος του Αγίου Αντρέα και έκταση του φλοιού με ηφαιστειότητα ανατολικά της Sierra Nevada. Στο τέλος του Πλειστοκαίνου με το λιώσιμο των παγετώνων σχηματίστηκαν πολλά από τα σύγχρονα μεγάλα ποτάμια, όπως ο ποταμός Colorado, που σχημάτισαν μεγάλες λεκάνες απορροής και διάβρωσαν υπερκείμενους σχηματισμούς.

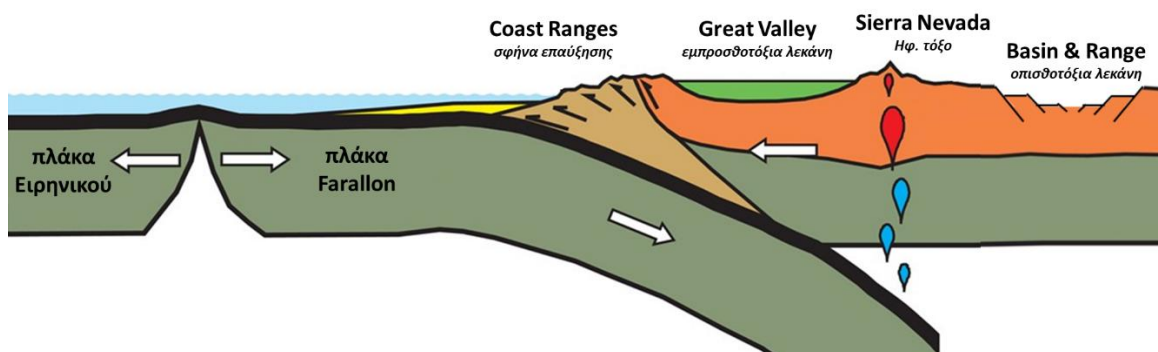
Σήμερα η Καλιφόρνια, όπως και ολόκληρο το δυτικό περιθώριο της Β. Αμερικής, συνεχίζει να είναι ενεργό με έντονη σεισμικότητα. Στην περίοδο του Ολοκαίνου που διανύουμε εκτός από τις ενδογενείς δυνάμεις που αλλάζουν την επιφανειακή μορφολογία σημαντικό πλέον ρόλο έχει και ο ανθρώπινος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το ανάγλυφο προκειμένου να ικανοποιήσει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του



### 3. Η αρχαία ζώνη υποβύθισης της Farallon στην Καλιφόρνια

Η Καλιφόρνια, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι το απομεινάρι της αρχαίας ζώνης υποβύθισης της Farallon και μέχρι και σήμερα είναι ορατά τα μορφοδομικά χαρακτηριστικά του, εκτός της τάφρου. Η τάφρος της ζώνης υποβύθισης είναι οι τάφροι Cascadia και Middle America, στις οποίες συνεχίζουν να υποβυθίζονται τα υπολείμματα της Farallon (πλάκες Juan de Fuca, Cocos). Σε τομή (**Εικόνα 3**) από το εξωτερικό προς το εσωτερικό μέρος του τόξου συναντώνται:

- **το Μεσοζωικό πρίσμα επαύξησης**, που αντιπροσωπεύεται από τις Παράκτιες οροσειρές της Καλιφόρνια. Οι παράκτιες οροσειρές που αποτελούνται από ιζηματογενή πετρώματα και πετρώματα ωκεάνιου φλοιού που αναδύθηκαν λόγω συμπίεσης.
- **η εμπροσθοτόξια λεκάνη**, την οποία αποτελεί η Κεντρική κοιλάδα (Central Valley ή Great Valley) της Καλιφόρνια.
- **το Μεσοζωικό ηφαιστειακό τόξο** της Sierra Nevada, που βρίσκεται εσωτερικά στην ενδοχώρα. Όταν η υποβύθιση σταμάτησε οι αλυσίδες ηφαιστειών που είχαν σχηματιστεί διαβρώθηκαν σε μεγάλο βαθμό. Σήμερα οι μαγματικοί θάλαμοι έχουν αποκαλυφθεί στην επιφάνεια με τον χαρακτηριστικό ανοιχτόχρωμο βαθόλιθο.
- **η οπισθοτόξια λεκάνη** Basin & Range, όπου ο εφελκυσμός μέσω των κανονικών ρηγμάτων σχημάτισε πληθώρα από επιμήκη τεκτονικά graben και κέρατα που στην συνέχεια διαμόρφωσαν έναν ιδιαίτερο τύπο αναγλύφου με στενόμακρες κοιλάδες και οροσειρές που εναλλάσσονται μεταξύ τους.

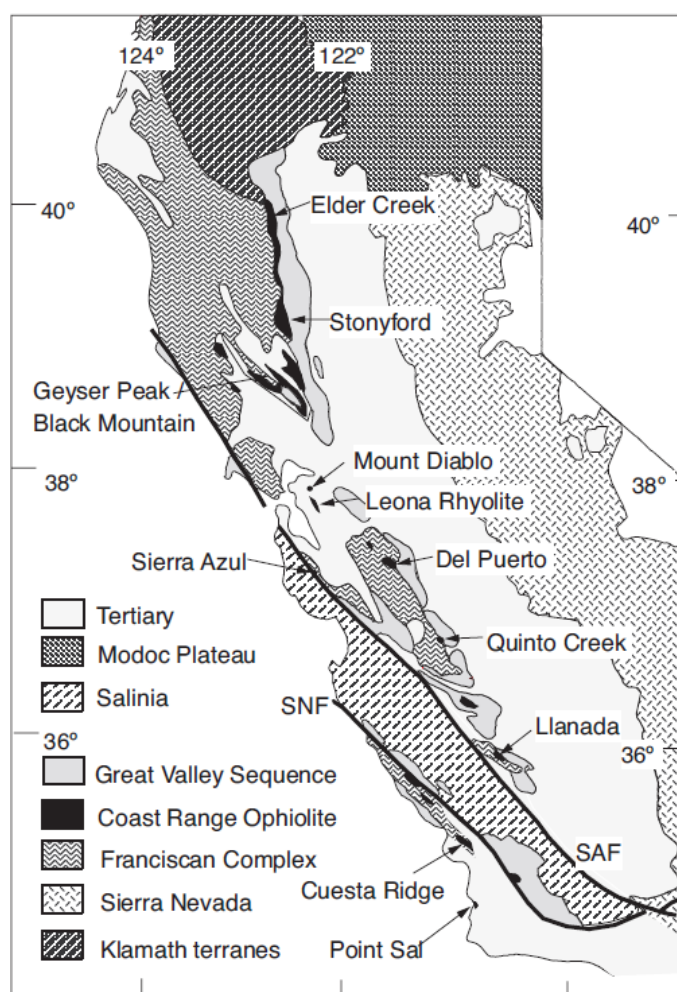


Εικόνα 3. Τομή του ηφαιστειακού τόξου στο ύψος του San Francisco (τροποποιημένο Lillie, R. J., 2005).

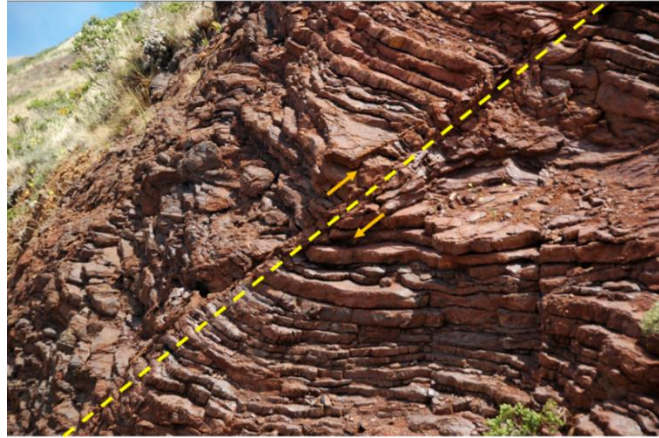
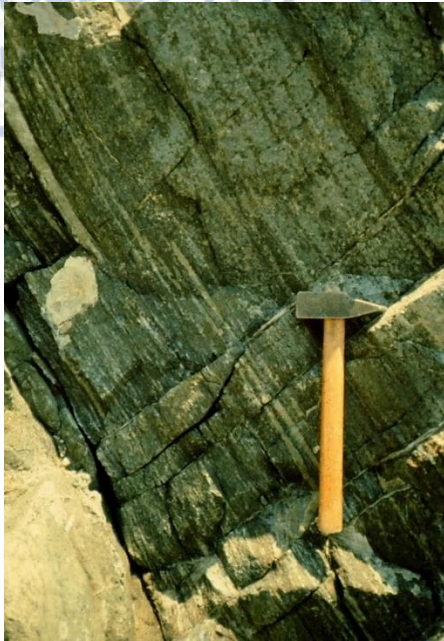
#### 3.1 Η σφήνα επαύξησης - Παράκτιες οροσειρές,

Οι Παράκτιες οροσειρές (**Εικόνα 3.1**) της Καλιφόρνια έχουν μήκος περίπου 640 km και διατρέχουν κατά μήκος τις ακτές της δυτικής Καλιφόρνια με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ παράλληλα με το ρήγμα του Αγίου Αντρέα. Μαζί με τα βουνά Klamath, Transverse και Peninsular αποτελούν τμήμα των οροσειρών της Περιερηνικής ζώνης. Οι Παράκτιες οροσειρές αντιπροσωπεύουν το Μεσοζωικό πρίσμα επαύξησης, που σχηματίστηκε

όταν τα ελαφρύτερα ιζήματα της ωκεάνιας πλάκας Farallon αποξύστηκαν από την άνω επιφάνεια της και προσκολλήθηκαν στο ηπειρωτικό περιθώριο της Β. Αμερικής, ενώ αυτή συνέχιζε να υποβυθίζεται. Η σειρά των πετρωμάτων που εν τέλει επωθήθηκε πάνω στο περιθώριο σχημάτισε την τυπική οφιολιθική σειρά των Παράκτιων οροσειρών (*Coast Ranges Ophiolites- CRO*) (**Εικόνα 3.2-3**) ηλικίας M-A Ιουρασικό με έντονα διαταραγμένα πετρώματα γνωστά ως *mélange*. Η οφιολιθική στήλη περιλαμβάνει : το υπερβασικό σύμπλεγμα, το γαββρικό σύμπλεγμα, το σύμπλεγμα πολλαπλών φλεβών (*διαβασικές φλέβες*), το ηφαιστειακό σύμπλεγμα με μαξιλαροειδείς λάβες (*pillow lavas*), εναλλαγές λαβών με πελαγικά ιζήματα και τα ιζήματα βαθιάς θάλασσας. Ο οφιόλιθος των Παράκτιων οροσειρών τοποθετήθηκε πάνω στο περιθώριο πριν 170-150 Ma (**Dickinson W. R. et al., 1996**). Τα πετρώματα λόγω συμπίεσης πτυχώθηκαν έντονα και διαρρήχθηκαν από νεότερα ρήγματα. Η τεκτονική πτύχωση και η πλάγια συμπίεση κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα και των συναφών ρηγμάτων συνεχίζουν να ανυψώνουν τις Παράκτιες οροσειρές.



**Εικόνα 3.1.** Χάρτης με τις τεκτονικές ζώνες των Παράκτιων οροσειρών, με σκούρο χρώμα απεικονίζεται η οφιολιθική συρραφή (Shervais J. W., 2001).

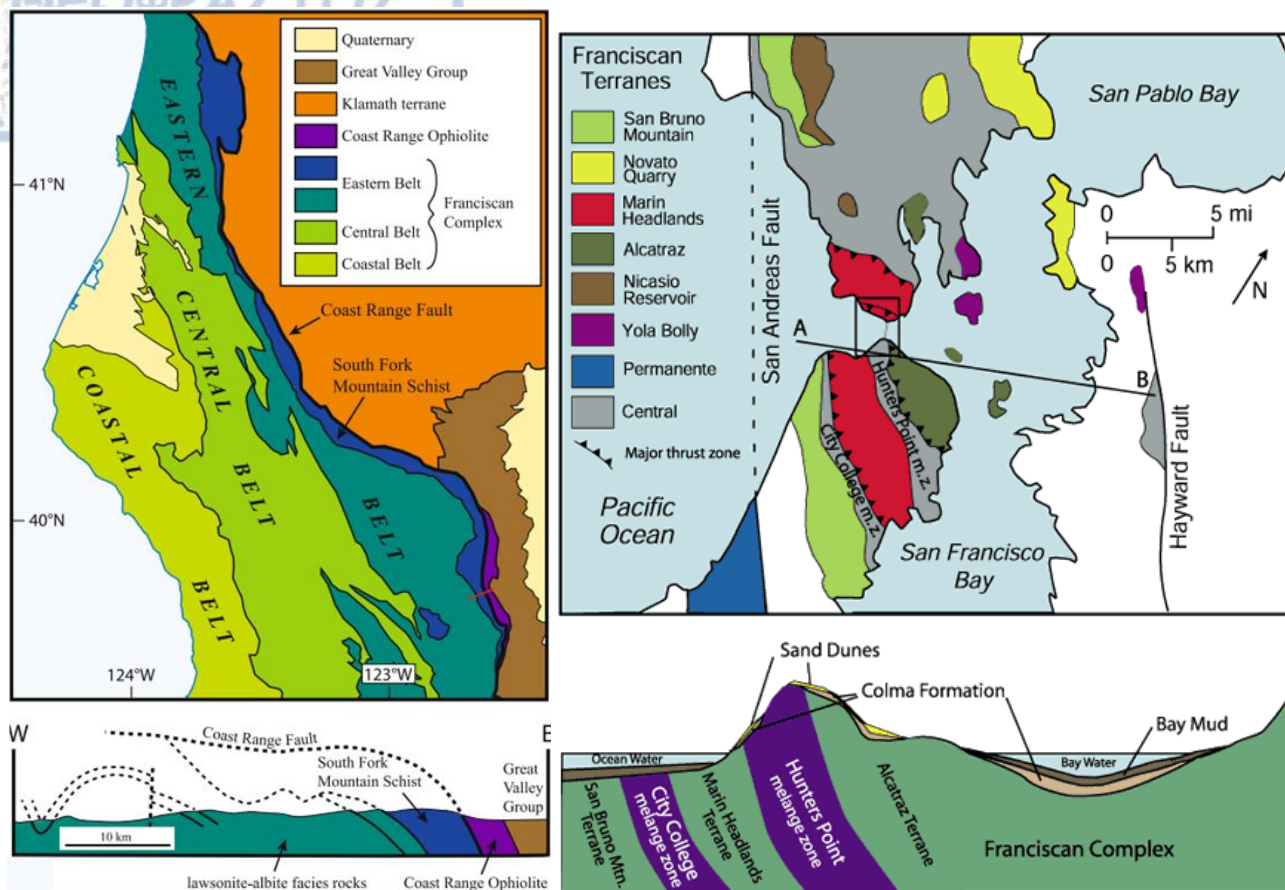


**Εικόνα 3.2.** Οφιόλιθος των Παράκτιων οροσειρών της Καλιφόρνια (CRO). Διακρίνεται η έντονη φολίδωση στο πέτρωμα (Shervais, J. W., 2001).

**Εικόνα 3.3.** Λεπτά στρώματα κερατόλιθου του συμπλέγματος Franciscan ηλικίας Κ. Ιουρασικό-Κ. Κρητιδικό στον Κόλπο του Σαν Φρανσίσκο. Ο κερατόλιθος είναι άφθονος ραδιολάρρια και το χαρακτηριστικό σκούρο κεραμιδί χρώμα προέρχεται από αιματίτη- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Τα στρώματα κεκλιμένα λόγω της τεκτονικής τους τοποθέτησης και τέμνονται από ανάστροφο ρήγμα (James St. John).

Οι Παράκτιες οροσειρές μπορούν να διακριθούν σε δύο επιμέρους κλάδους τον βόρειο και τον νότιο, ενδιάμεσα των οποίων παρεμβάλλεται ο κόλπος του Σαν Φρανσίσκο. Το μεγαλύτερο κομμάτι των βόρειων Παράκτιων οροσειρών δομείται από το σύμπλεγμα Franciscan (**Εικόνα 3.4**), ένα ωκεάνιο τέμαχος που αποτελείται από ψαμμίτη, γραουβάκη και ενότητες κερατόλιθου-πρασινοςχιστόλιθου με ενδιάμεσες ζώνες *mélange*. Τα *mélange* αποτελούνται από μικρότερα τεμάχη πετρωμάτων των παραπάνω ενοτήτων μαζί με σερπεντινίτη, μπλε σχιστόλιθο, εκλογίτη, ασβεστόλιθο και βασικά-υπερβασικά πετρώματα μέσα σε ένα αργιλικό υλικό πλήρωσης (**Dellinger D. A., 1989**). Ο μπλε σχιστόλιθος είναι τυπικό πέτρωμα σε ζώνες υποβύθισης και προσδιορίζει συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας HP/LT. Κατά την επώθηση του από την καταδύομενη πλάκα πάνω στο ηπειρωτικό περιθώριο ανέπτυξε μια έντονα διαταραγμένη και χαοτική δομή, η οποία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του γνώρισμα. Η βύθιση του συμπλέγματος Franciscan προς τα ανατολικά έγινε πριν 165-130 Ma με αποτέλεσμα την προσαύξηση και την μεταμόρφωση των σχηματισμών, όπως οι μπλε σχιστόλιθοι (**Wakabayashi J. & Unruh J. R., 1995**).





Εικόνα 3.4. Αριστερά : Τεκτονικός χάρτης των βόρειων Παράκτιων οροσειρών (Platt J. P. et al., 2018). Δεξιά : Το σύμπλεγμα Franciscan στην περιοχή του Σαν Φρανσίσκο (Will Elder, NPS).

Στις βόρειες Παράκτιες οροσειρές βρίσκονται δύο σημαντικά ηφαιστειακά πεδία, το Sonoma και το Clear Lake. Η ηφαιστειότητα στο πεδίο Sonoma ήταν πιο ενεργή κατά το Πλειόκαινο, ενώ στο Clear Lake καταγράφεται δραστηριότητα από το Πλειστόκαινο με την πιο πρόσφατη δραστηριότητα να λαμβάνει χώρα πριν 11.000 χρόνια. Το ηφαιστειακό πεδίο Clear Lake φιλοξενεί σήμερα τους πιο παραγωγικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία στον κόσμο.

Οι νότιες Παράκτιες οροσειρές μπορούν να χωριστούν σε δύο επιμέρους ζώνες. Μία ευρεία ζώνη στα ΝΔ με το μπλοκ Salinian (Εικόνα 3.5) και μια στενότερη, που καλύπτεται από ιζηματογενή πετρώματα του Καινοζωικού εντός των οποίων έχουν σχηματιστεί σημαντικά κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (Dellinger D. A., 1989). Το τέμαχος Salinian βρίσκεται κοντά στο ρήγμα του Αγίου Αντρέα και αποτελείται από ένα γρανιτικό πυρήνα παρόμοιας σύστασης με τον βαθόλιθο της Sierra Nevada, με τους επιστήμονες να θεωρούν ότι αποτελούσε τμήμα του υποβάθρου της Sierra Nevada και με την δράση του ρήγματος του Αγίου Αντρέα μετακινήθηκε βορειότερα. Στο τέμαχος εντοπίζονται και μη ανθρακικά ιζήματα ρηχής θάλασσας και κυρίως μεταμορφωμένα κλαστικά μέσα στα οποία που διεισδύουν τα πλουτωνικά πετρώματα Μεσοζωικής ηλικίας.

Εντός των υπερβασικών πετρωμάτων της οφιολιθικής στήλης συναντώνται υδρομαγματικά κοιτάσματα χρωμίτη-Cr και λατεριτικά κοιτάσματα Cr-Ni, που συνδέονται με τα υπερβασικά πετρώματα.



*Εικόνα 3.5. Φωτογραφία των ακτών της χερσονήσου Point Reyes, που δομούνται από το γρανιτικό σύμπλεγμα Salinian (NPS). Ο γρανίτης Salinian σχηματίστηκε την ίδια περίοδο με το γρανιτικό υπόβαθρο της Sierra Nevada και έχει παρόμοια ορυκτολογική σύσταση (Andrew Alden).*

### 3.2 Εμπροσθοτόξια λεκάνη - Κεντρική κοιλάδα Καλιφόρνια

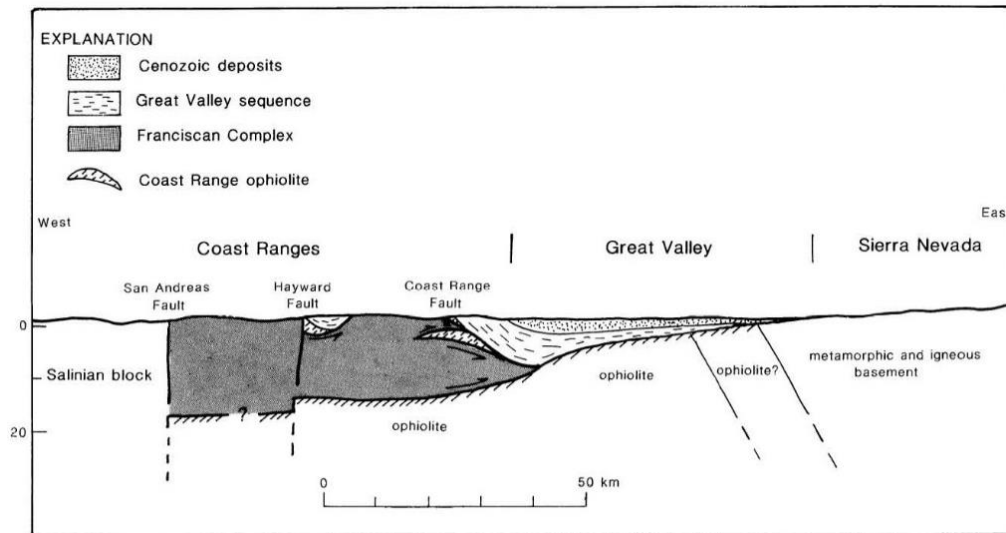
Η Κεντρική κοιλάδα της Καλιφόρνια είναι μια επιμήκης (*Great-Central Valley*) αλλουβιακή πεδιάδα μήκους 640 km και πλάτους 80 km με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, που αναπτύσσεται στην κεντρική Καλιφόρνια και οριοθετείται από την οροσειρά Cascades στα βόρεια, την Sierra Nevada στα ανατολικά, τις οροσειρές Transverse στα νότια και τις Παράκτιες οροσειρές στα δυτικά. Η κοιλάδα είναι ένα μεγάλο βύθισμα του φλοιού με πολύ χαμηλά υψόμετρα σχεδόν κοντά στο επίπεδο της θάλασσας και οι εξάρσεις εδάφους είναι ελάχιστες με εξαίρεση τον δόμο λάβας Sutter Buttes στην κοιλάδα του Sacramento, που είναι τα απομεινάρια ενός απομονωμένου ηφαιστείου που ήταν ενεργό κατά το Πλειστόκαινο και θεωρείται ως το νοτιότερο άκρο του ηφαιστειακού τόξου Cascades (**Hausback B. P. et al., 2011**). Τα ρήγματα περιορίζονται στα περιθώρια της λεκάνης δυτικά και ανατολικά. Η Κεντρική κοιλάδα διακρίνεται σε δύο υπολεκάνες αποστράγγισης, αυτή του Sacramento στα βόρεια και του San Joaquin στα νότια.

Η Κεντρική κοιλάδα σχηματίστηκε περίπου το Άνω Ιουρασικό-Κρητιδικό ως μια λεκάνη μεταξύ της υποβυθιζόμενης ωκεάνιας πλάκας Farallon και του ηφαιστειακού τόξου της Sierra Nevada. Συνεπώς, αντιπροσωπεύει την εμπροσθοτόξια λεκάνη της ζώνης υποβύθισης της Farallon, που δέχτηκε ιζήματα από την σφήνα επαύξησης αλλά και από την ηφαιστειακή οροσειρά του τόξου (**Εικόνα 3.6**). Η μεγάλου πάχους ακολουθία θαλάσσιων ιζημάτων συσσωρεύτηκε στην λεκάνη προχώρας και σχημάτισε την ακολουθία Great Valley Sequence συνολικού πάχους 12 km. Η ιζηματογενής ακολουθία είναι υπερκείμενη του συμπλέγματος Franciscan στα δυτικά με το οποίο βρίσκεται σε τεκτονική επαφή μέσω του ρήγματος Sur-Nacimiento, ενώ στα ανατολικά τερματίζει πάνω στο γρανιτικό υπόβαθρο της Sierra Nevada.

Τα πετρώματα της ακολουθίας Great Valley είναι κυρίως σχιστόλιθοι μαζί με ιλυόλιθους, μεγάλα ψαμμιτικά τεμάχια και φακούς κροκαλοπαγών (**Ernst W. G., 1970**). Τα παραπάνω πετρώματα αποτέθηκαν σε περιβάλλον υποθαλάσσιων ριπιδίων και canyons (**Robertson A. H. F., 1990**) και αναφέρονται ως τουρβιδίτες (**Εικόνα 3.7**). Επειδή τα ιζήματα θαλάσσιας προέλευσης της Κεντρικής Κοιλάδας αποτέθηκαν ως το τελευταίο ίζημα της ορογένεσης θεωρούνται ότι είναι φλύσχης, ενώ τα ιζήματα που



αποτέθηκαν μετά το τέλος της ορογενετικής διαδικασίας είναι αποθέσεις μολάσσας, που αντιπροσωπεύουν το τελικό στάδιο πλήρωσης της λεκάνης. Μέσα στις παχιές αποθέσεις θαλάσσιων ιζημάτων του Μειόκαινου και κατά μήκος των αντικλινικών δομών ΝΔ της κοιλάδας του San Joaquin έχουν βρεθεί μεγάλοι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου.



**Εικόνα 3.6.** Γεωλογική τομή των Παράκτιων οροσειρών και της Κεντρικής κοιλάδας. Η ιζηματογενής ακολουθία έχει αποτεθεί πάνω στο σύμπλεγμα Franciscan και στο γρανιτικό υπόβαθρο της Sierra. και τα μεγαλύτερα πάχη παρατηρούνται στα δυτικά της κοιλάδας (Jachens, R. C. et al., 1995).



**Εικόνα 3.7.** Κρητιδικοί τουρβιδίτες στο Cache Creek που ανήκουν στην ιζηματογενή ακολουθία Great Valley. Αποτελείται από λεπτά στρώματα ιλύολιθου με ορισμένους ψαμμιτικούς ορίζοντες (©2010 clasticdetritus.com).



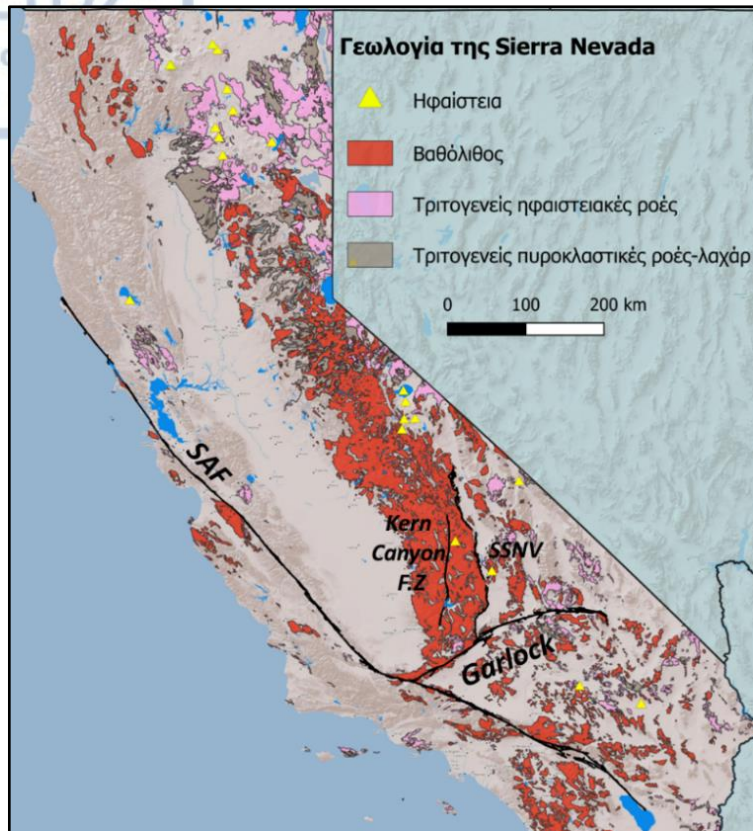
### 3.3 Το ηφαιστειακό τόξο - Η οροσειρά Sierra Nevada

Η οροσειρά Sierra Nevada μήκους 640 km και πλάτους 110 km, αποτελεί το φυσικό όριο μεταξύ των πολιτειών της Καλιφόρνια και Νεβάδα με το μεγαλύτερο τμήμα της να καταλαμβάνει την κεντρική και ανατολική Καλιφόρνια. Η οροσειρά έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και είναι μια από τις οροσειρές που απαρτίζουν της Β. Αμερικάνικη Κορδιλιέρα. Στην νότια απόληξη της οροσειράς βρίσκεται το υψηλότερο σημείο της, η κορυφή Whitney στα 4.421 m. Γενικά το ύψος της οροσειράς αυξάνεται σταδιακά από βορρά προς νότο και από δύση προς ανατολή, με το υψόμετρο από μόλις 150 m στην νότια Κοιλάδα της Καλιφόρνια να ξεπερνάει τα 4.300 m στην ανατολική πλαγιά. Στα νότια καθορίζεται από την έρημο Mojave, στα δυτικά από την Κεντρική κοιλάδα της Καλιφόρνια και στα ανατολικά από την φυσιογραφική επαρχία Basin & Range της Νεβάδα. Στα βόρεια οριοθετείται από τους ποταμούς Suzan και North Fork Feather, αν και γεωλογικά το βόρειο όριο της εντοπίζεται εκεί όπου το γρανιτικό υπόβαθρο της οροσειράς χάνεται κάτω από τα υπερκείμενα ηφαιστειακά πετρώματα της οροσειράς Cascades, η οποία είναι ενεργή ηφαιστειακά μέχρι και σήμερα Η Sierra Nevada είναι η νότια απόληξη των ηφαιστειών Cascades για αυτό συχνά αναφέρονται σαν μια φυσιογραφική επαρχία.

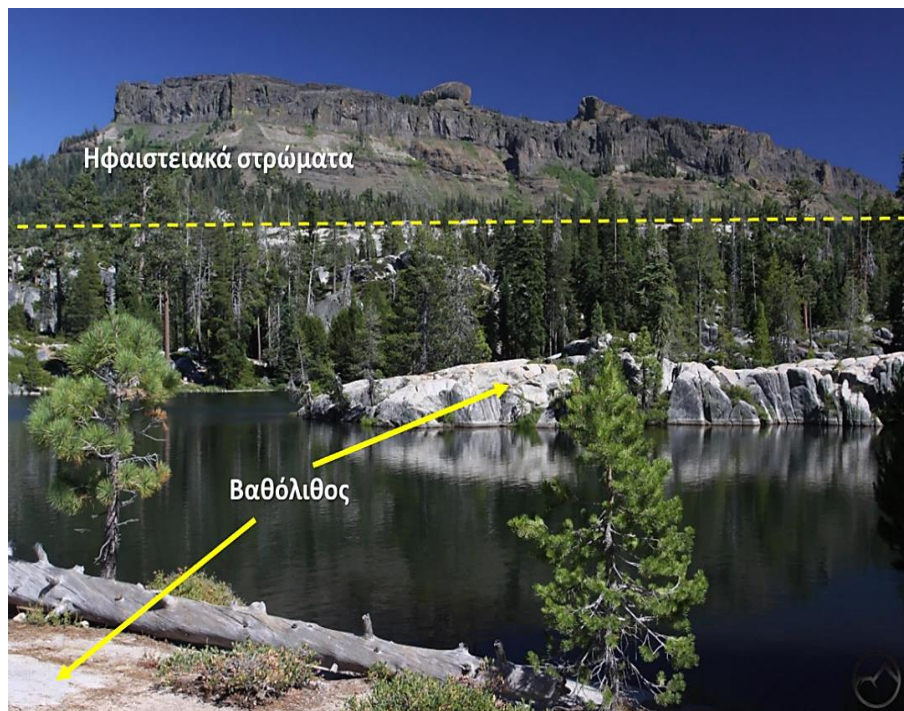
#### 3.3.1 Η γεωλογία, ο σχηματισμός και η εξέλιξη της Sierra Nevada

Η οροσειρά χωρίζεται στο βόρειο, κεντρικό και νότιο τμήμα με βάση γεωλογικά κριτήρια. Η νότια Sierra Nevada είναι το μεγαλύτερο σε έκταση και το πιο γνωστό τμήμα της οροσειράς με πληθώρα εθνικών πάρκων, όπως το Yosemite, το Sequoia και το Kings Canyon. Η μεγαλύτερη έκταση του νοτίου τμήματος καταλαμβάνεται από τον ανοιχτόχρωμο Μεσοζωικό βαθόλιθο (**Εικόνα 3.8**). Παρόμοια γεωλογία με την νότια έχει και η κεντρική Sierra Nevada, όμως Υπερκείμενα του λευκού γρανίτη απαντώνται σκουρόχρωμα στρώματα από ηφαιστειακές λασπορροές – λαχάρ (**Εικόνα 3.9**).

Στη βόρεια Sierra Nevada βρίσκεται η λίμνη Tahoe, η μεγαλύτερη αλπική λίμνη της Αμερικής. Γεωλογικά, η περιοχή αυτή είναι αρκετά διαφοροποιημένη από το νότιο τμήμα της οροσειράς αποτελούμενη κυρίως από μεταϊζηματογενή πετρώματα κερατίτες, μάρμαρα, σχιστόλιθοι, πυριτόλιθοι και χαλαζίτες του Παλαιοζωικού με διεισδύσεις μικρότερων γρανιτικών σωμάτων και υπερκείμενες ροές λάβας. Στη βόρεια Sierra Nevada υπάρχουν περισσότερες ενδείξεις παλαιοζωικής ηφαιστειότητας από ό,τι στην κεντρική και νότια (**Norris Webb, 1990**). Η γεωλογία στην βόρεια Sierra Nevada είναι παρόμοια με αυτή των βουνών Klamath στην ΒΔ Καλιφόρνια, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι αυτές οι οροσειρές ήταν κάποτε ενιαίες.



Εικόνα 3.8. Γεωλογικός χάρτης που δείχνει την έκταση του βαθόλιθου της Sierra Nevada μαζί με τα ηφαιστειακά της πετρώματα (QGIS).



Εικόνα 3.9. Φωτογραφία με την επαφή του ανοιχτόχρωμου βαθόλιθου και των σκουρόχρωμων ηφαιστειακών στην κεντρική Sierra Nevada κοντά στην περιοχή Carson- Iceberg Wilderness (NPS).

Η οροσειρά της Sierra Nevada είναι μια ηφαιστειακή οροσειρά που σχηματίστηκε πριν 100 Ma όταν η πλάκα Farallon βυθίστηκε κάτω από την Β. Αμερική. Με τον



τερματισμό της υποβύθισης τα στρωματοηφαίστεια που είχαν σχηματιστεί άρχισαν να διαβρώνονται με ραγδαίους ρυθμούς και σήμερα πλέον οι μαγματικοί θάλαμοι αυτών των ηφαιστείων έχουν αποκαλυφθεί ως βαθόλιθοι. Η σημερινή μορφή της Sierra Nevada οφείλεται σε έναν συνδυασμό έντονων ενδογενών και εξωγενών παραγόντων. Οι παγετώνες διάβρωσαν σε βάθος τα πετρώματα της οροσειράς και δημιούργησαν τα απότομα φαράγγια και τις κοιλάδες, όπως στο Yosemite.

Τα παλαιότερα πετρώματα στη Sierra Nevada είναι τα μεταϊζηματογενή πετρώματα του Καμβρίου κοντά στο όρος Morrison και αποτελούνται από σκουρόχρωμους κερατόλιθους, σχιστόλιθους και μάρμαρα (**Stevens C. H., 2000**). Γενικά τα παλαιότερα πετρώματα (**Εικόνες 3.10-13**) βρίσκονται στους δυτικούς πρόποδες της οροσειράς και ανατολικά του Sierra Crest. Ο παλαιότερος γρανίτης της οροσειράς άρχισε να σχηματίζεται ήδη κατά το Τριαδικό στα πρώτα στάδια της Νεβάδιας ορογένεσης. Τα παλαιότερα πλουτωνικά πετρώματα σχηματίστηκαν στα δυτικά, ενώ τα νεότερα στα ανατολικά της οροσειράς.



**Εικόνα 3.10.** Πτυχωμένα πετρώματα του Παλαιοζωικού στο Convict Canyon (S. Richardson).



**Εικόνα 3.11.** Πτυχωμένα στρώματα θαλάσσιων ιζημάτων – κερατόλιθοι που έχουν υποστεί μεταμόρφωση δυτικά του El Portal (Huber N. K., 1987).



**Εικόνα 3.12.** Μεταμορφωμένα πετρώματα στα οποία έχει διατηρηθεί η στρώση κοντά στην λίμνη Saddlebag. Η κλίση των στρωμάτων είναι προς τα ΒΔ κάθετα στις συμπίεστικές τάσεις (John P. Lockwood).



**Εικόνα 3.13.** Έντονα πτυχωμένα πετρώματα κοντά στις λίμνες Spotted (John P. Lockwood).

Στο Κρητιδικό, όταν σχηματίστηκε η ζώνη καταβύθισης της Farallon στην άκρη της ηπείρου το μάγμα ανήλθε και ψύχθηκε σχηματίζοντας τους πλουτωνίτες του βαθόλιθου. Παρόμοιας σύστασης πλουτωνικά πετρώματα του ίδιου μάγματος δόμησαν τις οροσειρές Transverse, Peninsular αλλά και τα διάφορα πλουτωνικά και



ηφαιστειακά κέντρα στην έρημο Mojave. Το γρανιτικό μάγμα σχηματίστηκε σε βάθη περίπου 25-45 km στον κατώτερο φλοιό, εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας από τις διασπάσεις ραδιενεργών στοιχείων που υπήρχαν στο μεγάλο πάχος πρίσμα επαύξησης του φλοιού (**Bateman P. C et al., 1967**). Η άνοδος του μάγματος έγινε σε πολλά διαφορετικά επεισόδια με κορύφωση την περίοδο μεταξύ 115-87 Ma (**Schoenherr A. A., 2017**). Η έντονη διάβρωση μετά από κάθε μαγματικό επεισόδιο είχε σαν αποτέλεσμα από το Ιουρασικό μέχρι και σήμερα να διαβρωθούν πάνω από 10-12 km γρανίτη (**Bateman P. C. et al., 1967**). Την ίδια περίοδο του Κρητιδικού ανατολικά της Sierra Nevada σχηματίστηκε το οροπέδιο Nevadaplano, που αποτελούνταν από κλειστές λεκάνες και καλδέρες ηφαιστειών από τις εκρήξεις των οποίων το οροπέδιο καλύφθηκε από ιγνιμβρίτες.

Η εφελκυστική τεκτονική του Μειοκαίνου προκάλεσε την κατάρρευση και τον διαμελισμό του οροπεδίου Nevadaplano (**Ernst W. G., 2009**), την αποκάλυψη των γρανιτικών πετρωμάτων (16 Ma) και την επέκταση του φλοιού στο Basin & Range που προκάλεσε εκ νέου ηφαιστειότητα στην Sierra. Η Sierra Nevada άρχισε να ανυψώνεται με ταχείς ρυθμούς από 0,14 mm/έτος στο Ύστερο Μειόκαινο σε 0,44 mm/έτος στο Ύστερο Πλειόκαινο και Πλειστόκαινο. Η απότομη ανύψωση της οφείλεται στην προς τα δυτικά κλίση του τεμάχους Sierran, που βρισκόταν μεταξύ των Παράκτιων οροσειρών και του Basin & Range. Η ανύψωση από την περιστροφή του τεμάχους εκτιμάται περίπου στα 850 m κατά το ύστερο Μειόκαινο και στα 1750 m από Πλειόκαινο έως σήμερα (**Jayko A. S., 2009**). Η ανύψωση συνεχίζεται εξαιτίας των ρηγμάτων κατά μήκος της ανατολικής πλευράς στη νότια Sierra Nevada. Οι μεγάλοι σεισμοί που συμβαίνουν στα κανονικά ρήγματα προκαλούν κατακόρυφες μετατοπίσεις, όπως ο σεισμός  $M_w=7.2$  στο Lone Pine το 1872 με κατακόρυφη ανύψωση πάνω από 5 m (**Hauksson E. et al., 2021**).

Την περίοδο του Πλειστοκαίνου οι παγετώνες διάβρωσαν μεγάλο όγκο των γρανιτικών πετρωμάτων και πάνω σε αυτό απέθεσαν τιλλίτες και σχημάτισαν αναρίθμητες φυσικές λίμνες και τις χαρακτηριστικές παγετώδεις κοιλάδες σχήματος U (**Εικόνες 3.14-18**). Η παγετώδης γεωμορφολογία είναι εντονότερη προς τα νότια της οροσειράς. Ο συνδυασμός παγετώδους και ποτάμιας διάβρωσης απομάκρυνε τα υπερκείμενα πετρώματα και αποκάλυψε υπολείμματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων του Παλαιοζωικού αλλά και τα βαθύτερα τμήματα των παλαιο-ηφαιστειών, που σήμερα θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν τους μαγματικούς θαλάμους των ηφαιστειών του τόξου.



**Εικόνα 3.14.** Γραμμές προστριβής από παγετώδη διάβρωση στον δόμο Statley Pleasure Dome. Η διεύθυνση κίνησης του παγετώνα είναι παράλληλη με τις γραμμώσεις (Greg Stock, Yosemite NP).

**Εικόνα 3.15.** Παγετώδεις ραβδώσεις και ημισελινοειδείς αυλακώσεις πάνω στον γρανοδιορίτη. Τα άκρα των αυλακώσεων δείχνουν την διεύθυνση κίνησης του παγετώνα και συνήθως γεμίζουν με λεπτόκοκκα υλικά (Greg Stock, Yosemite NP).



**Εικόνα 3.16.** Κοιλιάδες σχήματος U χαρακτηριστικές της παγετώδους διάβρωσης των αλπικών παγετώνων στο φαράγγι Parker Creek. Κατά την υποχώρησή του ο παγετώνας αποθέτει τις μοραίνες (Greg Stock, Yosemite NP).

**Εικόνα 3.17.** Παχύ στρώμα με αποθέσεις τιλλιτών κοντά στην λίμνη Siesta. Οι τιλλίτες είναι ένα αταξινόμητο μείγμα ογκόλιθων, άμμου και ιλύος, το οποίο απέθεσαν οι παγετώνες κατά την μετακίνησή τους (Huber, N. K.).



**Εικόνα 3.18.** Οι παγετώνες σχημάτισαν στον δόμο Pothole του γρανοδιορίτη Cathedral ένα ruche moutounnée, δηλαδή μια παγετώδη γεωμορφή που σχηματίστηκε όταν ο παγετώνας πέρασε πάνω από τον δόμο. Αποτέλεσμα της διάβρωσης ήταν οι ασύμμετρες πλευρές με την απότομη πλευρά να δείχνει την κατεύθυνση του παγετώνα (Greg Stock, Yosemite NP).

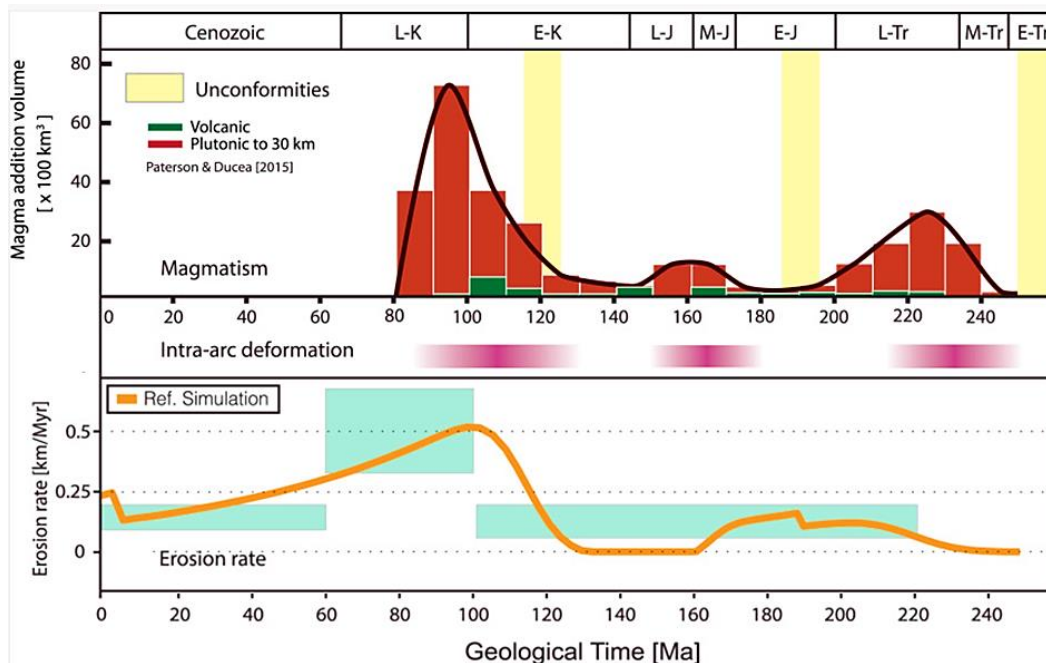
Στην περίπτωση της Sierra Nevada, μιας ορογενετικής ζώνης με επεισοδιακή ανύψωση, ενδιαφέρον έχει το μοντέλο ισοζυγίου μάζας και ισοστασίας που συνδέει την τεκτονική παραμόρφωση, τον μαγματισμό και την διάβρωση των επιφανειακών πετρωμάτων. Το μοντέλο των **Cao & Paterson, 2016 (Εικόνα 3.19)**, που βασίστηκε σε ποσοτικές αναλύσεις που έγιναν σε περιοχή της κεντρικής Sierra Nevada έδειξε ότι η πάχυνση που οφείλεται στην παραμόρφωση είναι διπλάσια αυτής που οφείλεται σε μαγματισμό και ότι ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται με το μέγεθος της πάχυνσης. Η παραπάνω διαπίστωση βοηθά να κατανοήσουμε την εξέλιξη των ηπειρωτικών τόξων και των ορογενετικών ζωνών και γενικότερα τον τρόπο μεταφοράς των ηπειρωτικών μαζών μέσα στα στρώματα της λιθόσφαιρας. Η εξίσωση ισοζυγίου μάζας σε μια στήλη φλοιού:

$$H = \text{Μαγματισμός} + \text{Παραμόρφωση} - \text{Διάβρωση}$$

- Όπου H είναι το πάχος του φλοιού και ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση από την επιφάνεια της Γης έως την ασυνέχεια 1<sup>ης</sup> τάξης Moho, όπου οι πυκνότητες των πετρωμάτων και οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλονται απότομα.



- Μαγματισμός από διαφοροποιημένα τήγματα του μανδύα που διεισδύουν στον φλοιό και προκαλούν μαγματική πάχυνση.
- Η παραμορφωτική πάχυνση προκαλείται από την τεκτονική συστολή
- Η διάβρωση αφαίρει υλικό από τα επιφανειακά στρώματα και μειώνει το πάχος του φλοιού.



**Εικόνα 3.19.** Από διαγράμματα προκύπτουν τρία επεισοδιακά γεγονότα με υψηλό ρυθμό μαγματισμού και συνδέονται χρονικά με τρεις σημαντικές παραμορφωτικές φάσεις. Το μοντέλο μας ευνοεί τη μέτρια πάχυνση του φλοιού στο Τριαδικό και τη λέπτυνση του φλοιού του Ιουρασικού, ακολουθούμενη από μια ισχυρή πάχυνση του φλοιού του Κρητιδικού, η οποία οδηγεί σε φλοιό πάχους ~70 km (Paterson & Ducea, 2015, Cao et al., 2015)..

### 3.3.2 Ο βαθόλιθος της Sierra Nevada

Ο βαθόλιθος (ή βαθύλιθος) είναι ένα σύμπλεγμα πλουτωνιτών τεραστίων διαστάσεων κυρίως γρανιτικής-γρανοδιοριτικής σύστασης που έχει σχηματιστεί σε μεγάλα βάθη μέσα στον φλοιό και συνήθως καλύπτει γεωγραφικά μεγάλες εκτάσεις. Οι βαθόλιθοι συνιστούν πυρήνες μεγάλων οροσειρών όπως συμβαίνει και στην Sierra Nevada και λόγω διάβρωσης των υπερκείμενων στρωμάτων αποκαλύπτονται διάφορα απομονωμένα μαγματικά σώματα που μπορεί να έχουν ακανόνιστο σχήμα ή την χαρακτηριστική θολοειδή μορφή οπότε και ονομάζονται δόμοι (**Εικόνα 3.20**). Αποτελούνται από διάφορα διεισδυτικά σώματα καθένα εκ των οποίων έχει διακριτά πετρογραφικά γνωρίσματα και σε ορισμένα από αυτά γίνεται αντιληπτή η παρουσία εγκλεισμάτων, επιφανειών απόψυξης και οι αποφύσεις των νεότερων μελών που διεισδύουν στα παλιότερα (**Εικόνες 3.21-25**).





Εικόνα 3.20. Δόμοι Κρητιδικής ηλικίας στον βαθόλιθο της Sierra Nevada (James St. John).



Εικόνα 3.21. Διακλάσεις χαλάρωσης σε δόμο, λόγω αφαίρεσης υπερκείμενου υλικού από διάβρωση και μείωση της κατακόρυφης συμπίεσης (Ray Thompson).

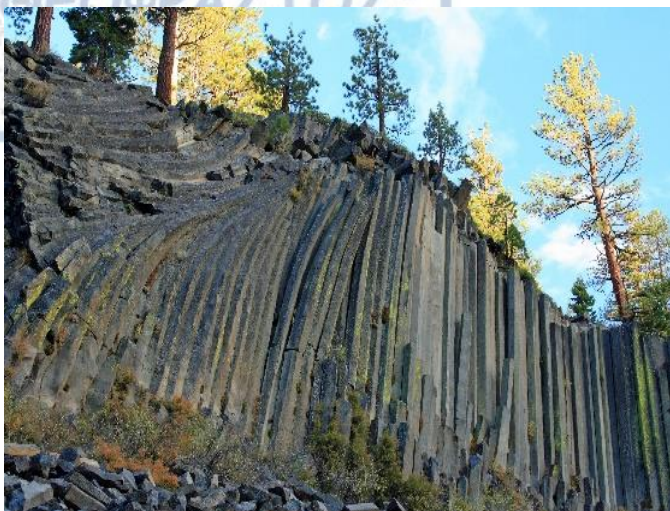
Εικόνα 3.22. Δόμος στο Yosemite που διατρέχεται από απλιτικές φλέβες (Felix Wong).



Εικόνα 3.23. Σκουρόχρωμο έγκλεισμα διορίτη στον πλουτωνίτη El Capitan (Greg Stock, Yosemite NP).

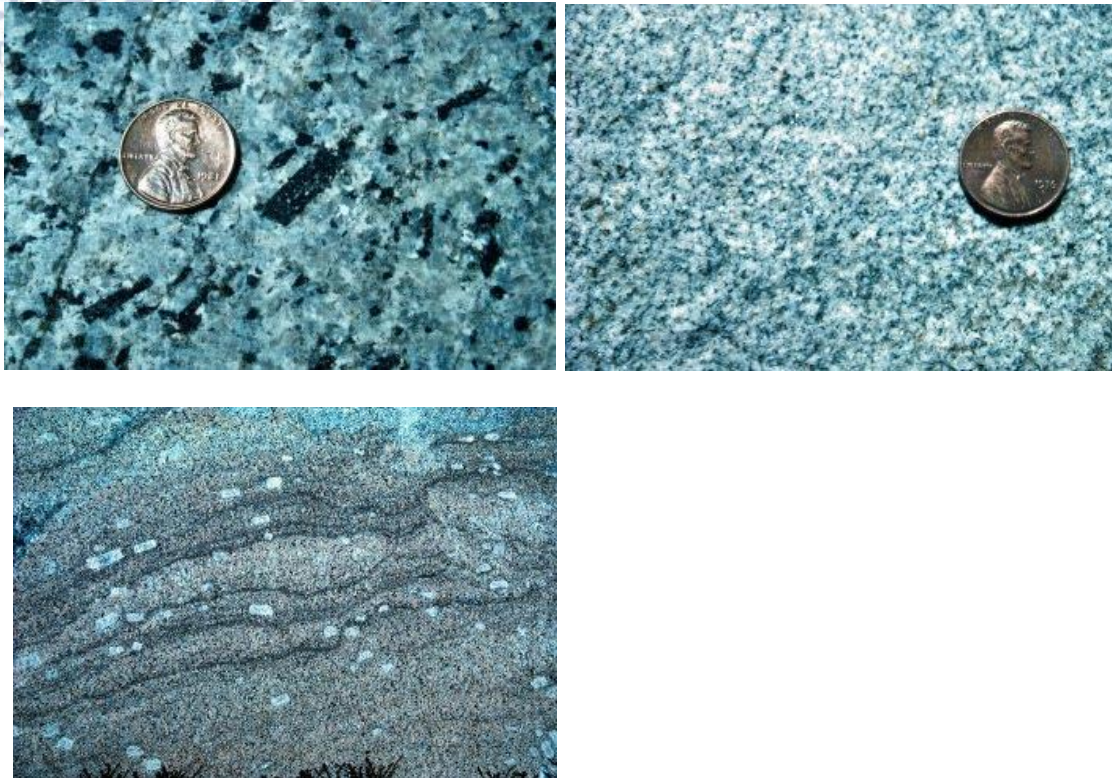
Εικόνα 3.24. Οι κάθετα διασταυρούμενες διακλάσεις σχηματίζουν ορθογώνια μπλοκ στον πλουτωνίτη El Capitan (Huber, USGS).





*Εικόνα 3.25. Οι διάσημες στηλοειδείς καταμήσεις βασάλτη στο Devils Postpile. Σε περιοχή πάνω από τον βαθόλιθο της Sierra Nevada έρεε βασαλτική λάβα μεγάλου πάχους από το Upper Soda Springs και η ψύξη ήταν αργή και συμμετρική. Αποτέλεσμα ήταν ο σχηματισμός των βασαλτικών στηλών κάθετα στην επιφάνεια ψύξης που φτάνουν σε ύψος μέχρι και τα 180 m και ο σχηματισμός δγωνικών επιφανειών (Frank Kovalchek).*

Ο βαθόλιθος της Sierra Nevada έχει πετρολογική σύσταση γρανίτη έως τοναλίτη. Ο βαθόλιθος σχηματίστηκε βαθιά μέσα στον φλοιό της Γης υπό συνθήκες υψηλής περιβαλλοντικής ή λιθοστατικής πίεσης, όμως λόγω των τεκτονικών διεργασιών και της διάβρωσης βρίσκεται στην επιφάνεια. Από τη χρονολόγηση των ισοτοπικών ηλικιών συνάγεται επίσης ότι ο μαγματισμός έγινε σε πολλαπλά επεισόδια με εξάρσεις, οι οποίες μπορούν να εξηγήσουν τις δεκάδες διαφορετικές συνθέσεις των επιμέρους πλουτωνιτών (**Εικόνα 3.26**), που όλοι μαζί συνθέτουν τον βαθόλιθο της Sierra Nevada. Μέσα στον γεωλογικό χρόνο σχηματίστηκαν πλουτωνίτες με διαφορετική σύσταση, γεωχημεία και ηλικία και όλοι μαζί συνέθεσαν τον βαθόλιθο της οροσειράς που καλύπτει μια τεράστια έκταση. Υπάρχουν περίπου 35 καλά καθορισμένοι πλουτωνίτες μόνο στην περιοχή του Yosemite και πάνω από 200 σε ολόκληρη την οροσειρά. Οι παλαιότεροι πλουτωνίτες εντοπίζονται στην δυτική πλευρά της οροσειράς και οι νεότεροι στην ανατολική (**Unger T.S, 1999**). Οι πλουτωνίτες γρανιτικής σύστασης σχηματίστηκαν από μάγμα που ψυχόταν αργά για πολλά εκατομμύρια χρόνια και αυτή η αργή ψύξη είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη ευμεγεθών κρυστάλλων μέσα σε αυτούς. Η διαφορετική γεωχημεία του βαθόλιθου γίνεται αντιληπτή και από την βλάστηση, καθώς περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις σε φωσφόρο ευνοούν σημαντικά τη βλάστηση από ό,τι περιοχές με μικρότερες συγκεντρώσεις που είναι πιο άγονες (**Hahn W. J. et al., 2014**). Η παρουσία βλάστησης σε ορισμένες περιοχές του γρανίτη και όχι σε άλλες είναι ενδεικτική των διαφορών εντός του μητρικού πετρώματος που μπορεί να φαίνεται ομοιόμορφο μακροσκοπικά αλλά έχει διαφορετικές συγκεντρώσεις σε Si, Fe, Al, Mg, K, Ca και P.



**Εικόνα 3.26.** Διαφοροποιήσεις στην σύσταση του βαθόλιθου της Sierra Nevada. Αριστερά δείγμα από τον γρανοδιοριτικό δόμο Half Dome με μεγάλους κρυστάλλους κερυστίλβης. Δεξιά δείγμα από τον γρανοδιοριτή Bridalveil με σαφώς μικρότερους κρυστάλλους ορυκτών. Κάτω αριστερά ο πορφυριτικός γρανίτης Johnson με φαινοκρυστάλλους καλιούχων αστρίων 5cm. Κατά την μερική τήξη τα μαφικά ορυκτά απέκτησαν διάταξη schlieren και οι καλιούχοι άστριοι είναι προσανατολισμένοι με τον μεγάλο άξονα τους. Αν και η απόσταση μεταξύ των πλουτωνικών πετρωμάτων είναι μικρή η πετρολογική τους σύσταση διαφέρει (Huber, USGS).

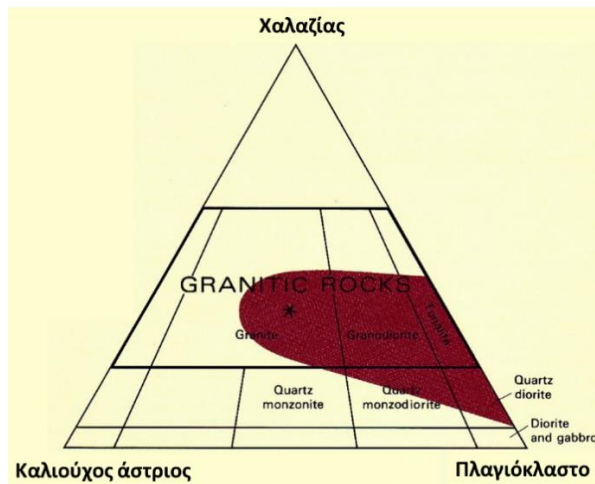
### 3.3.2.1 Ο βαθόλιθος στην κοιλάδα Yosemite

Το εθνικό πάρκο Yosemite φιλοξενεί τους περισσότερους δόμους πλουτωνίτη Κρητιδικής ηλικίας από οποιοδήποτε άλλο μέρος στον πλανήτη. Οι παραπάνω δόμοι σχηματίστηκαν από την διείσδυση γρανιτικού μάγματος μέσα στον φλοιό που ανύψωσε τμήματα της επιφάνειας σχηματίζοντας θόλους από γρανίτη. Τα κάποτε υπάρχοντα ηφαιστειακά πετρώματα στην πλειονότητα τους διαβρώθηκαν κατά την διάρκεια της ανύψωσης και έκθεσης του βαθόλιθου. Η περιοχή της κοιλάδας Yosemite αποτελείται κυρίως από τον ανοιχτόχρωμο πλουτωνίτη (**Εικόνα 3.27**) αν και συναντώνται και κάποια ηφαιστειακά πετρώματα. Οι ηλικίες τους προσδιορίστηκαν ραδιομετρικά μετρώντας τις αναλογίες ισότοπων U-Pb, Rb-Sr και K-Ar.

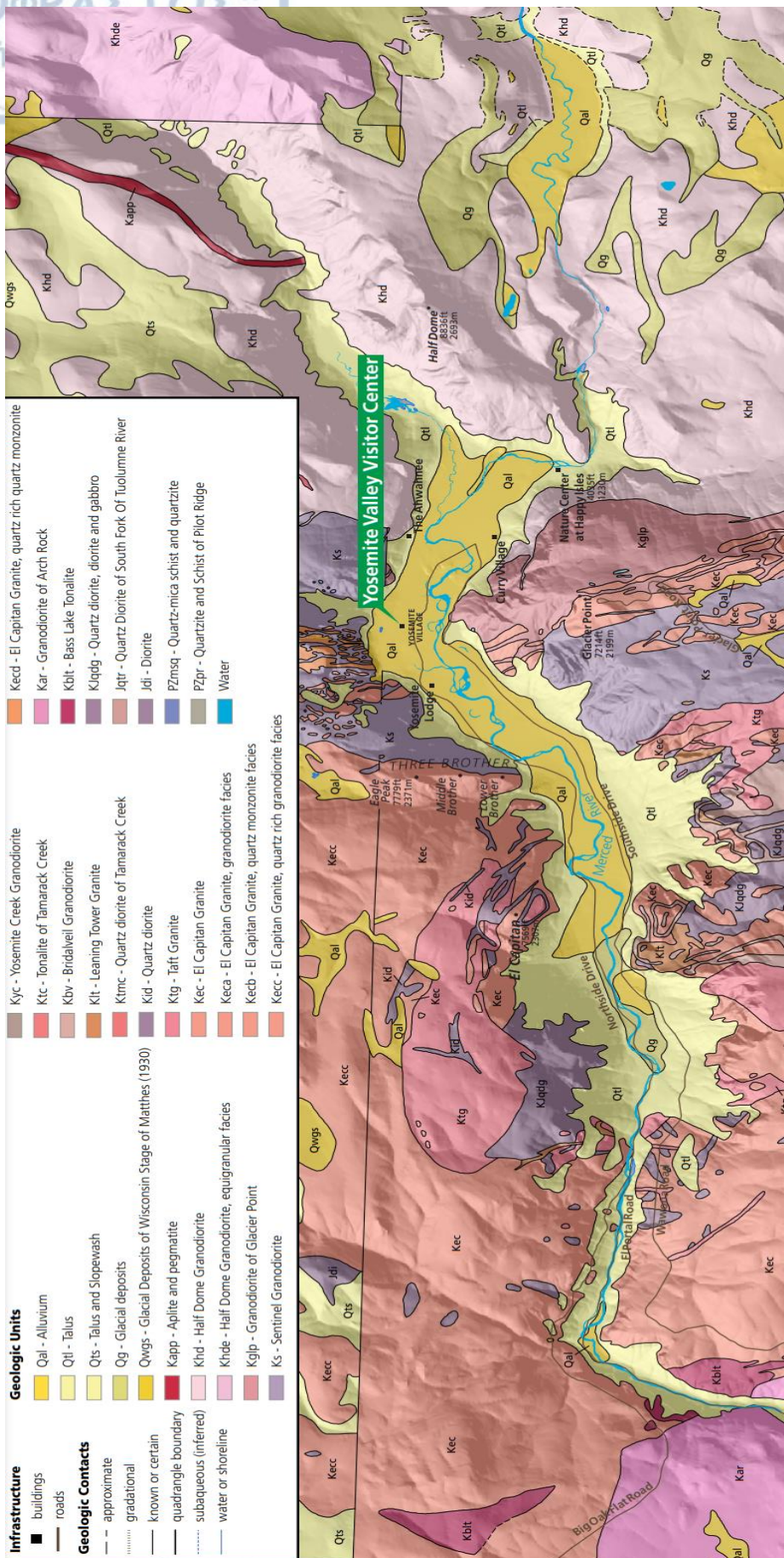
Ο πιο γνωστός δόμος είναι ο Half Dome που αποτελεί και ορόσημο του εθνικού πάρκου Yosemite και είναι γνωστός με αυτό το όνομα εξαιτίας του σχήματος του. Πρόκειται για δόμο ύψους 2.694 m από τον οποίο φαίνεται να λείπει σχεδόν το μισό του κομμάτι από την ΒΔ πλευρά. Αυτό το χαρακτηριστικό του σχήμα οφείλεται στην δράση των παγετών. Με την κίνηση τους μέσα στην κοιλάδα κατάφεραν να διαβρώσουν και να μεταφέρουν σχεδόν το 20 % του σχηματισμού με αποτέλεσμα σήμερα να φαίνεται μια εντελώς λειασμένη απότομη πλευρά, ενώ οι υπόλοιπες είναι ομαλές και αποστρογγυλεμένες. Η διάβρωση των σχηματισμών κοντά στην επιφάνεια μειώνει τις πιέσεις που αυτοί δέχονται και εμφανίζουν διακλάσεις χαλάρωσης.



Είναι δόμος γρανοδιορίτη που βρίσκεται στην κοιλάδα Yosemite. Ο γρανοδιορίτης αυτός ανήκει στην ακολουθία Tuolumne, μια από τις 4 μαγματικές επαρχίες που βρίσκονται στην Sierra Nevada. Η ακολουθία πλουτωνικών πετρωμάτων Tuolumne είναι η νεότερη και η πιο εκτεταμένη στην κοιλάδα Yosemite καταλαμβάνοντας το 1/3 της έκτασης της. Όσον αφορά τα πετρώματα που εντάσσονται σε αυτή είναι κυρίως γρανίτες, πορφυροειδείς γρανίτες και γρανοδιορίτες. Ο γρανοδιορίτης αποτελείται από 25 % χαλαζία, 15% καλιούχους αστρίους, 45% πλαγιόκλαστο, 8% βιοτίτη και 5% κεροσιλίτη. Από επουσιώδη ορυκτά υπάρχει τιτανίτης και ζιρκόνιο και από μεταλλικά ορυκτά ο μαγνητίτης. Ασυνήθιστα μεγάλοι είναι οι κρύσταλλοι των K-αστρίων μέχρι και 6,5 cm στον γρανοδιορίτη του Cathedral Peak. Από ραδιοχρονολογήσεις που έγιναν σε δείγματα του γρανοδιορίτη προκύπτει ότι η ηλικία του είναι Άνω Κρητιδική μεταξύ 85 - 83,4 Ma και είναι το νεότερο πλουτωνικό σώμα στην κοιλάδα Yosemite.



*Εικόνα 3.27. Απεικόνιση της πετρολογικής σύστασης του πλουτωνίτη του Yosemite σε τριγωνικό διάγραμμα. Από το διάγραμμα προκύπτει σύσταση κυρίως γρανοδιορίτη. Μακροσκοπικό δείγμα του γρανοδιορίτη Half Dome (Huber N. K., 1987).*



Γεωλογικός χάρτης με τους διαφορετικούς τύπους πλουτωνίων της κοιλιάς Yosemite (Yosemite National Park California)



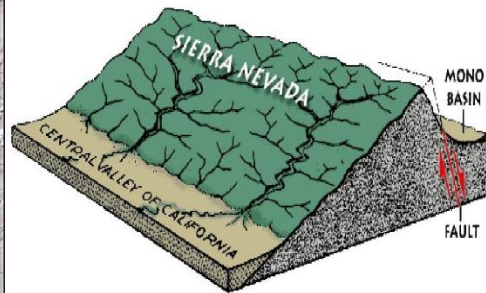
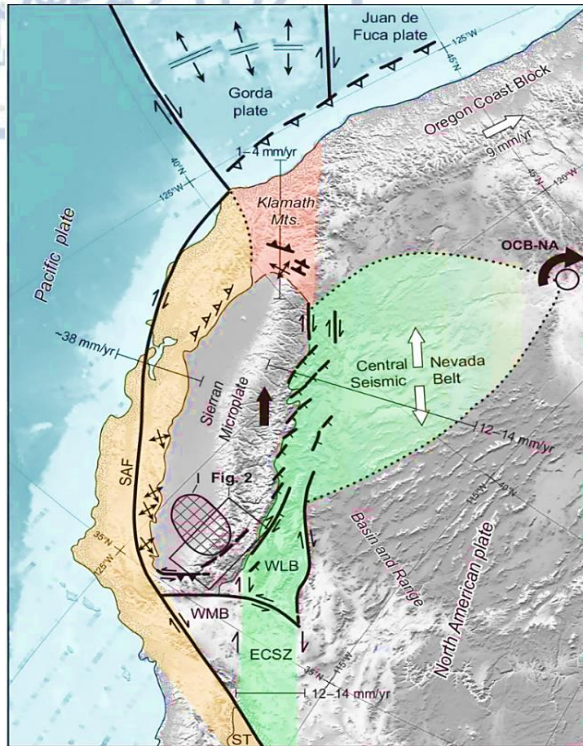
### 3.3.3 Το τέμαχος Sierra Nevada – Great Valley (SNGV Block)

Το τέμαχος Sierran (ή SNGV) (**Εικόνα 3.28**) είναι ένα μεγάλο τμήμα του φλοιού που περιλαμβάνει την περιοχή μεταξύ της Κεντρικής κοιλάδας της Καλιφόρνια και του ρήγματος της Sierra Nevada (SSN), που εμφανίζει μια απότομη ρηξιγενή επιφάνεια (*Sierran Escarpment*). Τα συστήματα ρηγμάτων San Andreas και Garlock καθορίζουν τα δυτικά και νότια άκρα του μπλοκ, αλλά δεν είναι εύκολα αναγνωρίσιμα τέτοια χαρακτηριστικά προς τα βόρεια και ανατολικά, κατά μήκος της ζώνης (**Kreemer C. et al., 2006**). Το τέμαχος SNGV αναφέρεται συχνά και ως μικροπλάκα της Sierra Nevada ή Sierran καθώς φαίνεται να είναι ένα συμπαγές ηπειρωτικό τέμαχος προσκολλημένο στην πλάκα της Β. Αμερικής. Η κίνηση του τεμάχους-μικροπλάκας είναι προς τα ΒΔ με ταχύτητα 11 mm/έτος (**Argus D. F. & Gordon R. G., 1991**), ενώ το υπόλοιπο της Β. Αμερικάνικης πλάκας κινείται προς τα ΝΔ με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ζώνη σύγκλισης με ανάστροφα ρήγματα χαμηλής γωνίας κλίσης που ανυψώνουν τις παράκτιες οροσειρές στην Καλιφόρνια. Η παραμόρφωση της ζώνης Walker Lane εξαπλώνεται προς τα ανατολικά στην σεισμική ζώνη της κεντρικής Νεβάδα και αναγκάζει το τέμαχος του Oregon να κινηθεί προς βορρά και να διαγράψει δεξιόστροφη περιστροφική κίνηση γύρω από τον πόλο OCB-NA (**Argus D. F. & Gordon R. G., 2001**).

Η ζώνη Walker Lane είναι μια ζώνη παραμόρφωσης-διάτμησης στην οποία παρατηρείται μια δεξιόστροφη κίνηση 12 mm/έτος μεταξύ αυτής και της Β. Αμερικής. Τα ρήγματα της ζώνης είναι δεξιόστροφα και παράλληλα με το ρήγμα του Αγίου Αντρέα. Η ζώνη φιλοξενεί το 25% σχετικής κίνησης μεταξύ των πλακών του Ειρηνικού και της Βόρειας Αμερικής (**Oldow J. S., 2001**). Κινηματικά στοιχεία που βασίζονται σε παλαιομαγνητικά δεδομένα δείχνουν ότι η κίνηση του τεμάχους SNGV πριν από 16-10 Ma ήταν κυρίως δυτική με ρυθμό >20 mm/έτος, ενώ πριν από 10-8 Ma η κίνηση γίνεται ΒΔ με ρυθμό 15 mm/έτος (**Wernicke B. & Snow J. K., 1998**).

Ο πυρήνας του τεμάχους SNGV δομείται από τον ίδιο βαθόλιθο της Sierra Nevada. Η κλίση του τεμάχους προς τα δυτικά οφείλεται αφενός στο μεγάλο πάχος των ιζημάτων που αποτίθενται συνεχώς στην κοιλάδα της Καλιφόρνια στα δυτικά και αφετέρου στην μεγαλύτερη 'πλευστότητα' λόγω μικρότερης πυκνότητας που έχει το ανατολικό τμήμα του τεμάχους. Η μικρότερη πυκνότητα οφείλεται στην μεγάλη ροή θερμότητας που συναντάται στην περιοχή εξαιτίας της έκτασης και λέπτυνσης του φλοιού στο Basin & Range.





**Εικόνα 3.28.** Αριστερά : Η μικροπλάκα Sierran βρίσκεται μεταξύ των ρηξιγενών ζωνών του Αγίου Αντρέα στα δυτικά και της διατμητικής ζώνης Walker Lane-ECSZ, εκτελώντας κίνηση προς τα ΒΑ (Argus and Gordon, 2001). Δεξιά : Απεικόνιση του τεμάχους SNGV με το ρήγμα SSN (USGS).

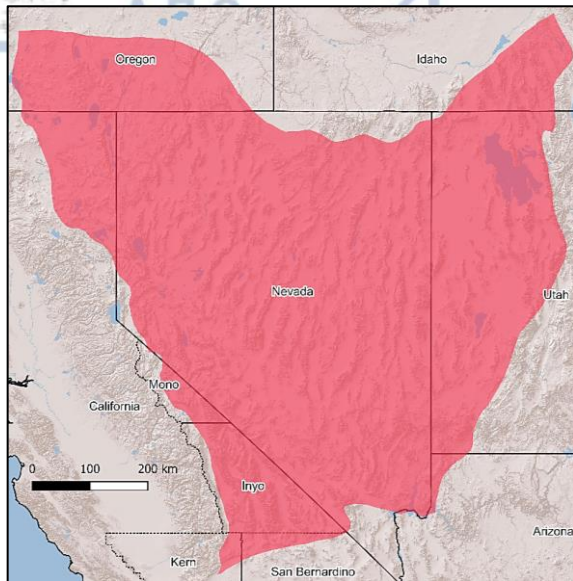
Το ρήγμα Southern Sierra Nevada (SSN) είναι ένα ενεργό κανονικό ρήγμα μεγάλης κλίσης που βυθίζεται προς τα ανατολικά. Το ρήγμα μήκους 203 km εντοπίζεται κατά μήκος της ΝΑ πλευράς της οροσειράς και σχηματίζει την απότομη ρηξιγενή επιφάνεια γνωστή ως 'Sierra Escarpment' (**Εικόνα 3.29**). Το άνω τέμαχος κατέρχεται και στην οροφή του σχηματίζεται η τεκτονική λεκάνη Μονο, ενώ το κάτω τέμαχος του ρήγματος ανέρχεται και ανυψώνει κυρίως την ΝΑ πλευρά της οροσειράς για αυτό και εκεί παρατηρούνται τα μεγαλύτερα υψόμετρα. Χρονολόγηση των ρηξιγενών επιφανειών του ρήγματος με βηρύλλιο-10 έδειξε ρυθμό ανύψωσης 0,2-0,3 mm/έτος (Le K. et al., 2007). Δεν έχουν αναφερθεί κατά τους ιστορικούς χρόνους μεγάλοι σεισμοί που να σχετίζονται με την δράση του.



**Εικόνα 3.29.** Αεροφωτογραφία με την ΝΑ πλευρά της Sierra Nevada. Το κανονικό ρήγμα SSN ανυψώνει την οροσειρά δημιουργώντας το 'Sierra Escarpment' με απότομες κλίσεις και βυθίζει την λεκάνη Μονο (G. Thomas).



### 3.4 Η οπισθοτόξια λεκάνη Basin & Range



**Εικόνα 3.30.** Αριστερά : Χάρτης που απεικονίζει την έκταση της επαρχίας Basin & Range (QGIS). Δεξιά: Αεροφωτογραφία τμήματος του Basin & Range με τις χαρακτηριστικές επιμήκεις κοιλάδες και οροσειρές (<https://www.californiatrailcenter.org/basin-and-range-geology>).

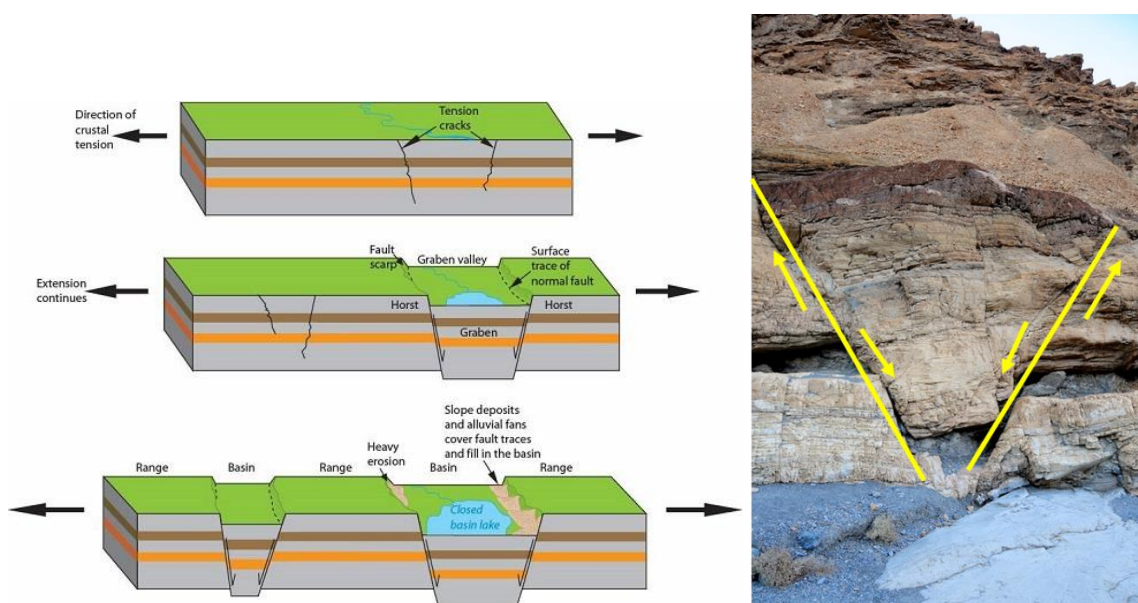
Η φυσιογραφική επαρχία Basin & Range (**Εικόνα 3.30**) εκτείνεται σε μια μεγάλη περιοχή, που καταλαμβάνει ολόκληρη την πολιτεία της Νεβάδα. Η επαρχία αυτή οριοθετείται στα ανατολικά από το οροπέδιο του Colorado, στα βόρεια από τα οροπέδια Coloumbia και Snake River, στα δυτικά από τη Sierra Nevada και εκτείνεται νότια μέχρι το βόρειο Μεξικό. Σχεδόν ολόκληρη η πολιτεία της Νεβάδα και η δυτική Γιούτα παρουσιάζουν χαρακτηριστικά της τοπογραφίας Basin & Range. Η τοπογραφία της επαρχίας Basin & Range χαρακτηρίζεται από εναλλαγές στενόμακρων οροσειρών και επιπεδωμένων λεκανών μεγάλου πλάτους. Από μετρήσεις που έγιναν υπολογίστηκε ότι οι λεκάνες απέχουν συνήθως μεταξύ τους 24-32 km (**Stewart, J. H., 1971**). Η υψομετρική διαφορά μεταξύ μιας κοιλάδας με την κορυφή μιας γειτονικής οροσειράς μπορεί να ξεπερνά τα 1.800 m ακόμη και σε μικρή απόσταση (**Εικόνα 3.31**).



**Εικόνα 3.31.** Απότομες υψομετρικές μεταβολές ανάμεσα στις οροσειρές και τις λεκάνες. Τα κανονικά ρήγματα ανυψώνουν οροσειρές εκεί όπου συγκλίνουν και ταπεινώνουν το ανάγλυφο εκεί όπου αποκλίνουν (Google Earth).

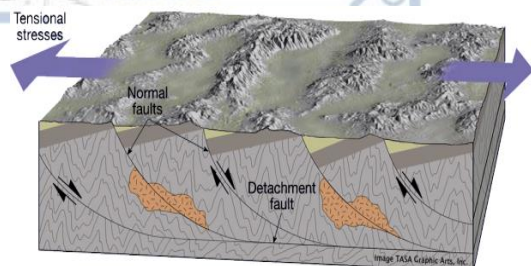
Οι επιμήκεις λεκάνες και οροσειρές σχηματίστηκαν λόγω των εφελκυστικών τάσεων, διεύθυνσης Α-Δ, που δρούσαν στην περιοχή από το Τριτογενές. Αποτέλεσμα του εφελκυσμού ήταν η λέπτυνση του φλοιού με μέσο πάχος περίπου 30-35 km (**Zandt G. et al., 1995**) και ο σχηματισμός κανονικών ρηγμάτων μεγάλης κλίσης με παράταξη περίπου Β-Ν. Από το Μειόκαινο μέχρι και σήμερα υπολογίζεται ότι η επέκταση του φλοιού σε διεύθυνση Α-Δ κυμαίνεται από 60 km στο βόρειο τμήμα της επαρχίας έως 300 km στο νότιο και πραγματοποιείται με ρυθμό 1-5 cm/έτος (**Salyards S. L. & Shoemaker E. M., 1987**).

Τα κανονικά ρήγματα σχημάτισαν τεκτονικά κέρατα και τεκτονικές λεκάνες (*grabens*), που αργότερα πληρώθηκαν από κλαστικά ιζήματα. Τεκτονικό κέρασ σχηματίζεται στο ανερχόμενο μπλοκ του ρήγματος και graben στο κατερχόμενο μπλοκ ρήγματος (**Εικόνα 3.32**). Σε περιοχές όπου πραγματοποιείται ενδοηπειρωτική έκταση τα εφελκυστικά συστήματα σχετίζονται επιπλέον με περιστροφή επίπεδων ρηγμάτων (*μοντέλο domino*) και με τον σχηματισμό λιστρικών ρηγμάτων. Λόγω αναθόλωσης της περιοχής από την βαρυτική κατάρρευση σχηματίζονται ρήγματα διαφυγής-detachment, τα οποία αποκαλύπτουν παλαιότερα πετρώματα του υποβάθρου με μορφή μεταμορφικού πυρήνα (**Εικόνα 3.33**). Πέραν της τεκτονικής, η έκταση του φλοιού στο Basin & Range αποδεικνύεται και από γεωφυσικά-σεισμολογικά δεδομένα όπως, η ασυνήθιστα μεγάλη θερμική ροή που είναι τριπλάσια της κανονικής σε ηπειρωτικό φλοιό, η σεισμικότητα πάνω σε κανονικά ρήγματα και οι χαμηλές ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων λόγω θέρμανσης.



**Εικόνα 3.32. Αριστερά :** Εξέλιξη σχηματισμού των τεκτονικών κερμάτων και λεκανών από την δράση κανονικών ρηγμάτων (NPS). **Δεξιά :** Κανονικά ρήγματα σχηματίζουν τεκτονικό κέρασ στο Mosaic Canyon, Death Valley (Haakon Fossen).





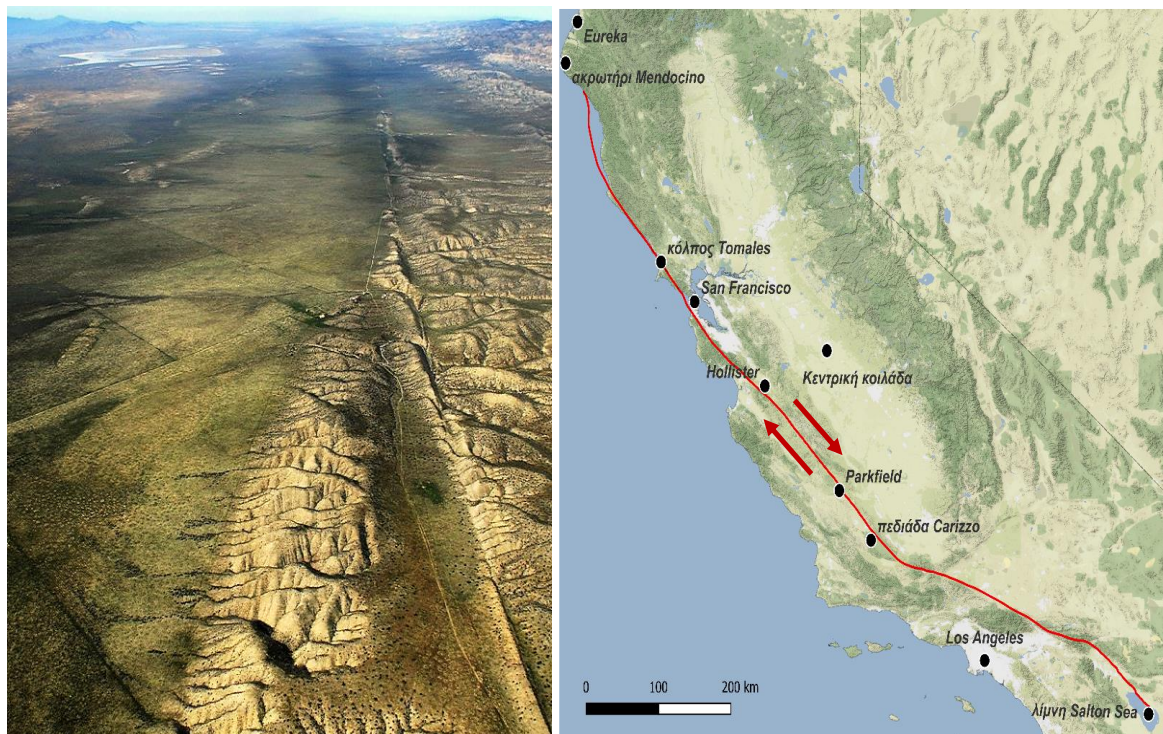
**Εικόνα 3.33.** *Αριστερά :* Σχηματισμός των ρηγμάτων *detachment* σε περιβάλλον εφελκυσμού. Ανάμεσα στις επιφάνειες διαφυγής σχηματίζονται μωλωνιτικές ζώνες (USGS). *Δεξιά :* Το ρήγμα *Detachment Copper Canyon* αποκαλύπτει πετρώματα βαθύτερων οριζόντων του μεταμορφικού πυρήνα, λόγω της βαρυτικής ολίσθησης των υπερκείμενων που τα κάλυπταν (Haakon Fossen).

Στην επαρχία Basin & Range συναντώνται μεγάλων διαστάσεων αλλουβιακά ριπίδια (Εικόνα) με μεγάλο πάχος υλικού. Λόγω των ξηρών συνθηκών (*Arid*) που επικρατούν ευνοείται η μηχανική αποσάθρωση και σε συνδυασμό με τα απότομα πρανή των οροσειρών, μεγάλος όγκος υλικού μεταφέρεται και αποτίθεται στις κοιλάδες. Εντός των λεκανών αποτίθενται χημικά ιζήματα που σχετίζονται με συνθήκες άνυδρες και με υψηλές θερμοκρασίες όπως εβαπορίτες και γύψοι αλλά και λιμναία ιζήματα. Τα ηφαιστειακά πετρώματα που συνδέονται με τον μαγματισμό του Τριτογενούς είναι υπερκείμενα του κρυσταλλικού υποβάθρου, που αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα Μεσοζωικής, Παλαιοζωικής, ακόμα και Προκάμβριας ηλικίας κυρίως στην έρημο Mojave. Κατά το Παλαιοζωικό το θαλάσσιο περιβάλλον στα δυτικά ήταν πιθανότατα παρόμοιο με αυτό που συναντάμε σήμερα κατά μήκος της ακτής του Κόλπου και της Φλόριντα. Βαθιά στρώματα ιζημάτων συσσωρεύτηκαν κατά τη διάρκεια της μακράς, ήρεμης περιόδου και σχημάτισαν τα εκτεταμένα ιζηματογενή πετρώματα που εκτίθενται σε όλη την περιοχή Basin and Range. Συχνά τα ίδια στρώματα πετρωμάτων μπορούν να εντοπιστούν σε μεγάλες αποστάσεις, ενισχύοντας την εικόνα μιας ευρείας, ρηχής περιοχής υφαλοκρηπίδας. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι πετρωμάτων είναι ανθρακικά πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος, που αποτελούνται από τα υπολείμματα θαλάσσιων οργανισμών. Επίσης, υπάρχουν στρώματα ψαμμίτη με άμμο που πιθανώς προήλθαν από παραλίες ή αμμόλοφους.

#### 4. Το ρήγμα του Αγίου Αντρέα

Το ρήγμα μετασχηματισμού του Αγίου Αντρέα (*San Andreas Fault-SAF*) (**Εικόνα 4**) είναι ένα από τα πιο γνωστά και καλά μελετημένα ρήγματα παγκοσμίως. Το ρήγμα είναι ενεργό ήδη από το Μειόκαινο 15-20 Ma με πολλούς επιστήμονες να υποστηρίζουν ότι εισέρχεται σε μια περίοδο σεισμικής έξαρσης (**Schulz S. S. & Wallace R. E., 1989**).

Πρώτη φορά παρατηρήθηκε το 1895 από τον *Andrew C. Lawson* γεωλόγο και πρόεδρο του τμήματος στο πανεπιστήμιο UC Berkeley, ο οποίος αρχικά ανακάλυψε το βορειότερο τμήμα του ρήγματος, ενώ μετά τον μεγάλο σεισμό του 1906 υποστήριξε ότι το ρήγμα επεκτείνεται νοτιότερα στην Καλιφόρνια. Το 1908 σύνταξε την σπουδαία τεχνική έκθεση γνωστή ως '*Lawson's Report*' που περιείχε μελέτες για την επιφανειακή διάρρηξη του ρήγματος, τις εδαφικές αστοχίες αλλά και μηχανική μελέτη για τις ζημιές που υπέστη ο αστικός ιστός από τον σεισμό και την επακόλουθη πυρκαγιά. Μέχρι και σήμερα οι μελέτες του Lawson θεωρούνται αξιόπιστες επιστημονικές πηγές και αποτελούν ορόσημο για την κατανόηση των ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης, ενώ ταυτόχρονα συνιστούν την πρώτη οργανωμένη προσπάθεια μελέτης της σεισμικής επικινδυνότητας και της γεωλογίας των σεισμών στην Αμερική.



**Εικόνα 4.** *Αριστερά* : αεροφωτογραφία με το ίχνος του ρήγματος του Αγίου Αντρέα προς τα ΒΔ στην πεδιάδα Carrizo. Η στενή ζώνη του ρήγματος είναι σαφώς πιο διαρρηγμένη και διαβρώνεται ευκολότερα, σχηματίζοντας γραμμικές τοπογραφικές ταπεινώσεις (John Wiley). *Δεξιά* : απλοποιημένος χάρτης με τον κύριο κλάδο του ρήγματος (QGIS).

Η ιδιαίτερη έμφαση που δίνεται στο ρήγμα του Αγίου Αντρέα από τους γεωεπιστήμονες έγκειται στο γεγονός ότι αυτό αποτελεί ιδανικό παράδειγμα για την κατανόηση γεωτεκτονικών περιβαλλόντων πάνω σε ρήγματα μετασχηματισμού και

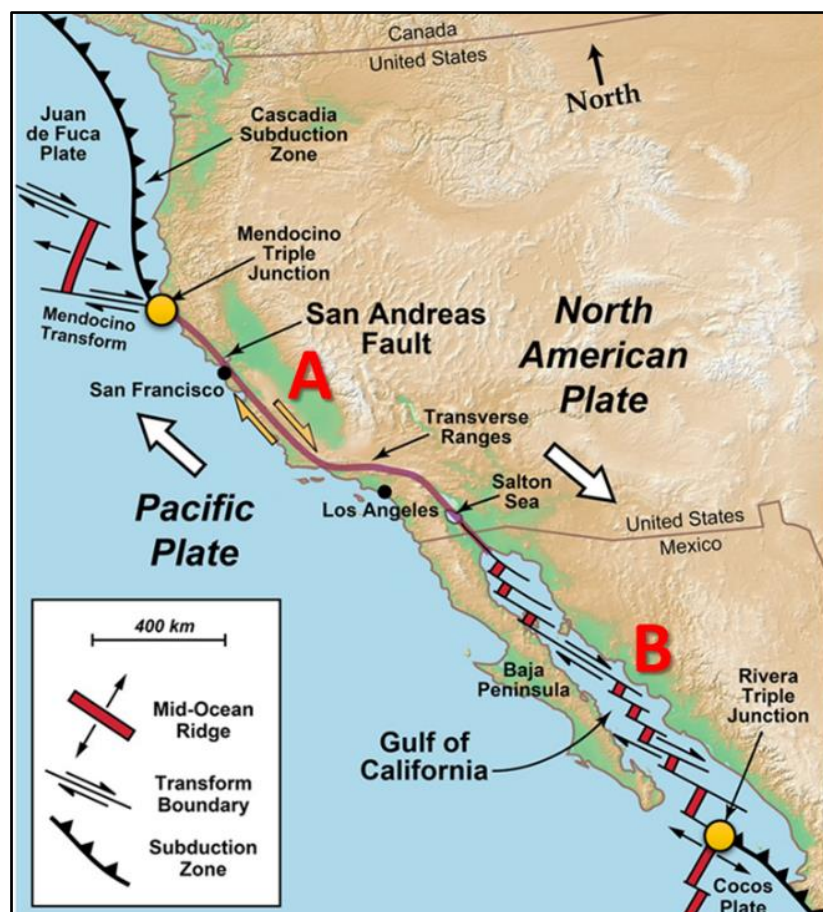


συμβάλει στην ανάπτυξη της θεωρίας των τεκτονικών πλακών. Ακόμη, το γεγονός ότι το μεγαλύτερο τμήμα του ρήγματος βρίσκεται στην ξηρά κάνει ευκολότερη την παρατήρηση, την χαρτογράφηση και την εγκατάσταση ειδικών οργάνων για την μελέτη του.

#### 4.1 Το σύστημα ρηγμάτων Αγίου Ανδρέα – Κόλπου Καλιφόρνια

Μεγάλης σημασίας για την κατανόηση των γεωδυναμικών φαινομένων στην περιοχή είναι και η μελέτη του συστήματος διάνοιξης που λαμβάνει χώρα στον Κόλπο της Καλιφόρνια. Αυτά τα δύο διαφορετικά γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, όπου η διάτμηση δίνει την θέση της στον εφελκυσμό, αλληλοεπηρεάζονται και συνιστούν μια τεκτονική ζώνη συνολικού μήκους 3.000 km γνωστή ως **‘Σύστημα ρηγμάτων μετασχηματισμού Αγίου Ανδρέα – Κόλπου Καλιφόρνια’** (*San Andreas – Gulf of California Transform Fault System*) (**Εικόνα 4.1**). Το σύστημα ρηγμάτων εκτείνεται από τον τριπλό κόμβο Mendocino (MTJ) μέχρι τον τριπλό κόμβο Riviera (RTJ) και διακρίνεται σε δύο κύρια τμήματα :

- A.** την ρηξιγενής ζώνη του Αγίου Ανδρέα στα ΒΔ με οριζόντια ολίσθηση.
- B.** την πλάγια διάνοιξη στον Κόλπο της Καλιφόρνια στα ΝΑ.



**Εικόνα 4.1.** Το Σύστημα ρηγμάτων μετασχηματισμού Αγίου Ανδρέα – Κόλπου Καλιφόρνια (S. Marshak, 2001, W. W. Norton & Comp).

#### 4.1.1 Η τεκτονική εξέλιξη του συστήματος

Το γεωτεκτονικό περιβάλλον σύγκλισης με υποβύθιση μεταξύ των πλακών της Farallon και της Β. Αμερικής εξελίχθηκε μέσω στον γεωλογικό χρόνο σε περιβάλλον μετασχηματισμού μεταξύ της Β. Αμερικής και της πλάκας του Ειρηνικού (**Εικόνα 4.2**). Η νέα σχετική κίνηση προκάλεσε ένα νέο στυλ παραμόρφωσης αποτέλεσμα του οποίου δεν ήταν μόνο ο σχηματισμός της ρηξιγενούς ζώνης του Αγίου Αντρέα και η διάνοιξη του κόλπου της Καλιφόρνια αλλά και η διαμόρφωση της επαρχίας Basin & Range από μια πληθώρα κανονικών ρηγμάτων και η περιστροφή των Εγκάρσιων οροσειρών (*Transverse Ranges*).

Η παλαιοπλάκα Farallon βρισκόταν ανάμεσα στην πλάκα του Ειρηνικού και την πλάκα της Β. Αμερικής. Κατά το Ηώκαινο έλαβε χώρα το τελικό στάδιο υποβύθισης της Farallon κάτω από το τότε δυτικό περιθώριο της Καλιφόρνια που σχημάτισε το ηφαιστειακό τόξο των Παράκτιων οροσειρών. Κατά το Ολιγόκαινο (*πριν 30 Ma*) η πλάκα της Β. Αμερικής πλησιάζοντας όλο και περισσότερο την πλάκα του Ειρηνικού προς τα δυτικά ήρθε σε επαφή με την ράχη του Ανατολικού Ειρηνικού. Η υποβύθιση της ράχης κάτω από την πλάκα της Β. Αμερικής, είχε ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό της Farallon στις πλάκες Juan de Fuca στα βόρεια και στην πλάκα Cocos στα νότια, που μέχρι και σήμερα θεωρούνται υπολείμματα της.

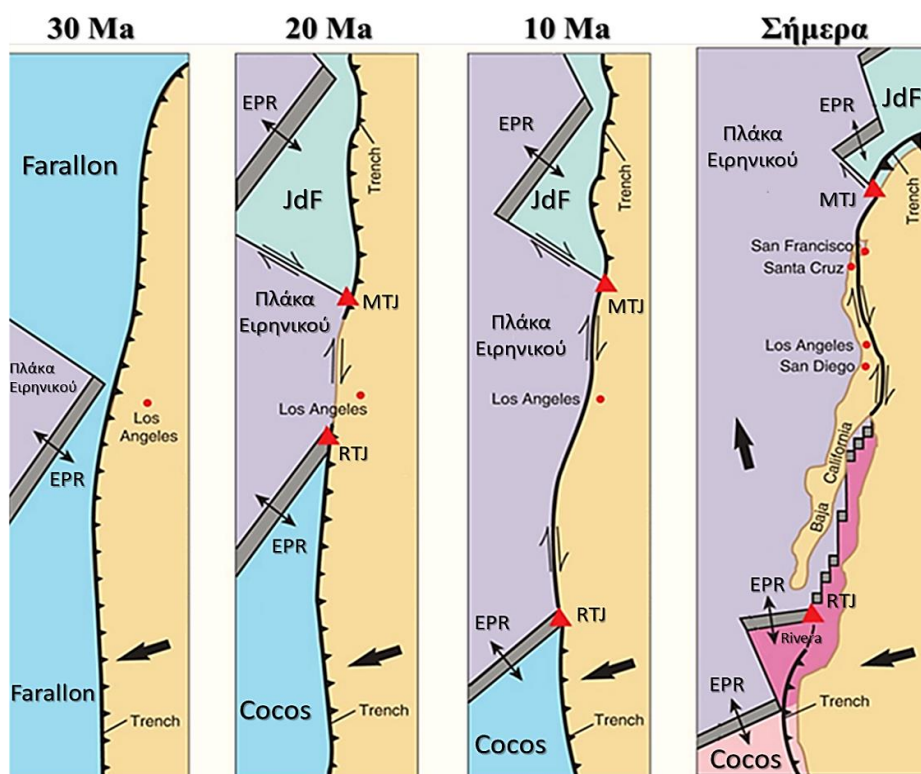
Στο Μειόκαινο (*πριν 20Ma*) σχηματίστηκαν δύο τριπλοί κόμβοι, δηλαδή σημεία επαφής μεταξύ τριών τεκτονικών πλακών, που άρχισαν να μεταναστεύουν βόρεια και νότια κατά μήκος των ακτών του δυτικού περιθωρίου όσο η Β. Αμερικάνικη πλάκα ερχόταν σε επαφή με την πλάκα του Ειρηνικού. Ο βόρειος τριπλός κόμβος Mendocino (*MTJ*) είναι το σημείο επαφής μεταξύ των πλακών της Β. Αμερικής, του Ειρηνικού και της Juan de Fuca, ενώ ο νότιος κόμβος Rivera (*RTJ*) είναι το σημείο επαφής μεταξύ των πλακών της Β. Αμερικής, του Ειρηνικού και της Rivera. Οι τριπλοί κόμβοι εντοπίζονταν μακριά από τις σημερινές ακτές του Los Angeles και οριοθετούσαν την επαφή μεταξύ της Β. Αμερικής και του Ειρηνικού με ένα δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού, πρόιμο αυτού του Αγίου Αντρέα.

Η συνεχής επαφή των δύο πλακών και η δεξιόστροφη κίνηση μεταξύ τους είχε σαν αποτέλεσμα την επιμήκυνση του ορίου και την μετανάστευση των τριπλών κόμβων ακόμη βορειότερα και νοτιότερα κατά μήκος των ακτών του δυτικού περιθωρίου. Από τα Μέσα Μειοκαίνου μέχρι και το Πλειόκαινο (*πριν 12-5 Ma*) ο κόμβος Mendocino μετακινήθηκε διαμέσου του κόλπου του San Francisco και έφτασε μέχρι τις ακτές της βόρειας Καλιφόρνια. Η μετανάστευση του κόμβου Mendocino αποδεικνύεται μέσα από πληθώρα γεωλογικών στοιχείων όπως η παραμόρφωση φλοιού, η έντονη σεισμική δραστηριότητα, η υψηλή ροή θερμότητας, η επιφανειακή ανύψωση και τα ηφαιστειακά πετρώματα. Ιδιαίτερα τα ηφαιστειακά πετρώματα σχηματίστηκαν από μια σειρά ηφαιστειακών κέντρων που γίνονται προοδευτικά νεότερα προς τα βόρεια π.χ. τα ηφαιστειακά στο Hollister είναι ηλικίας ~12 Ma, ενώ ηφαιστειακά πετρώματα στην περιοχή Sonoma-Clear Lake (*βόρεια του San Francisco*) κυμαίνονται από λίγα εκατομμύρια έως 10.000 χρόνια. Για το ίδιο χρονικό διάστημα ο τριπλός κόμβος Rivera μετακινήθηκε νοτιότερα και σήμερα βρίσκεται στο νότιο άκρο της χερσονήσου Baja California απέναντι από τις δυτικές ακτές του Μεξικό.

Στα τέλη Μειοκαίνου (*5-6 Ma*), όπως προκύπτει από την μελέτη των μαγνητικών ανωμαλιών, η μεσοωκεάνια ράχη του Ανατολικού Ειρηνικού επεκτάθηκε βορειότερα διανοίγοντας τον θαλάσσιο χώρο και χώρισε την σημερινή χερσόνησο Baja California από την υπόλοιπη Β. Αμερικάνικη ήπειρο σχηματίζοντας τον Κόλπο της Καλιφόρνια.



Σήμερα ο ρυθμός ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα είναι περίπου  $33,9 \pm 2,9$  mm/έτος, όπως έχει μετρηθεί στην πεδιάδα Carrizo (**Grant Ludwig et. al., 2019**). Η διάνοιξη του κόλπου της Καλιφόρνια συνεχίζει με αμείωτο ρυθμό εξαναγκάζοντας την χερσόνησο Baja να κινηθεί προς τα ΒΔ με μέσο ρυθμό διάνοιξης 45-47 mm/έτος, με το νότιο τμήμα του να επεκτείνεται ταχύτερα (**Umhoefer, P. J., 2011**). Σύμφωνα με τους επιστήμονες μελλοντικά η χερσόνησος Baja California θα αποτελέσει ένα ξεχωριστό ηπειρωτικό τέμαχος.



**Εικόνα 4.2.** Η τεκτονική εξέλιξη του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα και του κόλπου της Καλιφόρνια από το Ολιγόκαινο μέχρι σήμερα (Klous W.J. & Tilling R.I., USGS).

Στο μέλλον φαίνεται πως η κίνηση μεταξύ Β. Αμερικής-Ειρηνικού θα μεταφερθεί ακόμη ανατολικότερα στην ζώνη διάτμησης της Ανατολικής Καλιφόρνια (*East California Shear Zone-ECSZ*). Για τα επόμενα 20 εκατομμύρια χρόνια προβλέπεται ότι ολόκληρο το δυτικό τέμαχος του ρήγματος του Αγίου Αντρέα, συμπεριλαμβανομένου και της πόλης του Los Angeles, θα ολισθήσει προς ΒΔ φτάνοντας μέχρι την Αλεούτια τάφρο στην Αλάσκα.

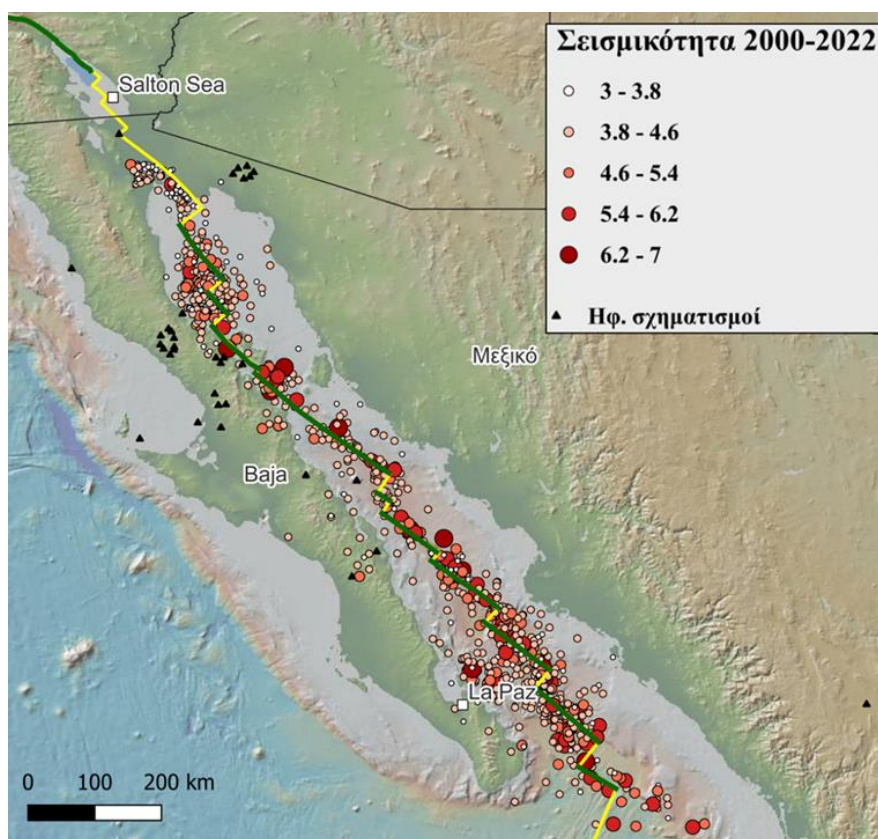
#### 4.1.2 Η διάνοιξη του Κόλπου της Καλιφόρνια

Η ρηξιγενής ζώνη του Κόλπου της Καλιφόρνια (**Εικόνα 4.3**) είναι μια σειρά ρηγματών μετασχηματισμού μεταξύ της νότιας απόληξης του συστήματος του Αγίου Ανδρέα και του βόρειου άκρου του υψώματος του Ανατολικού Ειρηνικού (EPR). Νότια της λίμνης Salton Sea και κατά μήκος όλου του Κόλπου της Καλιφόρνια αναπτύσσεται το δεύτερο κύριο τμήμα του συστήματος μετασχηματισμού γνωστό ως 'Σύστημα ρηγματών μετασχηματισμού του Κόλπου της Καλιφόρνια'. Οι παραμορφωτικές τάσεις μεταβάλλονται και η διάτμηση δίνει την θέση της σε

εφελκυσμό με αποτέλεσμα την ασύμμετρη πλάγια διάνοιξη του Κόλπου από τα ΝΑ προς τα ΒΔ και την λέπτυνση του ηπειρωτικού φλοιού στην περιοχή. Το σύστημα του Κόλπου της Καλιφόρνια αποτελείται από πολλαπλά ρήγματα μετασχηματισμού με παράταξη ΒΔ-ΝΑ, που διαχωρίζουν την ράχη του Ανατολικού Ειρηνικού σε επιμέρους ράχες.

Η διάνοιξη του κόλπου γίνεται με ραγδαίους ρυθμούς ενδεικτικές είναι οι τιμές για το νότιο τμήμα του κόλπου, όπου υπολογίζεται ότι τα τελευταία 6 Ma η διάνοιξη έχει τιμές 45-47 mm/έτος και 4-6 mm/έτος σε ρηξιγενείς ζώνες ΝΔ της χερσονήσου Baja (**Plattner C. et al., 2007**). Στο κεντρικό τμήμα του κόλπου η δεξιόστροφη κίνηση πάνω στα ρήγματα μετασχηματισμού είναι  $8 \pm 3$  cm-έτος (**Zanchi A., 1994**).

Γεωτρήσεις που έγιναν μέσα σε ιζηματογενείς λεκάνες του κόλπου έδειξαν ότι αυτές δημιουργήθηκαν από ληστρικά ρήγματα και τα ιζήματα που έχουν αποθεθεί σε αυτές τέμνονται από φλέβες και κοίτες βασαλτικού υλικού.



**Εικόνα 4.3.** Σεισμικότητα στον Κόλπο της Καλιφόρνια. Τα δεξιόστροφα ρήγματα ολίσθησης (πράσινες γραμμές) έχουν την ίδια παράταξη με την ρηξιγενή ζώνη του Αγίου Αντρέα (QGIS).

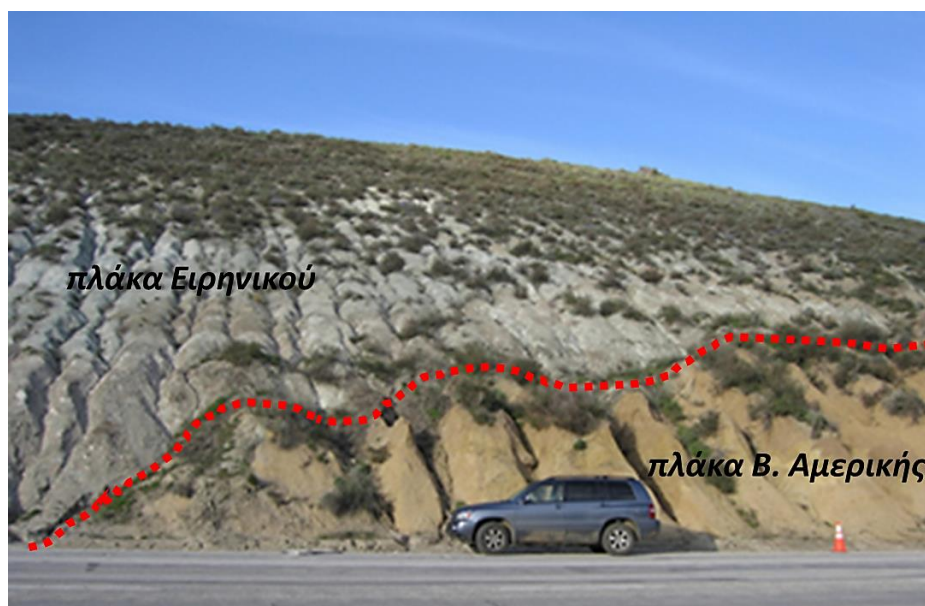
## 4.2 Η ρηξιγενής ζώνη του Αγίου Αντρέα

Το ρήγμα του Αγίου Αντρέα, μήκους περίπου 1.300 km, ανήκει στην κατηγορία ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης/μετασχηματισμού, είναι δηλαδή μια ζώνη στην οποία δύο τμήματα φλοιού ολισθαίνουν παράλληλα το ένα με το άλλο προς αντίθετες κατευθύνσεις. Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης μπορεί να συνδέουν δύο μεσοωκεάνιες ράχες ή δύο τάφρους σε συγκλίνοντα περιθώρια ή να είναι ενεργά ηπειρωτικά ρήγματα που σχετίζονται με τεκτονικές διαφυγές στα ορογενή. Τα ρήγματα

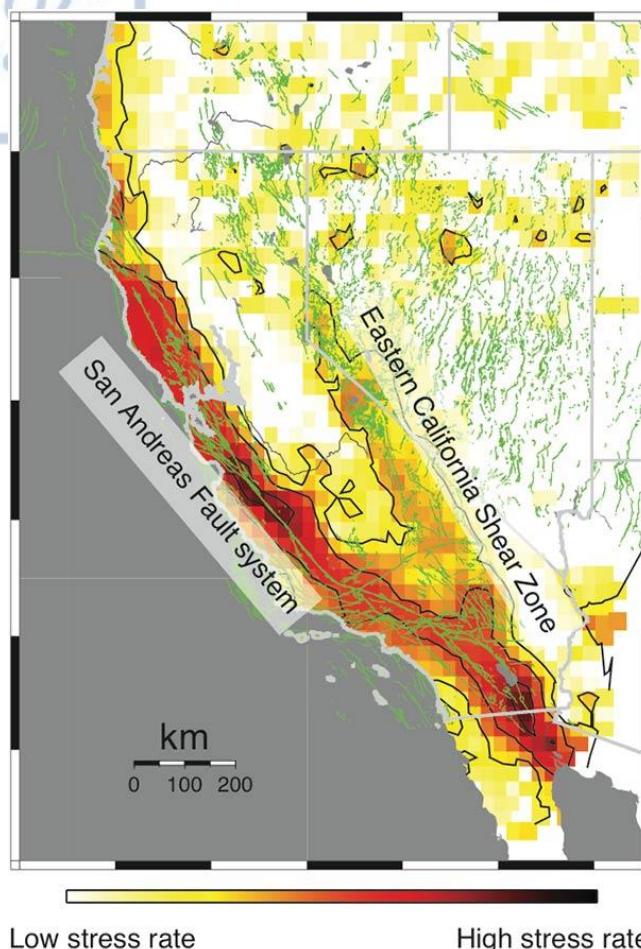


οριζόντιας ολίσθησης μπορούν μεταφέρουν ολίσθηση σε μεγάλες αποστάσεις και μεταξύ διαφορετικών συστημάτων επωθήσεων ή κανονικών ρηγμάτων.

Το ρήγμα του Αγίου Αντρέα εκτείνεται κατά μήκος της δυτικής Καλιφόρνια από τον τριπλό κόμβο Mendocino (MTJ) στα ΒΔ έως και την λίμνη Salton Sea στα ΝΑ και αποτελεί τεκτονικό όριο μεταξύ των πλακών του Ειρηνικού και της Β. Αμερικής (**Εικόνα 4.4**). Στο ρήγμα φιλοξενείται περίπου το 70% της σχετικής κίνησης των πλακών του Ειρηνικού και της Β. Αμερικής στην Καλιφόρνια (**Meade B. J. & Hager B. H., 2005**). Το υπόλοιπο 30 % της κίνησης εντοπίζεται σε μια διατμητική ζώνη ανατολικά της Sierra Nevada που ονομάζεται Walker Lane και Eastern California Shear Zone. Η διαίρεση της κίνησης σε δύο διατμητικές ζώνες (**Εικόνα 4.5**) οφείλεται στο γεγονός ότι το όριο των πλακών μετατοπίζεται προς τα ανατολικά, μακριά από το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα προς τη ζώνη Walker Lane. Ιδιαίτερα στην ζώνη ECSZ που σχηματίστηκε κατά το Α. Μειόκαινο ανατολικά του τεμάχους Mojave, το ποσοστό κίνησης που συσσωρεύεται φτάνει το 9%-23% της συνολικής σχετικής κίνησης της πλάκας, περίπου 6-12 mm/έτος (**R. K Dokka & C. J Travis, 1990**). Η ζώνη Walker Lane χρησιμοποιήθηκε στην γεωλογική βιβλιογραφία για να περιγράψει την περιοχή στο δυτικό Basin & Range, όπου τα εκτατικά ρήγματα έχουν σημαντική δεξιόστροφη συνιστώσα και παρατηρήθηκε ομοιότητα μεταξύ των οριζόντιων συνιστωσών της ζώνης Walker Lane και της ρηξιγενούς ζώνης του Αγίου Αντρέα. Η σύνδεση μεταξύ της μετάθεσης στην ζώνη Walker Lane και της τάσης και παραμόρφωσης κατά μήκος του συστήματος του Αγίου Αντρέα επιβεβαιώνεται από τεκτονικά στοιχεία αλλά και από μετρήσεις GPS. Από αυτά τα δεδομένα προκύπτει ότι στην ζώνη Walker Lane συγκεντρώνεται το 20%-22% της συνολικής μετατόπισης μεταξύ των πλακών του Ειρηνικού και της Β. Αμερικής (**Bennett et al., 1999, Dixon et al., 1995, 2000**).



**Εικόνα 4.4.** Φωτογραφία του ρήγματος του Αγίου Αντρέα κοντά στην πόλη Gorman της Καλιφόρνια. Το ρήγμα φέρνει σε επαφή τις πλάκες του Ειρηνικού και της Β. Αμερικής (© David Lynch).



**Εικόνα 4.5.** Στον χάρτη φαίνονται οι δύο ζώνες που συγκεντρώνεται η τάση και πραγματοποιείται κίνηση μεταξύ των πλακών. Η πλειονότητα των σεισμών συμβαίνει σε ρήγματα εντός των παραπάνω ζωνών (USGS).

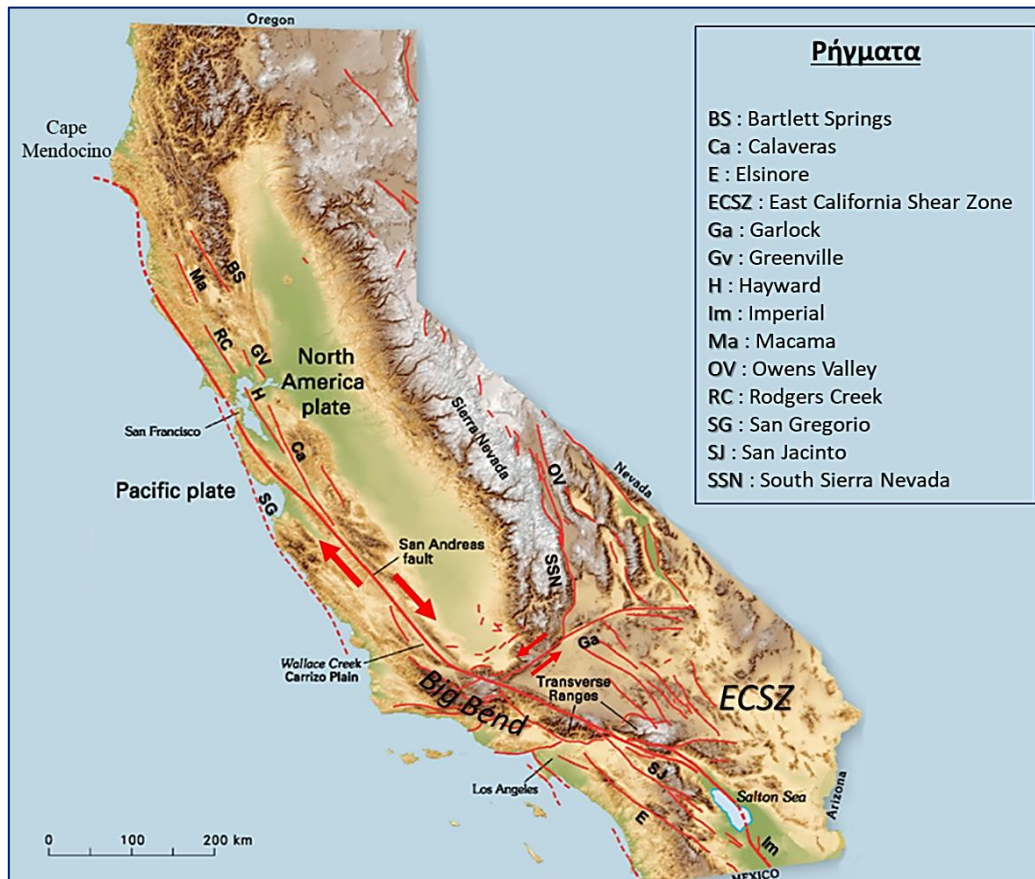
Η δράση τριβής μεταξύ των πλακών πάνω στο ρήγμα του Αγίου Αντρέα έχει ως αποτέλεσμα αβαθείς σεισμούς, μεγάλες πλευρικές μετατοπίσεις και μια ευρεία ζώνη παραμόρφωσης του φλοιού. Η δυτική πλευρά του ρήγματος κινείται προς τα ΒΔ με ρυθμό ~50 mm/έτος (**Gauriau, J. & Dolan, J. F., 2021**) σε σχέση με την Β. Αμερικάνικη πλάκα και περιλαμβάνει μία λεπτή λωρίδα ξηράς κατά μήκος των ακτών της Καλιφόρνια και την χερσόνησο Baja California.

Το ρήγμα του Αγίου Αντρέα δεν είναι το μοναδικό στην περιοχή. Εντός της ρηξιγενούς ζώνης του Αγίου Αντρέα (*San Andreas Rift Zone*) πλάτους 100 km εντοπίζονται και άλλα ενεργά ρήγματα (υπο)παράλληλα σε αυτό, που εκτονώνουν σημαντικό ποσοστό της σεισμικής ενέργειας (**Εικόνα 4.6**). Εξαιτίας αυτής της αλληλεπίδρασης του με γειτονικά ρήγματα είναι ορθότερο να χαρακτηρίζεται και συνεπώς να μελετάται ως σύστημα ρηγμάτων (**Wallace R. E., 1990**).

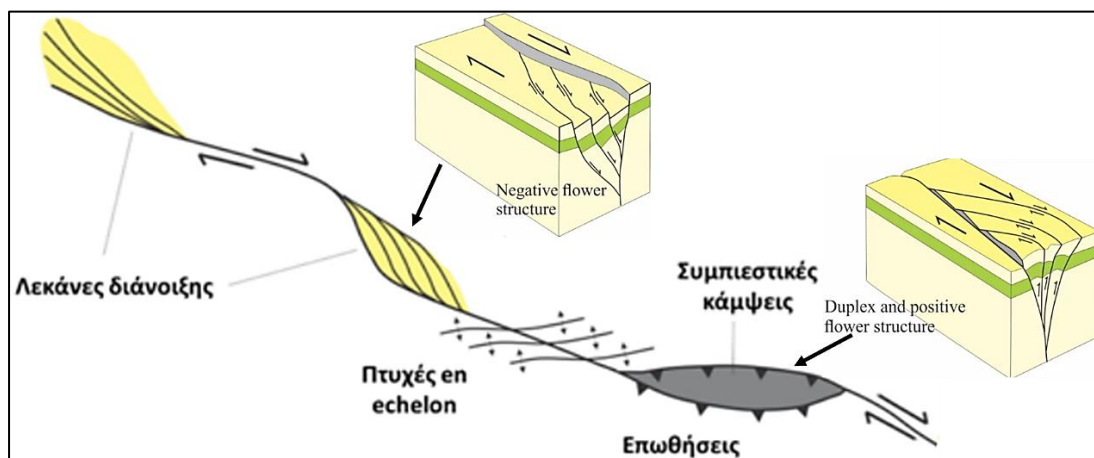
Από κινηματικής άποψης τα ρήγματα της ρηξιγενούς ζώνης χαρακτηρίζονται ως οριζόντιας ολίσθησης με δεξιόστροφη φορά κίνησης και διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ με εξαίρεση τα ρήγματα Garlock και Big Pine που είναι αριστερόστροφα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Ωστόσο, η κίνηση δεν είναι αμιγώς δεξιόστροφη καθώς κατά μήκος του ρήγματος προκύπτει και μια ανάστροφη συνιστώσα που οφείλεται σε πλαγιοσυμπιεστικές δυνάμεις (*transpressional*) που ασκούνται σε αυτό και συμβάλλουν στην περεταίρω ανύψωση των Παράκτιων οροσειρών της Καλιφόρνια. Ο λόγος της συμπίεσης προς την οριζόντια μετατόπιση διαφέρει σημαντικά από το ένα



τμήμα του ρήγματος στο άλλο και γενικά κυμαίνεται από 1:10 έως 1:20 (Stoffer P. W., 2005). Λόγω συμπίεσης σχηματίζονται συμπιεστικές κάμψεις με την μορφή πτυχών, ανάστροφων ρηγμάτων και θετικές 'δομές λουλουδιού'. Επιπλέον ασκούνται και πλαγιοεφελκυστικές δυνάμεις (transtensional) που σχηματίζουν βυθίσματα γνωστές με τον όρο λεκάνες διάνοιξης (pull apart basins). Η εφελκυστική συνιστώσα μπορεί να σχηματίσει εκτατικές κάμψεις με κανονικά ρήγματα και αρνητικές 'δομές λουλουδιού' (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.6. Απλοποιημένος τεκτονικός χάρτης, που απεικονίζεται το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα με τα υπόλοιπα κύρια ρήγματα, που σχηματίζουν μια σύνθετη ρηξιγενή ζώνη μετασχηματισμού (τροποποιημένο από Joel E. Robinson, USGS).



Εικόνα 4.7. Τεκτονικές δομές που συναντώνται κατά μήκος ρηγμάτων οριζόντιας μετατόπισης (τροποποιημένο από Twiss R.J. & Moores E.M., 1992)

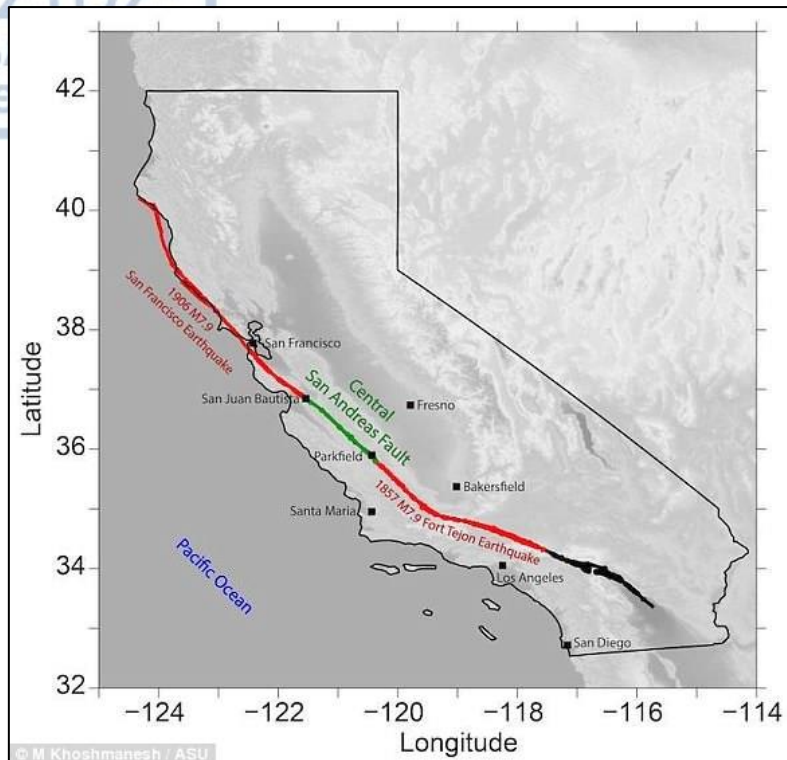
### 4.3 Τμηματοποίηση της ρηξιγενούς ζώνης του Αγίου Αντρέα

Τα ρήγματα αποτελούν 'ίχνη', τα οποία καταγράφονται στα στρώματα του ανώτερου φλοιού κατά την διάρκεια των σεισμικών φαινομένων. Ενεργό θεωρείται το ρήγμα που παρουσιάζει μια σεισμική ή ασεισμική δραστηριοποίηση κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς ( $2,5\text{ Ma} - \text{σήμερα}$ ). Ο εντοπισμός, η κατανόηση της γεωμετρίας τους στον χώρο, της κινηματικής τους και της δυναμικής τους, η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ενός ρήγματος και η επίδραση των τεκτονικών διεργασιών στο ανάγλυφο είναι απαραίτητες. Τέτοιες μελέτες γίνονται με την συμβολή επιμέρους κλάδων της γεωλογίας όπως είναι η σεισμοτεκτονική, η παλαιοσεισμολογία, η μορφοτεκτονική, η νεοτεκτονική, γεωδαισία κτλ. Τα ρήγματα σπάνια σε όλη την έκτασή τους είναι ευθύγραμμα, μπορεί να κάμπτονται, να διακλαδίζονται, να έχουν μια κλιμακωτή διάταξη 'en échelon' και να δραστηριοποιούνται όχι κατά μόνας κάθε φορά αλλά και σε συνδυασμό, οδηγώντας σε μια ευρεία ποικιλία τύπων παραμόρφωσης. Αν εξετάσουμε μεμονωμένα το ρήγμα του Αγίου Αντρέα χωρίς να λάβουμε υπ' όψη τα υπόλοιπα ρήγματα εντός της ζώνης μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η γεωμετρία του στον χώρο δεν είναι σταθερή ή ότι σε ορισμένα τμήματα του ίδιου ρήγματος κατά την διάρκεια σεισμικών φαινομένων συμβαίνει σεισμική ολίσθηση ενώ σε άλλα ερπυσμός. Το ίδιο συμβαίνει και με άλλες παραμέτρους που μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά μέσα στον γεωλογικό χρόνο. Στην περίπτωση δε που επιθυμούμε να μελετήσουμε συνολικά την ρηξιγενή ζώνη του Αγίου Αντρέα η δυσκολία γίνεται ακόμη μεγαλύτερη.

Η μεγάλη έκταση και η πολυπλοκότητα καθιστά την τμηματοποίηση του συστήματος αναγκαία για την ορθότερη μελέτη του. Η τμηματοποίηση των ρηγμάτων είναι ο χωρισμός τους σε μικρότερα τμήματα με βάση συγκεκριμένα κριτήρια όπως το βάθος, τον ρυθμό παραμόρφωσης τους, τις σχέσεις με την ενιαία ρηξιγενή επιφάνεια, το οριζόντιο επίπεδο κτλ. Μετά την τμηματοποίηση των ρηγμάτων ακολουθεί η μορφοτεκτονική μελέτη, δηλαδή η ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των γεωμορφών που συνδέονται με ρήγματα αλλά και των μικροδομών της ρηξιγενούς τεκτονικής. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί η ενεργότητα των ρηγμάτων και εν συνεχεία να προσδιοριστεί η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής.

Στο σύστημα του Αγίου Αντρέα διακρίνονται 3 κύρια τμήματα του ρήγματος (**Εικόνα 4.8**) με βάση την σεισμική συμπεριφορά που αναπτύσσει το κάθε ένα. Το κάθε τμήμα έχει διαφορετικό ρυθμό μετάθεσης και διαφορετικό βαθμό σεισμικής επικινδυνότητας. Η ποσότητα και ο ρυθμός μετατόπισης κατά μήκος του ρήγματος δεν είναι χωρικά και χρονικά σταθερά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην πολυπλοκότητα του συστήματος ρηγμάτων.





Εικόνα 4.8. Τμήματα του ρήγματος του Αγίου Αντρέα όπου παρατηρείται σεισμική ολίσθηση και ερπυσμός. (Khoshmanesh M., & Shirzaei M., 2018).

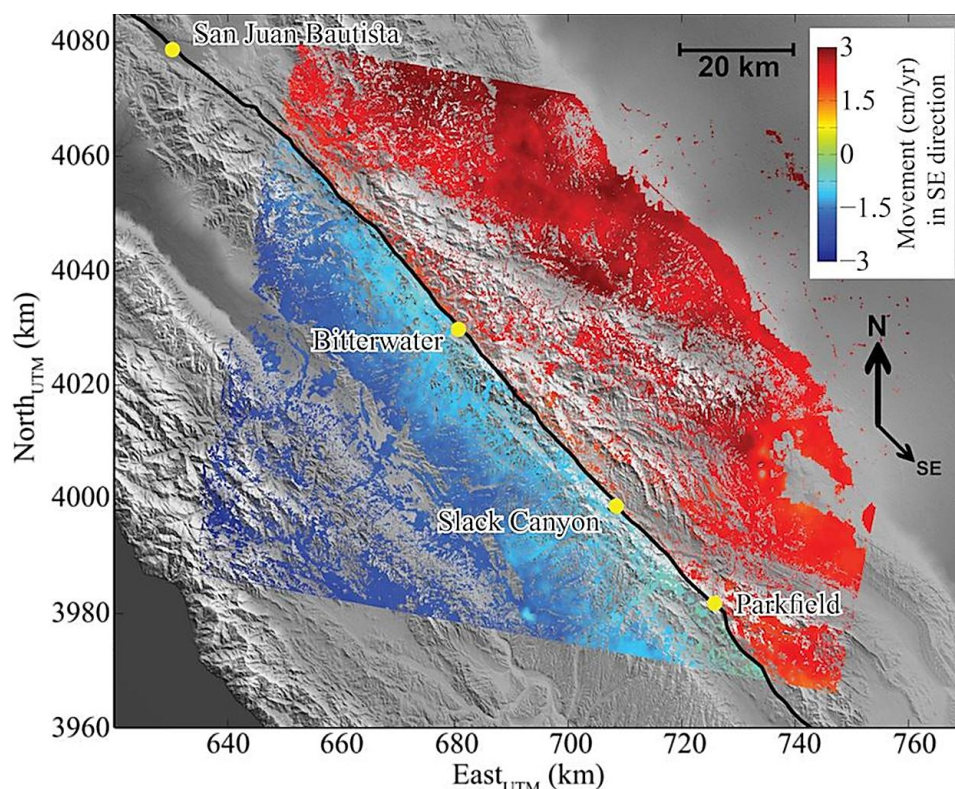
#### • Το βόρειο τμήμα

Διασχίζει τις ΒΔ ακτές της Καλιφόρνια τόσο χερσαία όσο και υποθαλάσσια. Η κίνηση του ρήγματος έχει σχηματίσει την λιμνοθάλασσα Bolinas, τον κόλπο του Σαν Φρανσίσκο και τον κόλπο Tomales, ο οποίος διαχωρίζει την χερσόνησο Point Reyes από την υπόλοιπη ηπειρωτική χώρα. Νοτιότερα και διαμέσου των βουνών Santa Cruz ο τερματίζει στην πόλη Hollister. Ερπυσμός παρατηρείται στο ρήγμα Hayward εδώ και πενήντα χρόνια (**Lienkaemper et al., 2012**), καθώς και σε ορισμένα τμήματα άλλων ρηγμάτων στην περιοχή του Κόλπου του Σαν Φρανσίσκο (*San Andreas, Calaveras, Concord-Green Valley, Maacama*) (**Galehouse & Lienkaemper, 2003**). Σε αυτό το τμήμα του ρήγματος προκλήθηκε διάρρηξη το 1906 από τον ισχυρότατο σεισμό του Σαν Φρανσίσκο με οριζόντιες μετατοπίσεις έως και 5,50 m

#### • Το κεντρικό τμήμα

Το κεντρικό τμήμα του ρήγματος του Αγίου Αντρέα είναι το μικρότερο σε μήκος τμήμα του (130 km) και αναπτύσσεται μεταξύ των πόλεων Hollister και Parkfield. Σε αντίθεση με το βόρειο και νότιο τμήμα του ρήγματος του Αγίου Αντρέα, το κεντρικό τμήμα είναι ιδιαίτερα ευθύ και δεν διακλαδίζεται με πλήθος άλλων ρηγμάτων με αποτέλεσμα ο ρυθμός ολίσθησης του να είναι αρκετά καλά προσδιορισμένος στα 35 mm/έτος (**Grant-Ludwig et al., 2019**). Το κεντρικό τμήμα παρουσιάζει εντελώς διαφορετική σεισμική συμπεριφορά σε σχέση με το υπόλοιπο ρήγμα, καθώς εκεί το ρήγμα ολισθαίνει χωρίς να προκαλεί σεισμούς και παρατηρείται ασεισμική ολίσθηση – ερπυσμός. Στον ερπυσμό η ενέργεια απελευθερώνεται συνεχώς και όχι απότομα κατά την διάρκεια σεισμικών φαινομένων.

Η ερπυστική κίνηση δεν είναι συνεχής και σταθερή αλλά συμβαίνει κατά περιόδους. Μέσα από δεκαετίες μετρήσεις εδαφικών κινήσεων και ανάλυση δορυφορικών δεδομένων InSAR (**Εικόνα 4.9**) αποδείχτηκε ότι οι δύο πλευρές στο ερπυστικό τμήμα του ρήγματος είναι δυνατόν να παραμένουν ακίνητες για μήνες ή να κινούνται με ταχύτητα μέχρι και 10 cm/έτος (*Khoshmanesh, M., & Shirzaei, M., 2018*). Οι τόσο μεταβλητές ταχύτητες ερπυσμού στο κεντρικό τμήμα έχουν σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η τάση που ασκείται σε γειτονικά τμήματα του ρήγματος με την πάροδο του χρόνου και η δυνατότητα πρόκλησης σεισμών σε αυτά. Συνεπώς, αυτή η μεταβλητότητα θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν σε υπολογισμούς για την σεισμική επικινδυνότητα, αφού σε περιόδους γρήγορου ερπυσμού ο κίνδυνος είναι υψηλότερος.



**Εικόνα 4.9.** Δορυφορική εικόνα InSAR που αποτυπώνει τον ρυθμό ερπυσμού στο κεντρικό τμήμα του ρήγματος του Αγίου Αντρέα. Το κόκκινο χρώμα δηλώνει γρήγορη εδαφική κίνηση προς τα ΝΑ και το μπλε χρώμα δηλώνει μια σχετική κίνηση προς τα ΒΔ (*Khoshmanesh, M., & Shirzaei, M., 2018*).

#### • Το νότιο τμήμα

Το νότιο τμήμα (ή τμήμα Mojave) εκτείνεται από την πόλη Parkfield και διαμέσου των Εγκάρσιων οροσειρών τερματίζει στην λίμνη Salton Sea. Σύμφωνα με τους επιστήμονες είναι το πιο επικίνδυνο τμήμα του ρήγματος ικανό να δώσει σεισμό μέχρι και  $M_w=8,1$ . Το ίχνος του ρήγματος στην πεδιάδα Carrizo είναι ευδιάκριτο και το Elkhorn Scarp ορίζει το ίχνος του ρήγματος εντός της πεδιάδας. Στην πεδιάδα Carrizo έχουν καταφέρει να διατηρηθούν πολλές γεωμορφές, που σχετίζονται με την τεκτονική δράση του ρήγματος. Σύμφωνα με τους επιστήμονες το επίπεδο έδαφος της πεδιάδας, το ξηρό κλίμα και η απουσία βλάστησης συμβάλλουν στην διατήρησή τους. Νοτιότερα στις περιοχές Gorman, Tejon Pass και Frazier το ρήγμα του Αγίου Αντρέα αποκτά μια μεγάλη καμπυλότητα γνωστή ως 'Big Bend' και σύμφωνα με τους επιστήμονες εκεί το



ρήγμα είναι κλειδωμένο χωρίς να ολισθαίνει με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται παραμορφωτικές τάσεις και όταν υπερβούν την δύναμη της τριβής να γεννώνται σεισμοί με περίοδο επαναληψιμότητας 140-160 χρόνια. Ανατολικά του Los Angeles, στις Εγκάρσιες οροσειρές, το ρήγμα του Αγίου Αντρέα χωρίζεται σε δύο μεγάλους κλάδους τον βόρειο και τον νότιο, που φιλοξενούν περίπου τα 2/3 της συνολικής δεξιόστροφης οριζόντιας ολίσθησης μεταξύ των πλακών της Β. Αμερικής και του Ειρηνικού.

Στο νότιο άκρο του συστήματος, το ρήγμα Imperial αντιπροσωπεύει μια μετάβαση από το πιο συνεχές ρήγμα του Αγίου Ανδρέα σε ένα πιο σχεδόν κλιμακωτό en echelon μοτίβο που καταλήγει στον Κόλπο της Καλιφόρνια. Μεταξύ των ρηγμάτων που αλληλεπιδρούν αναπτύσσονται συμπιεστικές τάσεις και συχνά σχηματισμοί εμφανίζονται κεκλιμένοι ή και εντελώς κατακόρυφοι (**Εικόνες 4.10-11**).



**Εικόνα 4.10.** Ιζηματογενή Πλειο-Πλειστοκαινικά πετρώματα σε κατακόρυφη θέση στο Box Canyon. Η σημερινή θέση των στρωμάτων οφείλεται στην συμπίεση που αυτά δέχονται από το ρήγμα του Αγίου Αντρέα (mavensphotoblog).



**Εικόνα 4.11.** Όγκοι ιζηματογενών πετρωμάτων όπου οι στρώσεις κλείνουν προς αντίθετες κατευθύνσεις λόγω των έντονων τεκτονικών δυνάμεων (Linda & Dr. Dick Buscher).



#### 4.4 Γεωλογικά στοιχεία

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για το ρήγμα του Αγίου Αντρέα είναι οι μεγάλες μετατοπίσεις που έχουν υποστεί τα πετρώματα εκατέρωθεν του ρήγματος.

Δυτικά του ρήγματος από τη νότια Καλιφόρνια μέχρι και τον κόλπο του San Francisco βρίσκεται το Μεσοζωικό γρανιτικό υπόβαθρο. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζονται ως μεγάλα τεμάχια, τα οποία μετατοπίστηκαν σε μεγάλες αποστάσεις προς τα βόρεια κατά μήκος του δυτικού περιθωρίου από την τεκτονική δράση του ρήγματος του Αγίου Αντρέα. Από τα γρανιτικά πετρώματα που συνθέτουν την γεωλογία της περιοχής σημαντικά είναι αυτά του συμπλέγματος Salinian, με εμφανίσεις σε πολλές περιοχές (*Gavilan, στη χερσόνησο Monterey, στο όρος Ben Lomond, στο όρος Montara και στο Point Reyes*). Υπερκείμενα του γρανιτικού υποβάθρου είναι θαλάσσια ιζηματογενή πετρώματα του Άνω Κρητιδικού-Τριτογενούς που αντιπροσωπεύουν θαλάσσια περιβάλλοντα διαφόρων βαθών από αβυσσικά πεδία μέχρι και παράκτια. Πάνω στα θαλάσσια ιζηματογενή πετρώματα έχουν αποτεθεί ιζήματα διαφορετικών περιβαλλόντων όπως υφαλοκρηπιδικά, πελαγικά, ποτάμια, ποταμόκοιτων (**Stoffer, P. W., 2005**).

Ανατολικά του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα τα πετρώματα που συνιστούν το υπόβαθρο είναι ο οφιόλιθος των Παράκτιων οροσειρών (CRO) που αποτελείται κυρίως από σερπεντινωμένα υπερβασικά πετρώματα και πρασινοσχιστόλιθο, το σύμπλεγμα Franciscan με ταινιωτό κερατόλιθο, ασβεστόλιθους, πρασινοσχιστόλιθο, pillow λάβες, βασάλτη, πηλόλιθοι και ψαμμίτες (**Stoffer, P. W., 2005**). Πάνω σε αυτά έχουν αποτεθεί ιζηματογενή πετρώματα της μεγάλης ακολουθίας Great Valley κυρίως ψαμμίτες, σχιστοπηλοί και κροκαλοπαγή.

Γενικότερα οι φάσεις των πετρωμάτων δείχνουν μια βαθμιαία μετάβαση από θαλάσσια σε χερσαία περιβάλλοντα. Από τα τέλη του Τριτογενούς, η παράκτια Καλιφόρνια είχε ανάγλυφο παρόμοιο με το σημερινό, με οροσειρές χαμηλού υψομέτρου (ή νησιά), πεδινές κοιλάδες και κόλπους. Έκτοτε, οι Παράκτιες οροσειρές της έχουν υποστεί σημαντική ανύψωση και ταυτόχρονη ταπείνωση του αναγλύφου λόγω της έντονης διάβρωσης. Οι παράκτιες αναβαθμίδες σχηματίστηκαν από την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας όταν οι ηπειρωτικοί παγετώνες σχηματίστηκαν και έλιωσαν κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς. Μελέτες των παράκτιων αναβαθμίδων έδειξαν ότι τμήματα της σύγχρονης ακτογραμμής ανυψώνονται ή βυθίζονται ταυτόχρονα και ότι αυτές οι τεκτονικές αλλαγές συνδέονται με το εγγύς σύστημα ρηγμάτων (**Stoffer, P. W., 2005**).

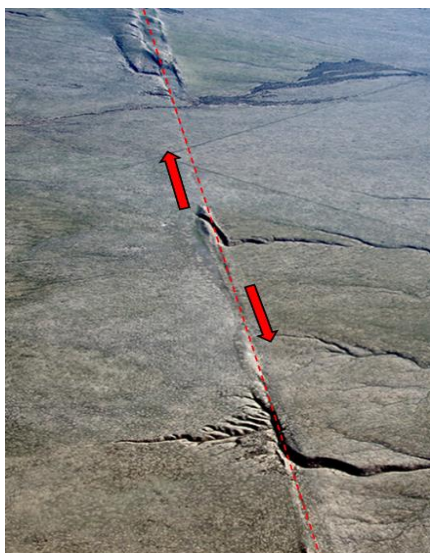
#### 4.5 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά κατά μήκος του ρήγματος

Η ενεργότητα των ρηγμάτων αποδεικνύεται μέσα από κριτήρια γεωλογικά, σεισμολογικά, γεωχημικά και γεωδαιτικά που στόχο έχουν τον εντοπισμό συγκεκριμένων γεωμορφών, σεισμικών διαρρήξεων, εδαφικών μετακινήσεων και μορφολογικών παραμορφώσεων. Το ίχνος ενός ρήγματος συχνά μπορεί να καλύπτεται από την τοπογραφία, την βλάστηση, τις κατολισθήσεις, τους κώνους κορημάτων ή από ανθρωπογενείς παράγοντες. Ωστόσο, ορισμένα γεωμορφικά χαρακτηριστικά μπορούν να γίνουν εύκολα αντιληπτά και να μετρηθούν απευθείας στην ύπαιθρο. Οι μορφοδομές που μπορεί να υπάρχουν όπως τεκτονικά πρηνή, λεκάνες, ακτογραμμές,

το ορεογραφικό, το υδρογραφικό δίκτυο κτλ. επηρεάζονται από την τεκτονική και τελικώς διαμορφώνονται από εξωγενείς παράγοντες, κυρίως την διάβρωση.

Το ρήγμα του Αγίου Αντρέα είναι αδιαμφισβήτητα ένα ενεργό ρήγμα που έχει επαναδραστηριοποιηθεί στο πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν και έχει επηρεάσει πολύ νέους ηλικιακά σχηματισμούς. Όλα τα παρακάτω γεωλογικά κριτήρια σε συνδυασμό με σύγχρονα σεισμολογικά και γεωδαιτικά δεδομένα δίνουν αξιόπιστες ενδείξεις για τον χαρακτηρισμό του ρήγματος ως ενεργού. Κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Αντρέα διακρίνονται :

1. δεξιόστροφες μετατοπίσεις κοιτών παλαιορεμάτων. Είναι καλοί δείκτες της κινηματικής και του ρυθμού ολίσθησης του ρήγματος και έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον σε παλαιοσεισμολογικές τομές. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται και τα μετατοπισμένα πετρώματα όμοιας ηλικίας και πετρολογικής σύστασης εκατέρωθεν του ρήγματος με τα νεότερα πετρώματα να είναι λιγότερο μετατοπισμένα από τα παλαιότερα. Εξίσου σημαντικές είναι και οι μετατοπίσεις που υφίστανται οι ανθρώπινες κατασκευές π.χ. δρόμοι, φράχτες, γιατί γίνονται εύκολα αντιληπτές και μπορεί να μετρηθεί *in situ* η μετάθεση στο ρήγμα (**Εικόνες 4.12-14**).
2. επιμήκεις γραμμικές κοιλάδες και ανυψώσεις κατά μήκος του ρήγματος (**Εικόνες 4.15-17**).
3. ρηξιγενή πρηνή μεγάλης κλίσης με τριγωνικές κλιτύες (**Εικόνα 4.18**).
4. πτυχώσεις (**Εικόνα 4.19**).
5. κόλποι και λεκάνες διάνοιξης (*pull apart basins*) (**Εικόνες 4.20-22**).
6. πηγές ή/και γεωθερμικά πεδία. Ειδικά σε περιοχές με κλίμα (*semi*)arid η άνοδος ρευστών μέσα από τις διαρρήξεις μπορεί να σχηματίσει οάσεις πάνω από το ρήγμα (**Εικόνα 4.23**).
7. επιμήκεις λίμνες (*sag ponds*) και ρεζερβουάρ (**Εικόνες 4.24-25**).
8. διακλαδώσεις τύπου *en echelon* (**Εικόνα 4.26**).







**Εικόνα 4.12.** Μετατόπιση και διάβρωση ποτάμιων κοιτών στην πεδιάδα Carrizo (Michael Rymer).

**Εικόνα 4.13.** Η αργή ολίσθηση σε τμήμα του Αγίου Αντρέα παραμόρφωσε φράχτη στα ΒΔ του San Juan Bautista χωρίς να επέλθει η θραύση και η μετατόπιση του (David Lynch).

**Εικόνα 4.14.** Μετατόπιση φράχτη 5 m στο Point Reyes National Seashore από τον μεγάλο σεισμό του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο (Robert J. Lillie).

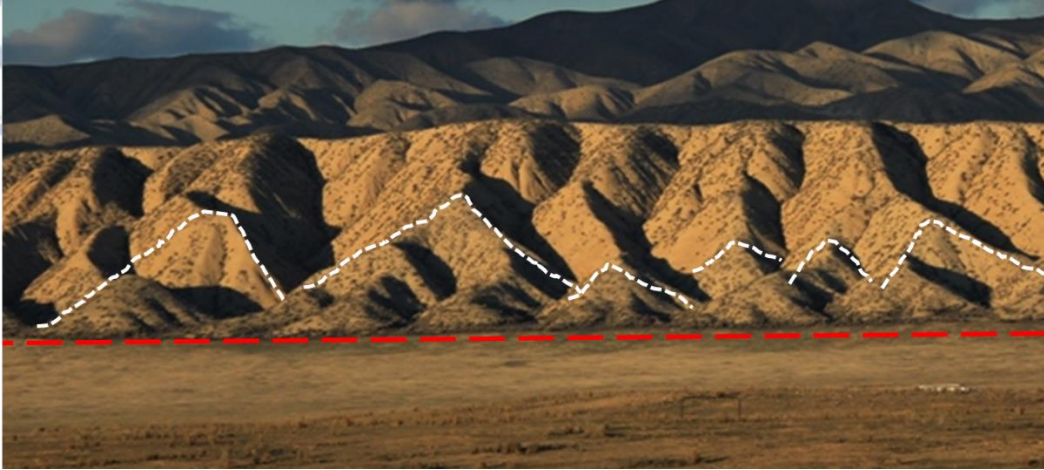


**Εικόνα 4.15.** Το ίχνος του ρήγματος είναι ορατό από την απότομη ανύψωση στο βάθος και την παραμόρφωση του αρδευτικού καναλιού. Είναι τμήμα του ρήγματος, στο οποίο προκλήθηκε διάρρηξη στον σεισμό του Fort Tejon το 1857 (©SOCALREGION.com).

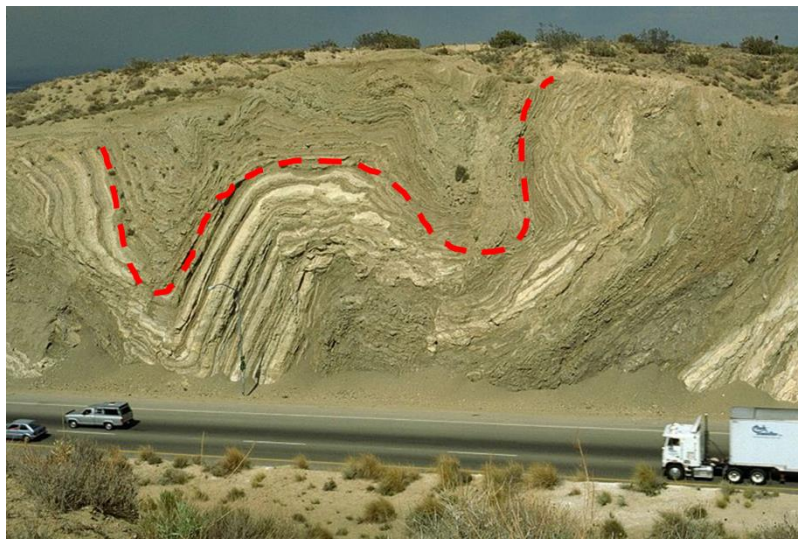
**Εικόνα 4.16.** Ο αυτοκινητόδρομος Highway 58 διασχίζει την ράχη του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα στην πεδιάδα Carrizo (©SOCALREGION.com).

**Εικόνα 4.17.** Ράχη που σχηματίστηκε κατά μήκος του ρήγματος από πλευρική συμπίεση στην πεδιάδα Carrizo (Scott Haefner, USGS).





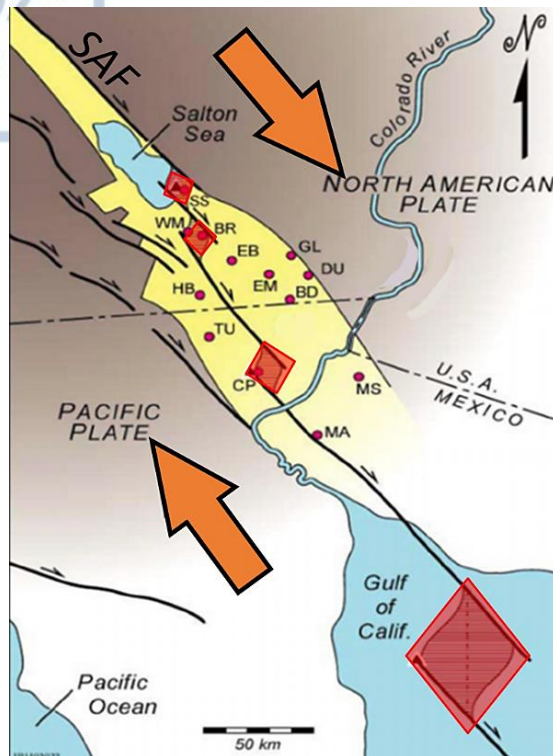
**Εικόνα 4.18.** Πρανή με τριγωνικές κλιτύες, που σχηματίστηκαν ως υπολείμματα διεργασιών διάβρωσης του ρηξιγενούς πρανούς (Jack Elliott).



**Εικόνα 4.19.** Πτυχωμένα στρώματα του σχηματισμού Anaverde από το ρήγμα του Αγίου Αντρέα κοντά στον αυτοκινητόδρομο Antelope Valley. Ο σχηματισμός Πλειοκαινικής ηλικίας αποτελείται κυρίως από σχιστόλιθους και ιλυόλιθους (Jens Bludau).







**Εικόνα 4.20.** Η δεξιόστροφη κίνηση του ρήγματος διάνοιξε τον κόλπο Tomales και σχημάτισε την λαγκούνα Bolinas. Η περεταίρω διάνοιξη του κόλπου θα έχει σαν αποτέλεσμα η χερσόνησος Point Reyes να αποκοπεί από την υπόλοιπη πλάκα και να κινηθεί προς τα ΒΔ (Google Earth).

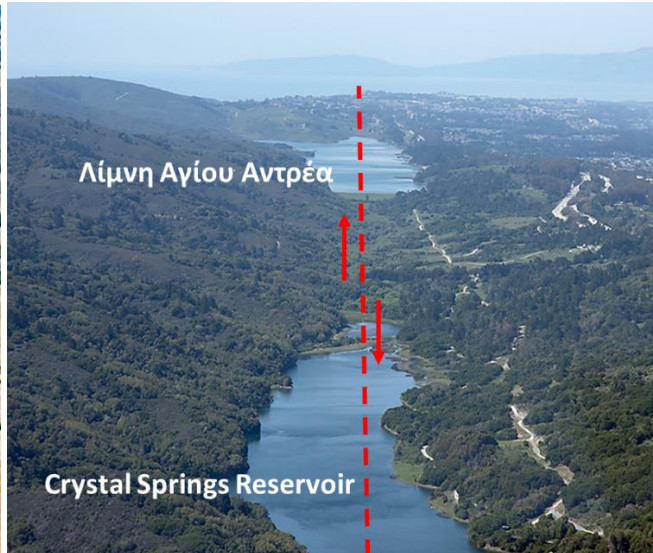
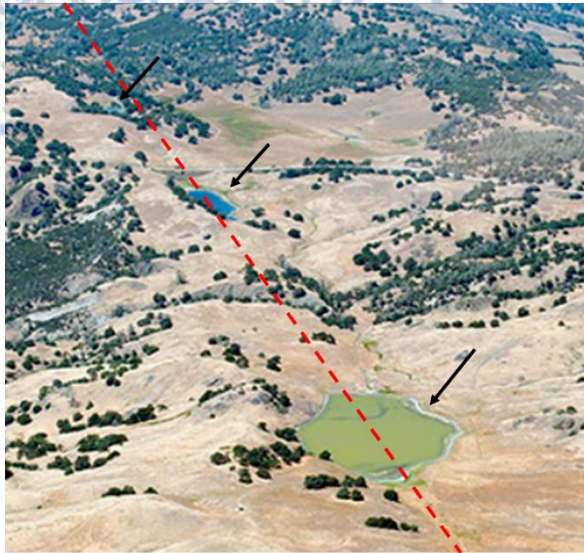
**Εικόνα 4.21.** Αεροφωτογραφία της λίμνης Salton Sea στο Imperial Valley. Η λίμνη θεωρείται μια pull apart basin, που σχηματίστηκε από τα παράλληλα δεξιόστροφα ρήγματα Imperial και Αγίου Αντρέα που δημιουργούν ένα εφελκυστικό πεδίο (Wikipedia).

**Εικόνα 4.22.** Οι κόκκινοι ρόμβοι αναπαριστούν λεκάνες διάνοιξης που σχηματίζονται μεταξύ του ρήγματος του Αγίου Αντρέα και άλλων ρηγμάτων που δρουν κοντά στον κόλπο της Καλιφόρνια. Οι κόκκινοι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα γεωθερμικά πεδία του Imperial Valley (Kaspereit, D. et. al., 2016).



**Εικόνα 4.23.** Η όαση Willis Palms στην κοιλάδα Coachella (Michael Rymer).





**Εικόνα 4.24.** Μικρές λίμνες sag ponds αναπτύσσονται κατά μήκος του ρήγματος. Είναι βυθίσματα που σχηματίζονται από ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης και στην συνέχεια γεμίζουν με γλυκό νερό (Michael Rymer).

**Εικόνα 4.25.** Επιμήκειες λίμνες σχηματίζονται λόγω της δεξιόστροφης μετατόπισης του ρήγματος (Michael Rymer).



**Εικόνα 4.26.** Διακλάσεις en echelon σε δρόμο που διασχίζει το ρήγμα του Αγίου Αντρέα (Horst Rademacher).

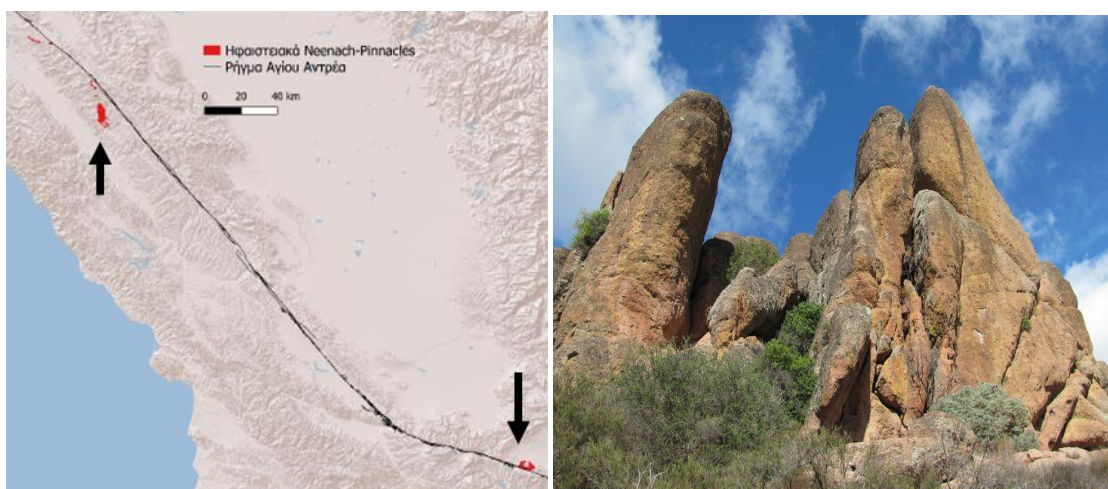
## 4.6 Μέτρηση μετατόπισης στο ρήγμα

Με βάση τα γεωλογικά και γεωδαιτικά δεδομένα προκύπτει πως από το Μειόκαινο μέχρι και σήμερα η συνολική μετατόπιση του ρήγματος είναι τουλάχιστον 563 km. Η οριζόντια μετατόπιση γίνεται εύκολα αντιληπτή στην επιφάνεια τόσο από μετατοπίσεις ποτάμιων κοιτών, δρόμων, φραχτών αλλά και από τον διαχωρισμό όμοιας γεωλογικής ηλικίας τεκτονοστρωματογραφικών πεδίων (terrane) π.χ. μελέτη σε τμήμα του ρήγματος μεταξύ του Tejon Pass και της λίμνης Salton Sea έδειξε ότι αυτά κάποτε ήταν

ενιαία όμως με την δράση του ρήγματος σήμερα βρίσκονται μετατοπισμένα 241 km το ένα από το άλλο (**S. Schulz & Robert E. Wallace, 1989**). Γενικά ο ρυθμός μετάθεσης κατά μήκος του ρήγματος δεν είναι παντού ο ίδιος αλλά διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και αυτό γιατί στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για ένα μεμονωμένο ρήγμα αλλά για ένα σύστημα ρηγμάτων. Περίπου 300 km δεξιάς ολίσθησης έχουν σημειωθεί κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα κατά τα τελευταία 10-15 Ma, και τουλάχιστον αρκετές εκατοντάδες επιπλέον χιλιόμετρα κατά μήκος συναφών ρηγμάτων δεξιάς ολίσθησης του συστήματος του Αγίου Ανδρέα (**Blake Jr. et al., 1978**). Επειδή ο διαχωρισμός στο τμήμα της χερσονήσου του Σαν Φρανσίσκο του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα είναι περίπου 25 km και η μετατόπιση στο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην κεντρική Καλιφόρνια είναι 310 έως 320 km, πρέπει να ληφθούν υπόψη περισσότερα από 250 km δευτερεύουσας ολίσθησης του ύστερου Καινοζωικού αιώνα ανατολικά της χερσονήσου του Σαν Φρανσίσκο (**Wakabayashi J., 1999**). Η κατανομή της ολίσθησης, σε συνδυασμό με τις ηλικίες των μετατοπισμένων χαρακτηριστικών και τους κινηματικούς περιορισμούς των ορίων των πλακών, δείχνουν ότι η κατανομή των ρυθμών ολίσθησης σε ομάδες ρηγμάτων κατά μήκος του ορίου μετασχηματισμού έχει αλλάξει με ακανόνιστο τρόπο με την πάροδο του χρόνου, σε αντίθεση με τα υπάρχοντα μοντέλα που προτείνουν προοδευτική μετανάστευση προς τα ανατολικά των ενεργών ρηγμάτων στο σύστημα του Αγίου Ανδρέα (**Wakabayashi J., 1999**).

#### • Τα ηφαιστειακά πετρώματα Neenach-Pinnacles

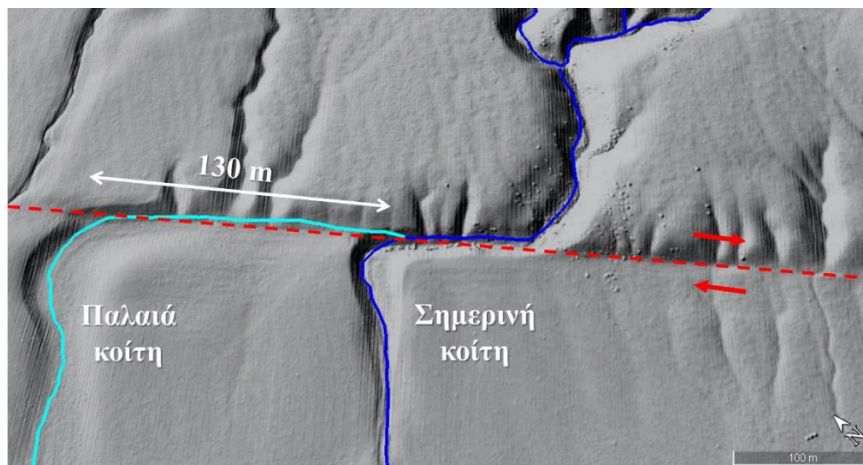
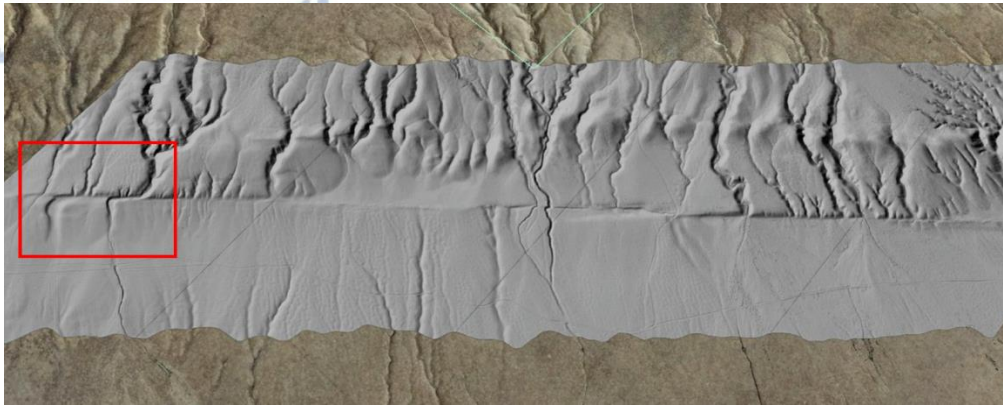
Η βύθιση της πλάκας Farallon κάτω από το δυτικό περιθώριο σχημάτισε το ηφαιστειακό κέντρο Neenach ηλικίας 23,5 Ma βόρεια του Los Angeles. Με την λήξη της υποβύθισης η ηφαιστειακή δραστηριότητα σταμάτησε και το ηφαίστειο έπαψε να είναι ενεργό. Ο σχηματισμός του ρήγματος του Αγίου Αντρέα κατά το Ολιγόκαινο και η προς τον βορρά επέκτασή του είχαν σαν αποτέλεσμα το ρήγμα να περάσει μέσα από το ηφαιστειακό κέντρο και να το μετατοπίσει. Σήμερα η δυτική πλευρά του ηφαιστίου που αποχωρίστηκε βρίσκεται 315 km βορειότερα και είναι γνωστή με το όνομα Pinnacles (**Εικόνα 4.27**). Τα δύο ηφαιστειακά κέντρα έχουν παρόμοια ηλικία, στρωματογραφία, πετρολογία και γεωχημεία (**Matthews V., 1976**). Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι ανδεσίτης και ρυόλιθος (**Alt D. D. & Hyndman D. W., 2016**).



**Εικόνα 4.27. Αριστερά :** Μετατόπιση 315 km των ηφαιστειακών κέντρων Neenach-Pinnacles (QGIS). **Δεξιά:** Φωτογραφία με τον ρυόλιθο του ηφαιστειακού κέντρου Pinnacles (Noni Todd).



- Η κοίτη του ρέματος Wallace



Εικόνα 4.28. Εμφανώς δεξιόστροφα μετατοπισμένες κοίτες στην πεδιάδα Carrizo (Google Earth).

Η μετατόπιση που υφίσταται το Wallace Creek στην πεδιάδα Carrizo είναι η πιο χαρακτηριστική για το ρήγμα. Η διάνοιξη παλαιοσεισμολογικών τομών και η χρονολόγηση που έγινε σε δείγματα ξύλου που είχαν αποθεθεί στην παλαιά κοίτη του ρέματος έδειξαν ότι το νεότερο ίζημα που είχε αποθεθεί, πριν την μετάθεση της κοίτης, ήταν 3.800 ετών και ότι το ρέμα Wallace από τότε έχει μια συνολική μετατόπιση 130 m (Wallace R. E., 1987) (Εικόνα 4.28). Συνεπώς, ο ρυθμός μετάθεσης του ρέματος υπολογίστηκε σε:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{130}{3800} = 0,034 = 34 \text{ mm/έτος}$$

Οι έρευνες για σεισμικά ρήγματα στην πεδιάδα Carrizo έδειξαν ότι πολλά ακόμα ρέματα έχουν μετατοπιστεί δεξιόστροφα. Ο ισχυρός σεισμός του 1857 στο Fort Tejon με μέγεθος  $M_w=7.9$  μετατόπισε το ρέμα 9 m (Wallace R. E., 1987).

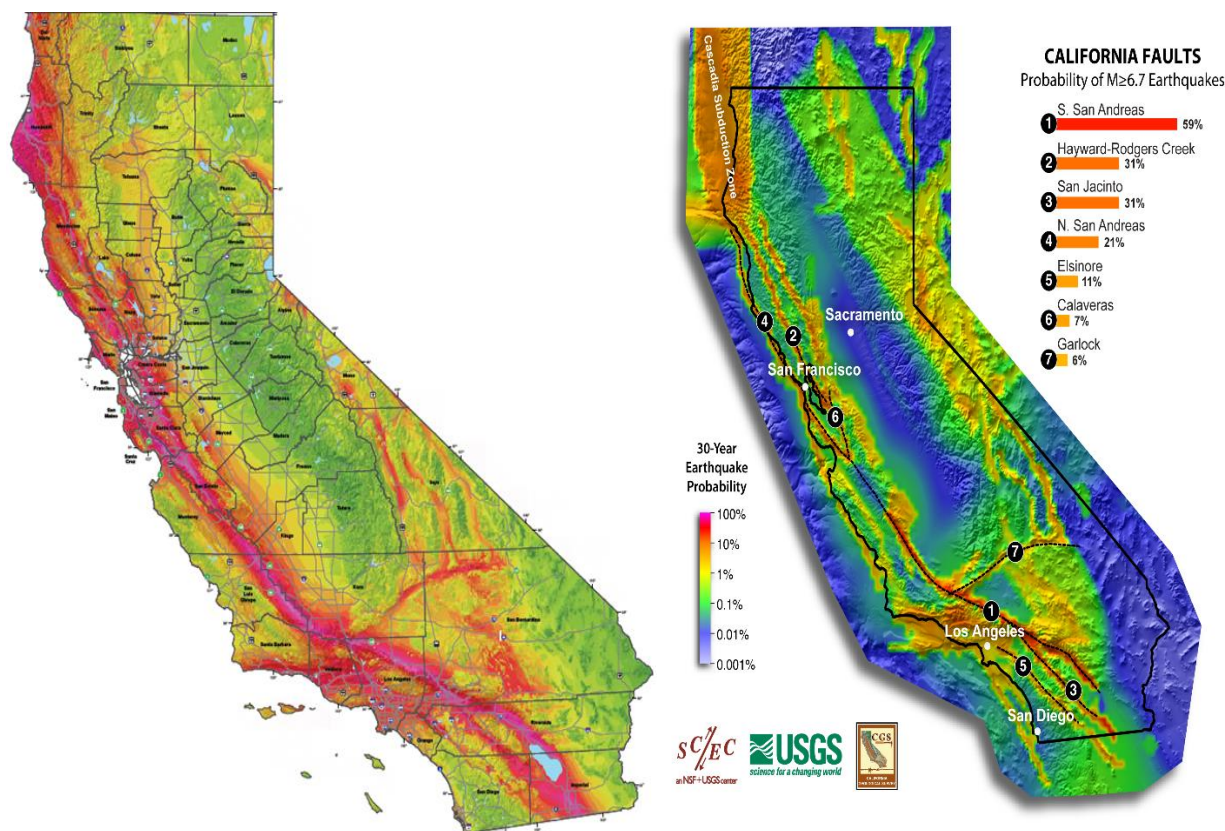
#### 4.7 Σεισμικότητα

Από όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω για την τεκτονική της Καλιφόρνια γίνεται κατανοητό ότι είναι μια περιοχή που παρουσιάζει έντονη σεισμικότητα, που συγκεντρώνεται κυρίως στο ρήγμα του Αγίου Αντρέα και στα παραπλεύρως σε αυτό

ρήγματα. Σταθμός για την σεισμολογική ιστορία της Καλιφόρνια και αφετηρία για μελλοντικές έρευνες, ήταν ο μεγάλος σεισμός μεγέθους  $M_w=7,8$  του Σαν Φρανσίσκο το 1906 με μεγάλες μετατοπίσεις και ρευστοποιήσεις αλλά και τεράστιες καταστροφές από την επακόλουθη πυρκαγιά. Οι περισσότεροι σεισμοί μεγάλου μεγέθους συνδέονται με προϋπάρχοντα ενεργά ρήγματα που δραστηριοποιήθηκαν αρκετές φορές στο πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν. Σεισμοί στην Καλιφόρνια συμβαίνουν και στα ΒΔ εκεί όπου η μικροπλάκα Gorda, της Juan de Fuca, βυθίζεται μέχρι ενός σημείου κάτω από τα βουνά Klamath αλλά και ανατολικά της Sierra Nevada στο ρήγμα SSN, που την ανυψώνει.

Η μεγαλύτερη σεισμική επικινδυνότητα (**Εικόνα 4.29**) εμφανίζεται κατά μήκος του Αγίου Ανδρέα. Σύμφωνα με την τμηματοποίηση του ρήματος υπάρχουν τμήματα του, όπου κατά την διάρκεια σεισμικών φαινομένων συμβαίνει διάρρηξη, ενώ σε άλλα τμήματα του συμβαίνει ερπυσμός (**Εικόνα 4.30**) με παραμόρφωση δομών πριν επέλθει απότομη ολίσθηση. Τμήματα του ρήματος όπου δεν έχουν συμβεί μεγάλοι σεισμοί για μεγάλα χρονικά διαστήματα οι επιστήμονες τα ονομάζουν 'σεισμικά κενά'. Η διαρκής ελαστική παραμόρφωση και η συσσώρευση ελαστικής παραμόρφωσης έχει σαν αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται μεγάλες τάσεις, που όταν υπερβούν την αντοχή του πετρώματος προκαλείται διάρρηξη και γίνεται απότομη κίνηση πάνω στο ρήγμα.

Τα τμήματα που παράγουν μεγάλους σεισμούς παραμένουν "κλειδωμένα" για εκατό ή περισσότερα χρόνια, ενώ η πίεση αυξάνεται. Επειδή το ρήγμα είναι κλειδωμένο, οι δομές κάθετα σε αυτό είναι αρχικά γραμμικές και παραμορφώνονται αργά με το χρόνο. Η παραμόρφωση αυξάνεται ώστε να επέλθει σχετική μετάθεση με τη γένεση σεισμού και οι δομές εκατέρωθεν του ρήματος μετατοπίζονται.



**Εικόνα 4.29.** Αριστερά : Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της Καλιφόρνια (USGS). Δεξιά : Μοντέλο πιθανοτήτων για εκδήλωση σεισμού με μέγεθος  $M_w = 6,7+$  στα επόμενα 30 χρόνια (USGS).





*Εικόνα 4.30. Ερπυσμός στο ρήγμα Hayward κοντά στο Hollister. Το φαινόμενο του σταθερού σεισμικού ερπυσμού έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση ανθρώπινων κατασκευών, όπως το πεζοδρόμιο της φωτογραφίας (Geoff Manaugh).*

Οι επιστήμονες συνδυάζοντας νέα δεδομένα που συνεχώς προκύπτουν από πρόσφατους σεισμούς στην Καλιφόρνια και λαμβάνοντας υπόψιν την γεωλογία, την τεχνική σεισμολογία, την παλαιοσεισμολογία και τις γεωδαιτικές μετρήσεις ανέπτυξαν το UCERF3 (*Uniform California Earthquake Rupture Forecast 3*), ένα βελτιωμένο και έγκυρο μοντέλο πρόγνωσης σεισμών σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα UCERF 1&2. Το UCERF3 παρέχει έγκυρες εκτιμήσεις για το μέγεθος, την τοποθεσία, την σεισμική επικινδυνότητα στα διάφορα τμήμα του ρήγματος αλλά και προτείνει τα κατάλληλα πρωτόκολλα έκτακτης ανάγκης που πρέπει να εφαρμοστούν σε κάθε περίπτωση ώστε να μετριαστεί ο κίνδυνος. Σε νέα μελέτη η εκτίμηση για τις πιθανότητες που έχει η Καλιφόρνια να αντιμετωπίσει ένα σεισμό μεγέθους  $M_w=8+$  μέσα στα επόμενα 30 χρόνια έχει αυξηθεί από το 4,7% , που έδινε το UCERF2, σε περίπου 7% σύμφωνα με το UCERF3.

Γεωλογικές μελέτες δείχνουν ότι κατά τα τελευταία 1.400 έως 1.500 χρόνια έχουν σημειωθεί μεγάλοι σεισμοί σε διαστήματα περίπου 150 ετών στο νότιο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα (**Schulz S. S. & Wallace R. E., 1989**). Δεδομένου ότι ο τελευταίος μεγάλος σεισμός στο νότιο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα σημειώθηκε το 1857, το εν λόγω τμήμα του ρήγματος θεωρείται πιθανή θέση για σεισμό εντός των επόμενων δεκαετιών. Η περιοχή του Κόλπου στο Σαν Φρανσίσκο έχει ελαφρώς μικρότερη πιθανότητα μεγάλου σεισμού, καθώς έχουν περάσει λιγότερα από 100 χρόνια από τον μεγάλο σεισμό του 1906. Παρόλα αυτά σεισμοί μέτριου μεγέθους μπορεί να είναι δυνητικά καταστροφικοί και να συμβούν ανά πάσα στιγμή.

Μια βασική περιοχή για την έρευνα σχετικά με τις μεθόδους πρόβλεψης των σεισμών είναι το τμήμα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα κοντά στο Parkfield στην κεντρική Καλιφόρνια, όπου τον τελευταίο αιώνα ένας σεισμός μέτριου μεγέθους συμβαίνει κατά μέσο όρο κάθε 20-22 χρόνια. Δεδομένου ότι ο τελευταίος σεισμός μεγάλου μεγέθους σημειώθηκε το 2004, το Parkfield έχει μεγάλη πιθανότητα για σεισμό μεγέθους  $M_w=5-6$  μέσα στην επόμενη δεκαετία. Το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ έχει τοποθετήσει μια σειρά από όργανα στην περιοχή του και μελετά προσεκτικά τα δεδομένα που συλλέγονται.

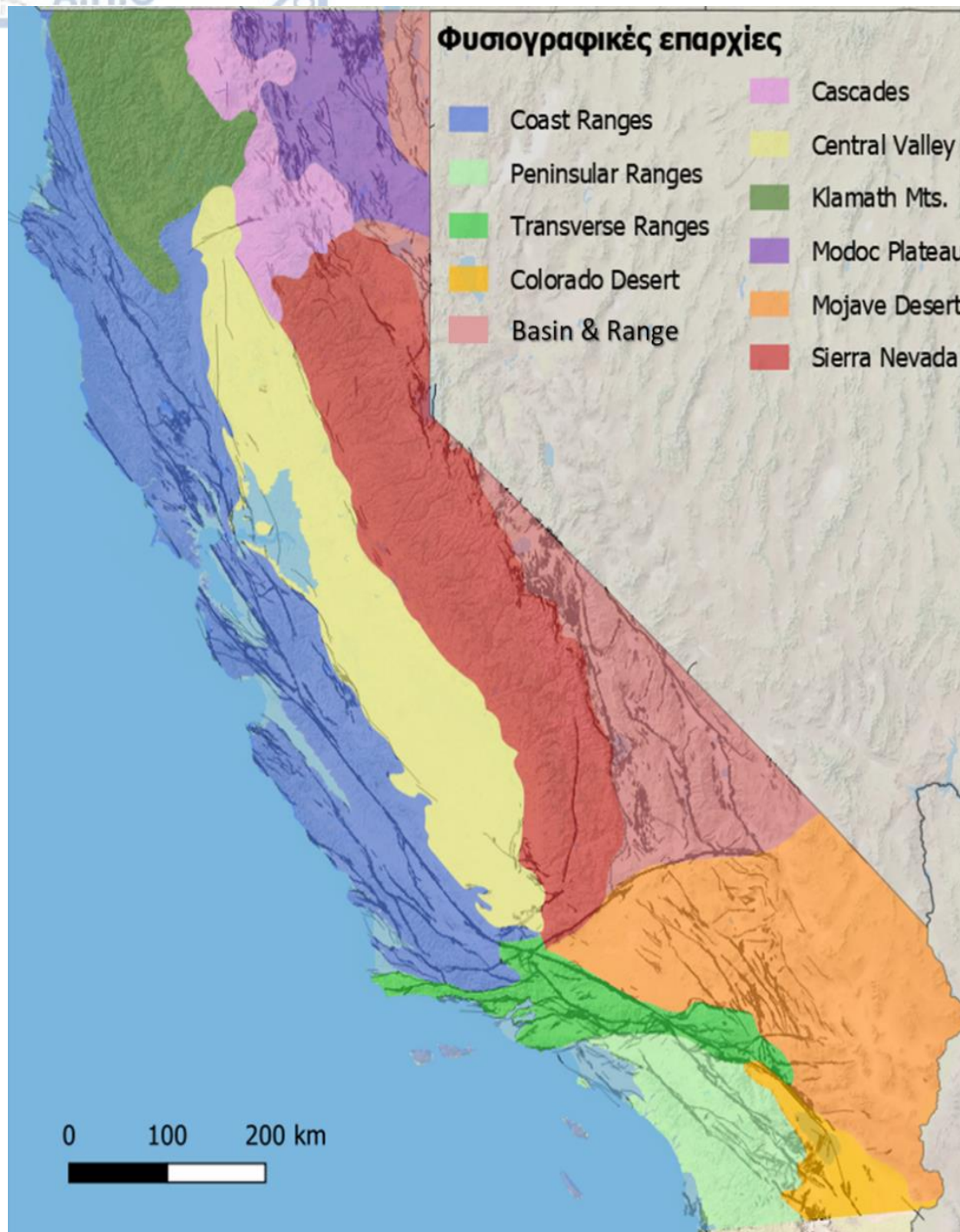




## 5. Χάρτες

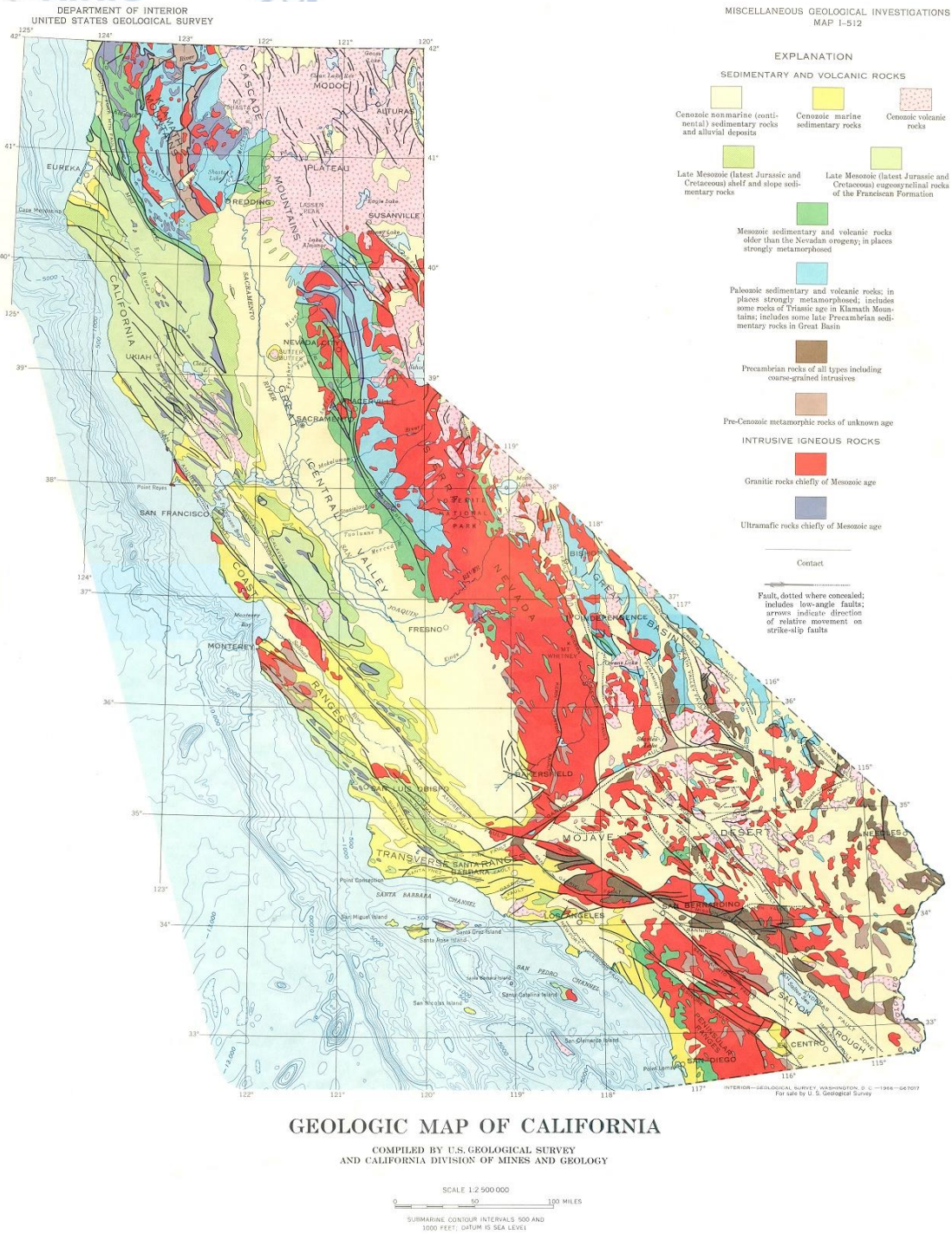


5.1 Χάρτης αναγλύφου με τις οροσειρές της Καλιφόρνια (USGS).

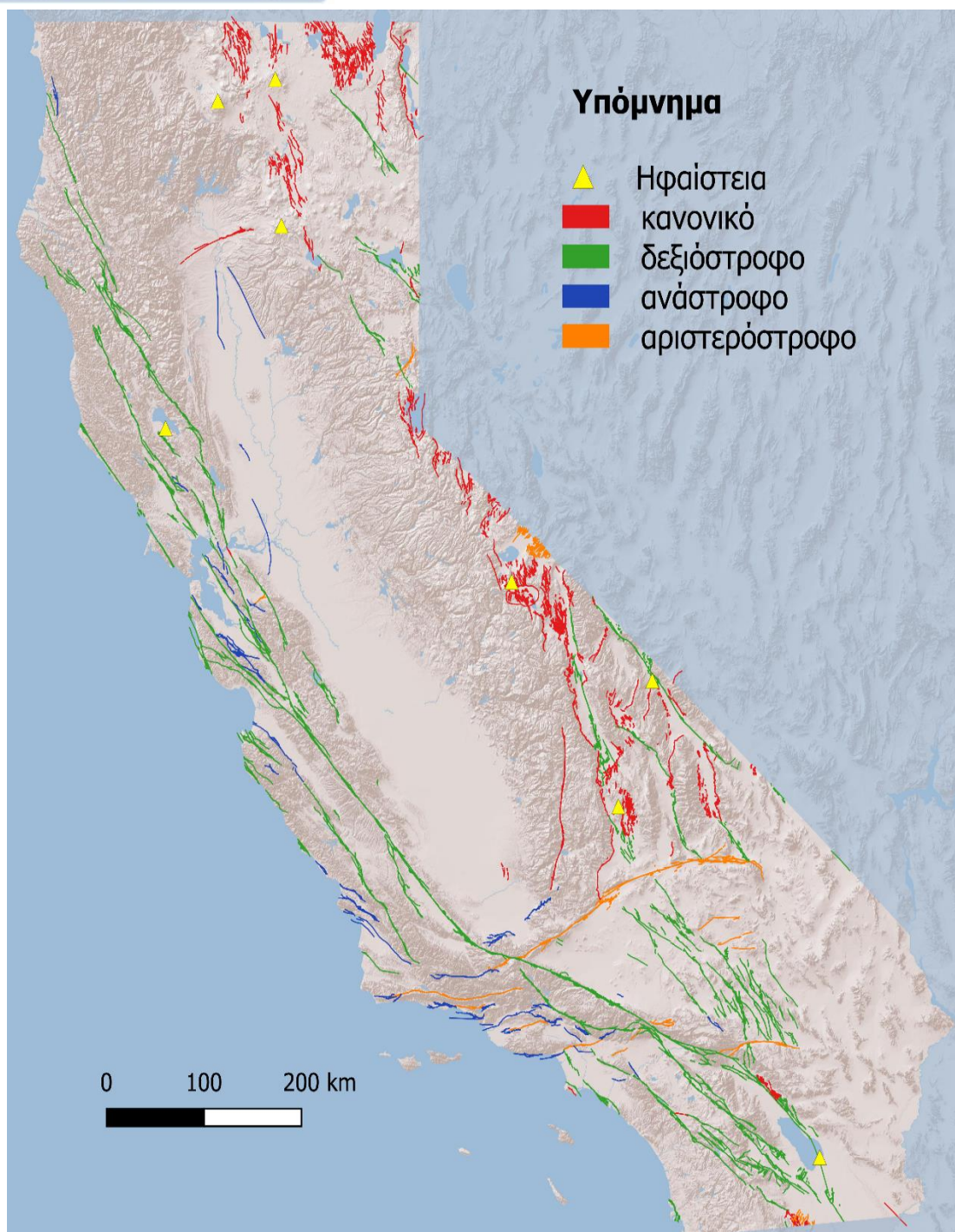


5.2 Χάρτης με τις 11 φυσιογραφικές επαρχίες της Καλιφόρνια (QGIS).





### 5.3 Γεωλογικός χάρτης της Καλιφόρνια (USGS).



5.4 Τεκτονικός χάρτης της Καλιφόρνια (QGIS).



## Βιβλιογραφία

- Alt, D. D., & Hyndman, D. W. (2016). Roadside geology of northern and central California. Mountain Press Publishing Company.
- Anders, M. H. (1994). Constraints on North American plate velocity from the Yellowstone hotspot deformation field. *Nature*, 369(6475), 53-55.
- Argus, D. F., & Gordon, R. G. (1991). Current Sierra Nevada-North America motion from very long baseline interferometry: Implications for the kinematics of the western United States. *Geology*, 19(11), 1085-1088.
- Argus, D. F., & Gordon, R. G. (2001). Present tectonic motion across the Coast Ranges and San Andreas fault system in central California. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12), 1580-1592.
- Bateman, P. C., & Eaton, J. P. (1967). Sierra Nevada Batholith: The batholith was generated within a synclinorium. *Science*, 158(3807), 1407-1417.
- Bennett et al., 1996- DeMets et al., 1994- Sieh, 1978- Sieh & Jahns, 1984)- Gauriau, J., & Dolan, J. F. (2021). Relative Structural Complexity of Plate-Boundary Fault Systems Controls Incremental Slip-Rate Behavior of Major Strike-Slip Faults. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(11), e2021GC009938.
- Blake Jr, M. C., Campbell, R. H., Dibblee Jr, T. W., Howell, D. G., Nilsen, T. H., Normark, W. R., ... & Silver, E. A. (1978). Neogene basin formation in relation to plate-tectonic evolution of San Andreas fault system, California. *AAPG Bulletin*, 62(3), 344-372.
- C. Chen, D. Zhao, S. Wu, (2014). Crust and upper mantle structure of the New Madrid Seismic Zone: Insight into intraplate earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.* 230, 1–14
- Cao, W., & Paterson, S. (2016). A mass balance and isostasy model: Exploring the interplay between magmatism, deformation and surface erosion in continental arcs using central Sierra Nevada as a case study. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(6), 2194-2212.
- Chase, C. G. (1978). Plate kinematics: The Americas, East Africa, and the rest of the world. *Earth and planetary science letters*, 37(3), 355-368.
- DeLand, J. T. (2003). Stratigraphy and Structure of the Mendenhall Gneiss, South-Central San Gabriel Mountains, California.
- Dellinger, D. A. (1989). California's unique geologic history and its role in mineral formation, with emphasis on the mineral resources of the California desert region (Vol. 1024). US Government Printing Office.
- Dickinson, W. R., Hopson, C. A., and J. B. Saleeby. 1996. Alternate origins of the Coast Range ophiolite (California): introduction and implications. *GSA Today* v. 6, no.2. p. 1-10. February 1996.
- DiPietro, J. A. (2018). *Geology and Landscape Evolution (Second Edition) : General Principles Applied to the United States*. Elsevier.
- Dokka, R. K., & Travis, C. J. (1990). Role of the eastern California shear zone in accommodating Pacific-North American plate motion. *Geophysical Research Letters*, 17(9), 1323-1326.
- Ernst, W. G. (1970). Tectonic contact between the Franciscan mélange and the Great Valley sequence—Crustal expression of a late Mesozoic Benioff zone. *Journal of Geophysical Research*, 75(5), 886-901.
- Ernst, W. G. (2009). Rise and fall of the Nevadaplano.
- Faulds, J. E., Henry, C. D., & Hinz, N. H. (2005). Kinematics of the northern Walker Lane: An incipient transform fault along the Pacific–North American plate boundary. *Geology*, 33(6), 505-508.
- Filatova, N. I., & Khain, V. E. (2008). Development of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic system as a result of interaction of adjacent continental and oceanic plates. *Geotectonics*, 42(4), 258-285.
- Galehouse, J. S., & Lienkaemper, J. J. (2003). Inferences drawn from two decades of alignment array measurements of creep on faults in the San Francisco Bay region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), 2415-2433.

- Gauriau, J., & Dolan, J. F. (2021). Relative Structural Complexity of Plate-Boundary Fault Systems Controls Incremental Slip-Rate Behavior of Major Strike-Slip Faults. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(11), e2021GC009938.
- Grand, S. P. (1987). Tomographic inversion for shear velocity beneath the North American plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B13), 14065-140.
- Grant Ludwig, L., Akciz, S. O., Arrowsmith, J. R., & Salisbury, J. B. (2019). Reproducibility of San Andreas fault slip rate measurements at Wallace Creek in the Carrizo Plain, CA. *Earth and Space Science*, 6(1), 156-165.
- Hahm, W.J., Riebe, C.R., Lukens, C.E., and Araki, S. Bedrock Composition Regulates Mountain Ecosystems and Landscape Evolution. *Proc Natl Acad Sci USA Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.9 (2014): 3338-343. Web.
- Hauksson, E., Olson, B., Grant, A., Andrews, J. R., Chung, A. I., Hough, S. E., ... & Valkaniotis, S. (2021). The normal-faulting 2020 Mw 5.8 lone pine, eastern California, earthquake sequence. *Seismological Research Letters*, 92(2A), 679-698.
- Hausback, B. P., Muffler, L. J. P., & Clynne, M. A. (2011). Sutter Buttes: The Lone Volcano in California's Great Valley. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hayward, T. W., & Bostock, M. G. (2017). Slip behavior of the queen Charlotte plate boundary before and after the 2012, MW 7.8 Haida Gwaii earthquake: evidence from repeating earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 8990-9011.
- Holm-Denoma, C. S., Hofstra, A. H., Leslie, S. A., & Noble, P. J. (2011). Paleozoic stratigraphy and kinematics of the Roberts Mountains allochthon in the Independence Mountains, northern Nevada. In *Geological Society of Nevada 2010 Symposium* (pp. 1039-1054).
- Huang H. et al., *Volcanology. The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust. Science* 348, 773–776 (2)
- Huber, N. K. (1987). The geologic story of Yosemite National Park (No. 1595). US Geological Survey.
- Jachens, R. C., Griscom, A., and C. W. Roberts. 1995. Regional extent of Great Valley basement west of the Great Valley, California: Implications for extensive tectonic wedging in the California Coast Ranges. *Journal of Geophysical Research* v. 100, no. B7, p. 12,769-12,790. July 10, 1995.
- Jayko, A. S. (2009, October). Miocene-Pliocene Uplift Rates of the Sierra Nevada, California. In *Portland Annual GSA Meeting*, Portland Oregon.
- Kaspereit, D., Mann, M., Sanyal, S., Rickard, B., Osborn, W., & Hulen, J. (2016). Updated conceptual model and reserve estimate for the Salton Sea geothermal field, Imperial Valley, California. *Geotherm. Res. Council Trans*, 40, 57-66.
- Khoshmanesh, M., & Shirzaei, M. (2018). Episodic creep events on the San Andreas Fault caused by pore pressure variations. *Nature geoscience*, 11(8), 610-614.
- Kreemer, C., Govers, R., Furlong, K. P., & Holt, W. E. (1998). Plate boundary deformation between the Pacific and North America in the Explorer region. *Tectonophysics*, 293(3-4), 225-238.
- Kreemer, C., Hammond, W. C., & Blewitt, G. (2006, December). On the motion and geometry of the Sierra Nevada Great Valley micro-plate: Implications for Walker Lane tectonics. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2006, pp. G42A-05).
- Le, K., Lee, J., Owen, L. A., & Finkel, R. (2007). Late Quaternary slip rates along the Sierra Nevada frontal fault zone, California: Slip partitioning across the western margin of the Eastern California Shear Zone–Basin and Range Province. *GSA Bulletin*, 119(1-2), 240-256.
- Lienkaemper, J. J., McFarland, F. S., Simpson, R. W., Bilham, R. G., Ponce, D. A., Boatwright, J. J., & Caskey, S. J. (2012). Long-term creep rates on the Hayward fault: Evidence for controls on the size and frequency of large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), 31-41.
- Lillie, R. J. (2005). Parks and plates: The geology of our national parks, monuments, and seashores. WW Norton.
- Mackey, K. G., Hampton, B. A., Fujita, K., Kurtkin, S., & Gounbina, L. V. (2007, December). Active faulting along the Ulakhan Fault, Seimchan-Buyunda basin, northeast Russia. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2007, pp. T13D-1579).



- Manea, V. C., Manea, M., & Ferrari, L. (2013). A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath Mexico and Central America. *Tectonophysics*, 609, 56-81.
- Marshak, S., Domrois, S., Abert, C., Larson, T., Pavlis, G., Hamburger, M., ... & Chen, C. (2017). The basement revealed: Tectonic insight from a digital elevation model of the Great Unconformity, USA cratonic platform. *Geology*, 45(5), 391-394.
- Matthews III, V. (1976). Correlation of Pinnacles and Neenach volcanic formations and their bearing on San Andreas fault problem. *AAPG Bulletin*, 60(12), 2128-2141.
- Mazur, S., Campbell, S., Green, C., & Bouatmani, R. (2015). Extension across the Laptev Sea continental rifts constrained by gravity modeling. *Tectonics*, 34(3), 435-448.
- Meade, B. J., & Hager, B. H. (2005). Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3).
- Norris, Robert M. and Robert W. Webb. *Geology of California: Second Edition*. New York John Wiley & Sons, Inc, 1990.
- Oldow, J. S., Aiken, C. L. V., Hare, J. L., Ferguson, J. F., & Hardyman, R. F. (2001). Active displacement transfer and differential block motion within the central Walker Lane, western Great Basin. *Geology*, 29(1), 19-22.
- Pierce, K. L., & Morgan, L. A. (1992). The track of the Yellowstone hot spot: Volcanism, faulting, and uplift.
- Platt, J. P., Xia, H., & Schmidt, W. L. (2018). Rheology and stress in subduction zones around the aseismic/seismic transition. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 1-12.
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T.H., LaFemina, P., Sella, G.F., Fletcher, J., and Suarez-Vidal, F., 2007, New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements: *Geophysical Journal International*, v. 170, p. 1373–1380, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x.
- Robertson, A. H. F. 1990. Sedimentology and tectonic implications of ophiolite-derived clastics overlying the Jurassic Coast Range Ophiolite, northern California. *American Journal of Science* v. 290, p. 109-163.
- Salyards, S. L., & Shoemaker, E. M. (1987). Landslide and debris flow deposits in the Thumb Member of the Miocene Horse Spring Formation on the east side of Frenchman Mountain, Nevada: A measure of basin-range extension. *Cordilleran Section of the Geological Society of America: Boulder, Colorado, Geological Society of America Centennial Field Guide*, 1, 49-51.
- Savage, J. C., Svarc, J. L., & Prescott, W. H. (1999). Deformation across the Alaska-Aleutian subduction zone near Kodiak. *Geophysical research letters*, 26(14), 2117-2120.
- Schlindwein, V., Demuth, A., Korger, E., Läderach, C., & Schmid, F. (2015). Seismicity of the Arctic mid-ocean ridge system. *Polar Science*, 9(1), 146-157.
- Schoenherr, A. A. (2017). *A natural history of California*. Univ of California Press.
- Schulz, S. S., & Wallace, R. E. (1989). *The San Andreas Fault*. Book and Open-File Reports Section, US Geological Survey.
- Shervais, J. W. (2001). Birth, death, and resurrection: The life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(1).
- Sigloch, K., McQuarrie, N., & Nolet, G. (2008). Two-stage subduction history under North America inferred from multiple-frequency tomography. *Nature Geoscience*, 1(7), 458-462.
- Stevens, C. H. (2000). *Geology of Paleozoic rocks in eastern Sierra Nevada*. Great Basin and Sierra Nevada, 2, 237.
- Stewart, J. H. (1971). Basin and Range structure: A system of horsts and grabens produced by deep-seated extension. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1019-1044.
- Stoffer, P. W. (2005). *The San Andreas Fault In The San Francisco Bay Area, California*. US Geological Survey.
- Suyehiro, K., & Mochizuki, K. (2002). Marine seismology. *INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES*, 81(A), 421-436.
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (1992). *Structural geology*. Macmillan.
- Umhoefer, P. J. (2011). Why did the southern Gulf of California rupture so rapidly?-Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin. *GSA today*, 21(11), 4-10.

- Unger, T.S. Mesozoic Plutonism in the Sierra Nevada Batholith: A Review of Works on Mineralogy and Isotopes in Relation to Models for Batholith Formation. Mesozoic Plutonism in the Central Sierra Nevada Batholith. University of Colorado Boulder, 1999.
- Wakabayashi, J. (1999). Distribution of displacement on and evolution of a young transform fault system: the northern San Andreas fault system, California. *Tectonics*, 18(6), 1245-1274.
- Wakabayashi, J. and Unruh J. R. 1995. Tectonic wedging, blueschist metamorphism, and exposure of blueschists: Are they compatible? *Geology* 23 (1): 85-88 Jan 1995
- Wallace, R. E. (1987). The San Andreas fault at Wallace Creek, San Luis Obispo County, California. Centennial Field Guide: The Decade of North American Geology-DNAG.. Cordilleran Section of the Geological Society of America, 1, 233.
- Wallace, R. E. (1990). The San Andreas fault system, California. Department of the Interior, US Geological Survey.
- Wernicke, B., & Snow, J. K. (1998). Cenozoic tectonism in the central Basin and Range: Motion of the Sierran-Great Valley block. *International Geology Review*, 40(5), 403-410.
- Whitmeyer, S. J., & Karlstrom, K. E. (2007). Tectonic model for the Proterozoic growth of North America. *Geosphere*, 3(4), 220-259.
- Zanchi, A. (1994). The opening of the Gulf of California near Loreto, Baja California, Mexico: from basin and range extension to transtensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 16(12), 1619-1639.
- Zandt, G., Myers, S. C., & Wallace, T. C. (1995). Crust and mantle structure across the Basin and Range-Colorado Plateau boundary at 37° N latitude and implications for Cenozoic extensional mechanism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6), 10529-10548.

## Ελληνική Βιβλιογραφία

- Παυλίδης, Σ. Β., 2016. Γεωλογία των Σεισμών. Εισαγωγή στη νεοτεκτονική, μορφοτεκτονική, παλαιοσεισμολογία και αρχαιοσεισμολογία (2<sup>η</sup> έκδοση). Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη 2016
- Παπαζάχος Β., Παπαζάχος Κ., Εκδόσεις Ζήτη, Νοέμβριος 2008, 2<sup>η</sup> έκδοση Δεκέμβριος 2013.
- Κίλιας Α. Α., Εισαγωγή στην τεκτονική γεωλογία. Εκδόσεις Όλυμπος, Θεσσαλονίκη 2009.