



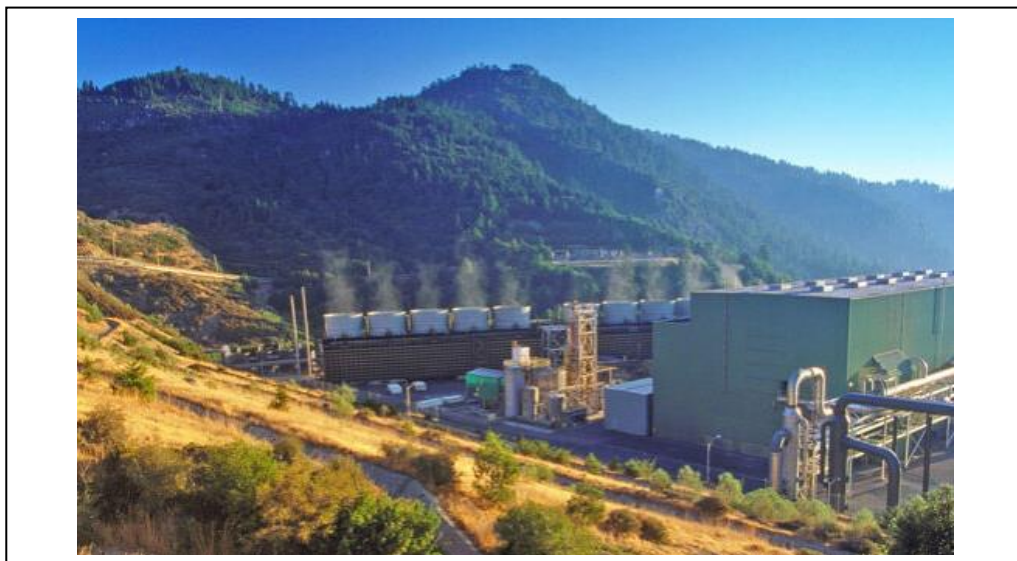
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΣΟΦΙΑ ΣΠΥΡΙΑΔΟΥ

ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ THE GEYSERS, CALIFORNIA

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ
ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ ΜΑΡΙΑ





ΣΟΦΙΑ Θ. ΣΠΥΡΙΑΔΟΥ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5918

ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ THE GEYSERS, CALIFORNIA

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωλογίας,
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέπουσα

Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, ΕΔΙΠ Τμήματος Γεωλογίας



© Σοφία Θ. Σπυριάδου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωλογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ THE GEYSERS, CALIFORNIA – *Διπλωματική Εργασία*

© Sofia T. Spyriadou, School of Geology, Dept. of Geology, 2024

All rights reserved.

THE GEOTHERMAL FIELD THE GEYSERS, CALIFORNIA – *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: Γεωθερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής Calistoga (Lake County, The Geysers) της εταιρείας Calpine (© Calpine, 2024)



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ.....	9
1.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ «THE GEYSERS».....	10
1.3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΞΗΡΟΥ ΑΤΜΟΥ..	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	14
2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	14
2.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	14
2.2.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	25
3.1 ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	25
3.2 ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ - ΡΕΥΣΤΑ.....	30
3.3. ΣΤΕΓΑΝΟ ΚΑΛΥΜΜΑ (CAP ROCK).....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ.....	34
4.1. ΠΡΩΙΜΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ (1920-1960).....	34
4.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ (1960 – ΣΗΜΕΡΑ).....	35
4.3 ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΑΝΕΙΣΑΓΩΓΗΣ - ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	54

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το γεωθερμικό πεδίο «The Geysers» (California, USA) είναι το μεγαλύτερο γεωθερμικό πεδίο στον κόσμο που αξιοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ένα από τα ελάχιστα που παράγει ξηρό ατμό. Έχει έκταση $116,54 \text{ km}^2$ και εκτείνεται σε μια περιοχή που αποτελείται από μεταμορφωμένα ιζήματα και πρόσφατα ηφαιστειακά πετρώματα. Το γεωθερμικό σύστημα τροφοδοτείται με θερμότητα από ένα εκτεταμένο σώμα όξινων πυριγενών πετρωμάτων, γνωστό και ως «φελσίτης», που εντοπίζεται σε βάθος από 0,7 έως 7,5 km και πολύ πρόσφατες μαγματικές διεισδύσεις που συνδέονται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Καλιφόρνια κατά την περίοδο Τριτογενούς-Τεταρτογενούς. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας βρίσκεται κάτω από ένα τεκτονικά επωθημένο στεγανό κάλυμμα από μεταμορφωμένα ιζήματα, και αποτελείται κυρίως από έναν έντονα τεκτονισμένο γραουβάκη, ο οποίος επιτρέπει την κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών με τη μορφή ατμού. Η γεωθερμική έρευνα στην περιοχή ξεκίνησε στις αρχές του περασμένου αιώνα (1927), μετά τις πρώτες πολύ ρηχές παραγωγικές γεωτρήσεις που έγιναν στην περιοχή, και συνεχίζεται αδιάλειπτα μέχρι σήμερα, αποκαλύπτοντας ολοένα και περισσότερα στοιχεία για τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του πολύ σημαντικού αυτού γεωθερμικού συστήματος. Η εμπορική και συστηματική αξιοποίηση του γεωθερμικού ατμού για ηλεκτροπαραγωγή ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ακολούθησε θεαματικά αυξητική πορεία μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, φτάνοντας τα 1600 MW παραγόμενης ισχύος. Από το 1987 και μετά και άρχισε να παρατηρείται σημαντική πτώση της πίεσης του ατμού στον ταμιευτήρα και, ταυτόχρονα, της παραγωγικότητας των γεωτρήσεων, φαινόμενα που αποδόθηκαν στην υπερκετάλλευση του ταμιευτήρα σε συνδυασμό με στην πολύ περιορισμένη επανατροφοδοσία του. Η κατάσταση σταθεροποιήθηκε και οι πτωτικές τάσεις ανακόπηκαν, εν μέρει λόγω συγκυριακών φαινομένων όπως η μειωμένη ζήτηση, αλλά κυρίως εξαιτίας της εφαρμογής προγραμμάτων συστηματικής επανεισαγωγής μεγάλων ποσοτήτων νερού που μεταφέρεται μέσω αγωγών από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων γειτονικών πόλεων. Σήμερα, το πεδίο Geysers, εξακολουθεί να παραμένει πρώτο παγκοσμίως όσον αφορά την παραγόμενη ενέργεια (~850 MW).



ABSTRACT

The geothermal field "The Geysers" (California, USA) is the largest geothermal field in the world used for electricity generation, and one of the few that produces dry steam. It covers an area of 116.54 km² and extends over a region composed of metamorphosed sediments and recent volcanics. The geothermal system is heated by a large body of acidic igneous rocks, known as "felsite," located at depths ranging from 0.7 to 7.5 km, along with recent magmatic intrusions associated with the Tertiary-Quaternary volcanic activity in California. The geothermal reservoir lies beneath a tectonically placed (thrust) impermeable cap of metamorphosed sediments (caprock) and mainly consists of intensely tectonized greywacke that facilitates the circulation of geothermal steam. Geothermal research began in the early 20th century (1927), using the data from the first very shallow productive drilling, and has continued uninterrupted to this day, revealing increasingly detailed information about the characteristics and properties of this significant geothermal system. Commercial and systematic utilization of geothermal steam for electricity production began in the 1960s. Power generation followed an intense upward trend until the mid-1980s, reaching 1600 MW of generated capacity. However, from 1987 onwards, a significant drop in the reservoir steam pressure, along with a decline in well productivity, was observed. These phenomena were attributed to overexploitation of the reservoir combined with very limited recharge. The situation stabilized, and the downward trends were halted, partly due to circumstantial factors such as reduced demand, but primarily as a result of systematic reinjection of large quantities of water transported through long pipelines from wastewater treatment plants in nearby towns. Today, The Geysers field continues to be the global leader in terms of energy production (~850 MW).

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «**Το Γεωθερμικό Πεδίο The Geysers, California**» εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., υπό την επίβλεψη της Δρ. Μαρίας Παπαχρήστου, διδάσκουσας του μαθήματος «Γεωθερμία» και ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωλογίας.

Αντικείμενο της εργασίας ήταν η εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα, με σκοπό την αποτύπωση των βασικών αποτελεσμάτων της διαχρονικής γεωθερμικής και γεωλογικής έρευνας στο πεδίο, η περιγραφή των χαρακτηριστικών του γεωθερμικού συστήματος και η ανάλυση του ιστορικού αξιοποίησής του.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές γεωθερμικές έννοιες (ορισμοί, επιφανειακές εκδηλώσεις, συστήματα ατμού, κλπ) καθώς και μια πρώτη εισαγωγή με γενικές πληροφορίες για το πεδίο και για τον τρόπο αξιοποίησης γεωθερμικών ταμιευτήρων ξηρού ατμού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά οι γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή που αναπτύσσεται το πεδίο και η σχέση της ηφαιστειότητας που έλαβε χώρα στην Καλιφόρνια και της εκτεταμένης γεωθερμικής ανωμαλίας στη θέση του πεδίου.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει την ολοκληρωμένη περιγραφή του γεωθερμικού συστήματος: εστία θερμότητας, ταμιευτήρας-ρευστά, στεγανό κάλυμμα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μέχρι τώρα μελετών που ήταν διαθέσιμα στη βιβλιογραφία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται το ιστορικό αξιοποίησης του πεδίου, από την πρώτη απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (1920-1927) έως και την συστηματική αξιοποίησή του (1960 – σήμερα), με αναφορά στις πιο κρίσιμες χρονολογίες και περιόδους που σημάδεψαν την ιστορία του αλλά και τη γενικότερη αντίληψη για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη όλων των στοιχείων που συλλέχθηκαν και αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας οφείλω να εκφράσω ένα μεγάλο εγκάρδιο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα της πτυχιακής μου Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, η οποία με βοήθησε με το παραπάνω στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και αυτού του αγώνα. Μου έδειξε και δίδαξε τον τρόπο διαβάσματος και συγγραφής και αποκόμισα πολλά εφόδια ώστε να μπορέσω να συνεχίσω την πορεία μου στον κλάδο της Γεωλογίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου που με στήριξε και μου συμπαραστάθηκε στις πιο δύσκολες στιγμές, την αγαπώ πολύ.

Εν κατακλείδι, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τους φίλους που απέκτησα από το Τμήμα Γεωλογίας, που συναγωνιστήκαμε μαζί και που φέραμε εις πέρας άλλο ένα στόχο ζωής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Η γεωθερμική ενέργεια ορίζεται ως η θερμότητα που βρίσκεται αποθηκευμένη στο εσωτερικό της γης και ρέει διαρκώς προς την επιφάνειά της. Πρόκειται για μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, άμεσα ή έμμεσα, είτε ως θερμότητα, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, αντίστοιχα.

Η θερμότητα της γης πολλές φορές εκδηλώνεται επιφανειακά, με τα ηφαίστεια και τις θερμές πηγές να αποτελούν από τις πλέον συχνές και γνωστές επιφανειακές εκδηλώσεις της, ενώ πιο σπάνια φαινόμενα αποτελούν οι θερμοπίδακες, οι ατμίδες, τα θερμά εδάφη κλπ.

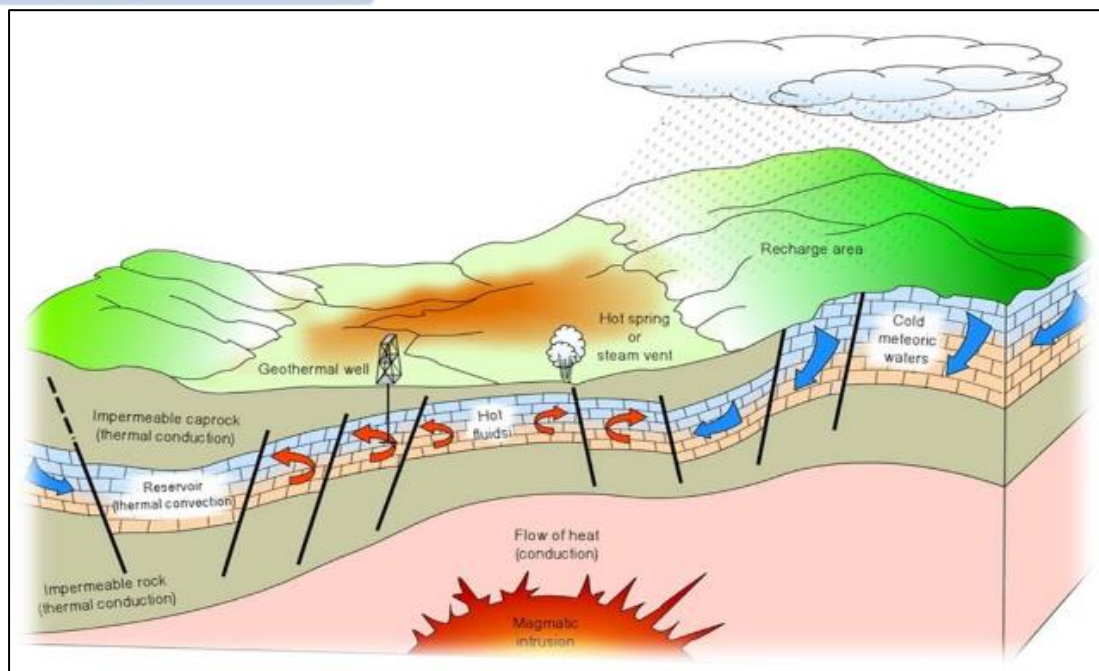
Η γήινη θερμότητα δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο στο σύνολό της, διότι οι μεγαλύτερες ποσότητες της βρίσκονται συγκεντρωμένες σε μη προσβάσιμα βάθη. Ως εκ τούτου, η εκμετάλλευση και χρήση της αφορά τα λεγόμενα «οικονομικά» βάθη, που δεν ξεπερνούν, με τη σημερινή τουλάχιστον τεχνολογία, περίπου τα 5000m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Οι γεωλογικές δομές από τις οποίες μπορεί να αντληθεί θερμότητα συνιστούν τα «γεωθερμικά συστήματα» που αποτελούνται στην πιο τυπική μορφή τους από μία πηγή θερμότητας, τον ταμιευτήρα, τα γεωθερμικά ρευστά και ένα γεωλογικό αδιαπέρατο κάλυμμα που προστατεύει τη θερμότητα από διαφυγές προς την ατμόσφαιρα (Σχήμα 1). Ο γεωγραφικός χώρος κάτω από τον οποίο αναπτύσσονται ένα ή περισσότερα γεωθερμικά συστήματα ονομάζεται *γεωθερμικό πεδίο*.

Τα γεωθερμικά συστήματα (και κατ' επέκταση τα πεδία) μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία με πολλαπλές κατηγοριοποιήσεις (Muffler et al., 1978). Δύο από τις πιο συνηθισμένες ταξινομήσεις βασίζονται :

α) στην ενθαλπία (που είναι ανάλογη της θερμοκρασίας) των ρευστών: υψηλής ($>150^{\circ}\text{C}$), μέσης ($90-150^{\circ}\text{C}$) και χαμηλής ($25-90^{\circ}\text{C}$)

β) στη φύση του ρευστού: συστήματα ατμού, συστήματα νερού ή διφασικά συστήματα



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση ενός ιδανικού γεωθερμικού συστήματος (πηγή: International Geothermal Association, <https://www.lovegeothermal.org/>)

Τα συστήματα ατμού (vapor dominated systems) είναι συστήματα υψηλής ενθαλπίας και μπορεί να παράγουν ξηρό ατμό (dry steam), κορεσμένο ατμό (saturated steam) ή υπέρθερμο ατμό (superheated steam) (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004). Τα γεωθερμικά πεδία που παράγουν ξηρό ατμό είναι σπάνια. Υπάρχουν περιπτώσεις πολλών γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας όπου οι ταμιευτήρες τους περιέχουν «ζώνες ατμού», αλλά σε πολύ λίγες περιοχές παγκοσμίως συναντώνται φυσικοί ταμιευτήρες που περιέχουν αποκλειστικά ξηρό ατμό χωρίς καθόλου ρευστά σε υγρή φάση. Αυτά είναι τα πεδία «**The Geysers**» στις ΗΠΑ (Εικόνα 1), «**Larderello**» στην Ιταλία, και «**Kamojang**», «**Darajat**» στην Ιάβα της Ινδονησίας (Allis, 2000).

1.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ «THE GEYSERS»

Το γεωθερμικό πεδίο «The Geysers» βρίσκεται στη Βορειοδυτική Καλιφόρνια, 110km βόρεια της πόλης του San Fransisco (Εικόνα 1), ακριβώς στο όριο μεταξύ της κομητείας Sonoma και της κομητείας Lake. Είναι το μεγαλύτερο γεωθερμικό πεδίο στον κόσμο που αξιοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει έκταση 116,54 km^2 και εκτείνεται σε μια περιοχή που αποτελείται από μεταμορφωμένα ιζήματα

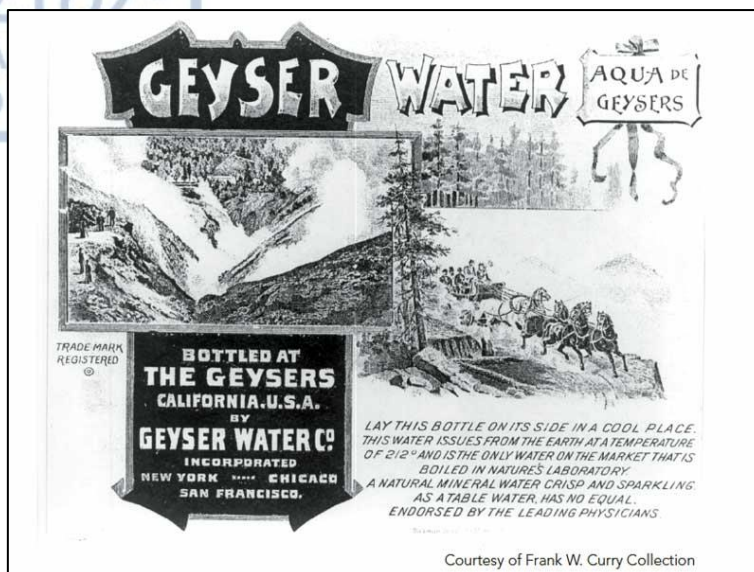
(Franciscan complex) και πρόσφατα ηφαιστειακά πετρώματα Clear Lake (Clear Lake Volcanic Field). Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας εντοπίζεται σε ένα διατμημένο και θραυστιγενή γραουβάκη, που επιτρέπει την κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών με τη μορφή ατμού (McLaughlin et al., 1981).



Εικόνα 1. Το Γεωθερμικό πεδίο "The Geysers" από την περιοχή Clear Lake (πηγή : USGS)

Οι πρώτοι κάτοικοι της περιοχής ήταν οι ιθαγενείς της Βόρειας Αμερικής, οι οποίοι γνώριζαν τις θεραπευτικές ιδιότητες των θερμών νερών και την επισκεπτόταν ακριβώς για αυτόν τον λόγο. Όταν ανακαλύφθηκε «εκ νέου», τη δεκαετία του 1840, το πεδίο αποτέλεσε έναν παγκοσμίου φήμης τουριστικό προορισμό. Το όνομά του προέρχεται από τα geysers (θερμοπίδακες), παρόλο που στην περιοχή δεν παρατηρούνται τέτοια φαινόμενα. Επειδή όμως η περιοχή έγινε εξ αρχής γνωστή ως The Geysers, διατήρησε το όνομά της για ευνόητους λόγους.

Η πρώτη αξιοποίηση στο πεδίο ξεκίνησε το 1890, με την εμφιάλωση των θερμομεταλλικών νερών του, που πολύ σύντομα άρχισαν να διατίθενται σε πολλές χώρες (Εικόνα 2).



Εικόνα 2 : Διαφημιστική αφίσα για το εμφιαλωμένο μεταλλικό νερό από το πεδίο (www.geysers.com)

Η πρώτη προσπάθεια για την ενεργειακή αξιοποίηση της γεωθερμίας έγινε τη δεκαετία του 1920, οπότε κατασκευάστηκε η πρώτη πολύ μικρού βάθους (~60m) παραγωγική γεώτρηση και η πρώτη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγική μονάδα ξηρού ατμού ισχύος 35kW από μία μικρή οικογενειακή επιχείρηση (www.geysers.com).

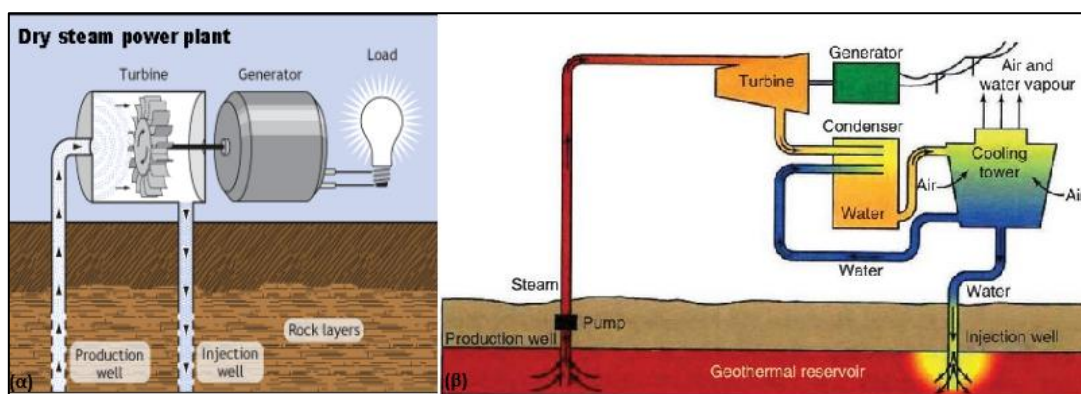
Η πρώτη γεωθερμική μελέτη εκπονήθηκε το 1927 από το Ινστιτούτο Carnegie και αφορούσε στην αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του γεωθερμικού ταμιευτήρα του πεδίου, με βάση τα δεδομένα από τις γεωτρήσεις του 1922.

Η εμπορική και συστηματική αξιοποίηση του γεωθερμικού ατμού για ηλεκτροπαραγωγή ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1960 (Rutqvist et al, 2013). Η πρώτη μονάδα (Unit-1) κατασκευάστηκε στο πεδίο από την εταιρεία "Pacific Gas & Electric" και είχε εγκατεστημένη ισχύ 11 MW. Σήμερα λειτουργούν συνολικά 18 μονάδες (USGS, 2023), 13 από τις οποίες ανήκουν στην εταιρεία "Calpine Corporation" με εγκατεστημένη ισχύ 725 MW (Calpine, 2022).

1.3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΞΗΡΟΥ ΑΤΜΟΥ

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ξηρό γεωθερμικό ατμό ονομάζεται «κύκλος ξηρού ατμού» (dry steam cycle) και αποτελεί την παλαιότερη, αποδοτικότερη και εν πολλοίς απλούστερη μέθοδο γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής.

Οι γεωθερμικές μονάδες ξηρού ατμού (dry steam power plant) είναι ουσιαστικά ατμοηλεκτρικές μονάδες ή σταθμοί (ΑΗΣ), μόνο που στην περίπτωση της γεωθερμίας ο ατμός δεν προέρχεται από καύση κάποιου υλικού ή από πυρηνική ενέργεια, αλλά παρέχεται απευθείας από τη γη. Ο ξηρός ατμός ανακτάται από τον ταμιευτήρα μέσω κατάλληλων παραγωγικών γεωτρήσεων (production wells) και οδηγείται απευθείας στην μονάδα ηλεκτροπαραγωγής (Σχήμα 2), χωρίς καθόλου ή με πολύ μικρή επεξεργασία για την αφαίρεση HCl ή τη δέσμευση άλλων επιβλαβών ουσιών (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004). Ο ξηρός και υψηλής πίεσης ατμός οδηγείται σε έναν ή περισσότερους ατμοστροβίλους (τουρμπίνες) που μετατρέπουν την ενέργειά του σε κινητική, από την οποία στη συνέχεια παράγεται ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτρογεννήτριας (generator, Σχήμα 2α). Ο θερμός ατμός μετά τη χρήση του στους ατμοστροβίλους, μεταφέρεται στους πύργους ψύξης (cooling towers, Σχήμα 2β) με σκοπό την υγροποίησή του και την απομάκρυνση της λανθάνουσας θερμότητάς του (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004). Σε υγρή μορφή πλέον, το γεωθερμικό ρευστό εισέρχεται και πάλι στο υπέδαφος (στον ταμιευτήρα) μέσω των γεωτρήσεων επανεισαγωγής (injection well - Σχήμα 2β).



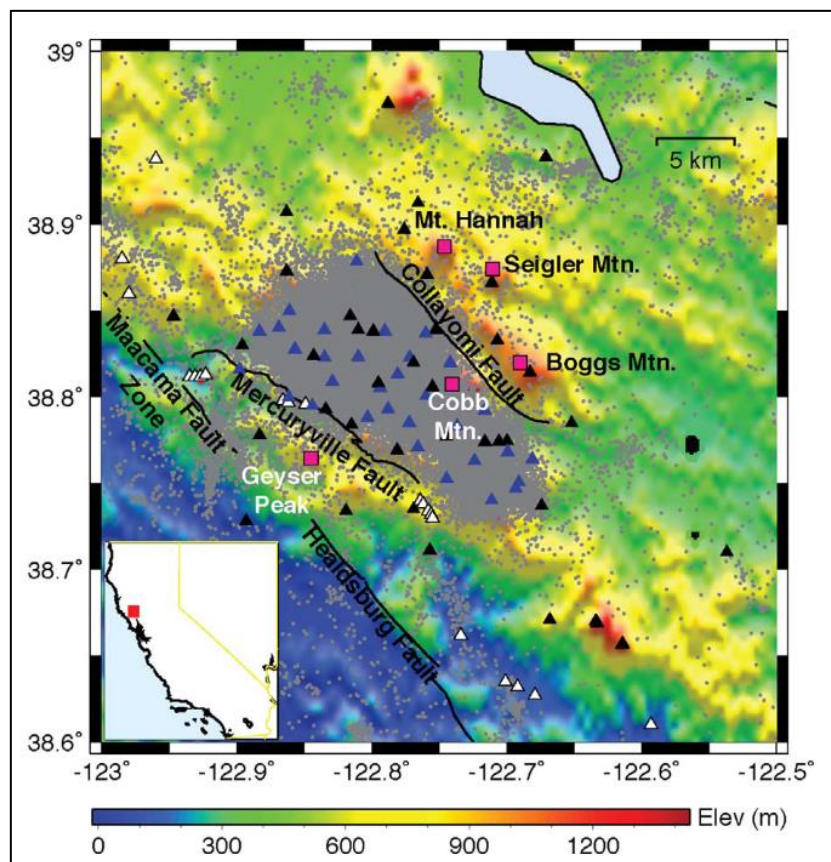
Σχήμα 2. Απεικόνιση μονάδας παραγωγής ξηρού ατμού (πηγή: US Energy Department, www.eia.gov και Abdelrahman Fawzy, 2020).

Οι ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες ξηρού ατμού είναι από τις πιο αποτελεσματικές μονάδες παραγωγής καθώς προσφέρουν ενεργειακά οφέλη με πολύ χαμηλό κόστος (Chamorro et al., 2012). Από θερμοδυναμική άποψη, οι μονάδες αυτές παράγουν τις μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας ανά κιλό γεωθερμικού ρευστού (Mondejar and Chamorro, 2017). Είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν για εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της καθαρά χρήσης ξηρού ατμού. Μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σχεδόν τέλεια απόδοση και υψηλούς ρυθμούς παραγωγής (Song et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

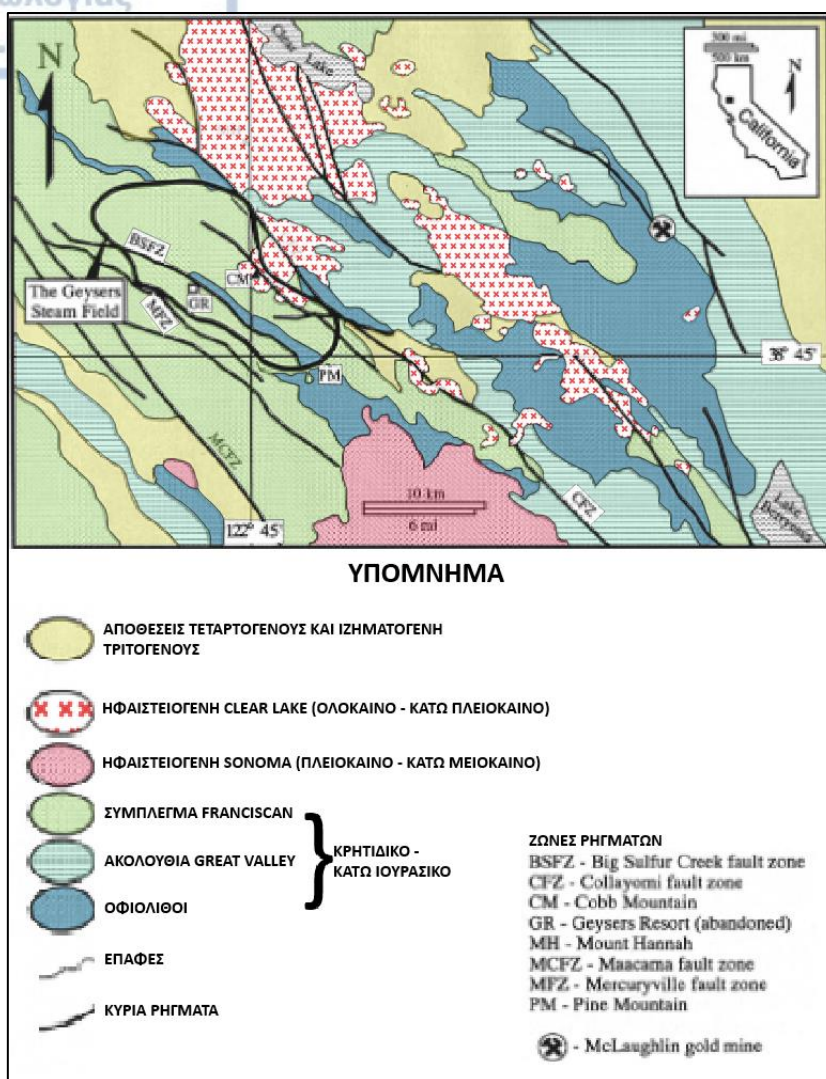
Το γεωθερμικό πεδίο “The Geysers” (Σχήμα 3), βρίσκεται στην βορειοδυτική Καλιφόρνια, οριοθετείται εντός μια έκτασης $116,54 \text{ km}^2$ και περιστοιχίζεται από ορεινούς όγκους όπως το όρος Geyser Peak (δυτικά) και τα όρη Cobb, Boggs, Seigler, και Hannah από τα ανατολικά (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Οι κύριες γεωλογικές δομές στην περιοχή μελέτης, συμπεριλαμβανομένων των κύριων ρηγμάτων (μαύρες γραμμές) και των οροσειρών (ροζ τετράγωνα) (πηγή: Lin and Wu, 2018).

2.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το γεωθερμικό πεδίο The Geysers αναπτύσσεται μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς του συμπλέγματος Franciscan Complex, τους οφιόλιθους της παράκτιας ζώνης της Καλιφόρνιας (Coast Range Ophiolite - CRO) και τα ηφαιστειακά πετρώματα του περιοχής Clear Lake. Στον ευρύτερο χώρο συναντώνται επίσης τα ηφαιστειακά πετρώματα Sonoma, και η ιζηματογενής ακολουθία Great Valley (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Γεωλογικός χάρτης του γεωθερμικού πεδίου The Geysers, με τα κύρια ρήγματα και τις γεωλογικές ακολουθίες (πηγή: McLaughlin et al., 1981).

Τα μεταμορφωμένα και τεκτονισμένα πετρώματα του Franciscan Complex συνδέονται με μια παλιά ζώνη καταβύθισης κατά μήκος των δυτικών ακτών της βόρειας Αμερικής. Στην περιοχή του γεωθερμικού πεδίου εμφανίζονται μεταγραουβάκες, άργιλοι και αργιλικόι σχιστόλιθοι, ραδιολαρίτες, πυριτόλιθοι, εξαλλοιωμένοι υποθαλάσσιοι βασάλτες και σχιστόλιθοι πλούσιοι σε γλαυκοφανή. Η ηλικία τους κυμαίνεται από το κατώτερο Ιουρασικό (180-190 Ma) μέχρι το Μειόκαινο (15 Ma) (McLaughlin, 1982). Αναπτύσσονται σε έναν άξονα περίπου B-N, παράλληλα στο ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο μεταξύ των τεκτονικών πλακών της Βόρειας Αμερικής και του Ειρηνικού, ενώ βρίσκονται σε επαφή με την ακολουθία των

πετρωμάτων της Μεγάλης Κοιλιάδας (Great Valley Sequence) που με τη σειρά τους αποτέθηκαν πάνω στους οφιόλιθους της παράκτιας ζώνης (CRO).

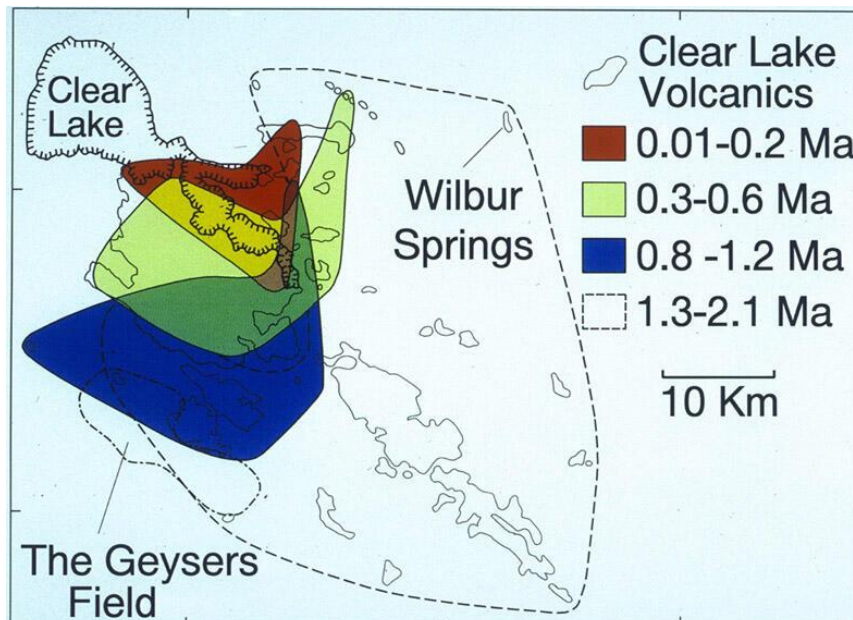
Οι οφιόλιθοι της παράκτιας ζώνης (CRO) συνιστούν το υπόβαθρο του δυτικότερου περιθωρίου της κεντρικής και βόρειας Καλιφόρνιας. Αποτελούνται κυρίως από σχηματισμούς μαξιλαροειδούς λάβας (pillow lava), ωκεάνιων βασαλτών και μεταμορφωμένων περιδοτιτών με τη μορφή σερπεντινίτη (Bailey et al., 1970) .

Ένα μεγάλο τμήμα του γεωθερμικού πεδίου The Geysres αναπτύσσεται στο νοτιοδυτικό περιθώριο της ηφαιστειακής περιοχής Clear Lake (Clear Lake Volcanic Field – CLVF, Σχήμα 4), που πήρε το όνομά της από την ομώνυμη λίμνη. Οι σχηματισμοί του συγκεκριμένου ηφαιστειακού κέντρου εντοπίζονται περίπου 150 km βόρεια της πόλης του San Francisco και 50 km ανατολικά του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα (Καλιφόρνια). Η ηλικία τους κυμαίνεται από 2,1 Ma έως 8,5 ka πριν (Σχήμα 5), πρόκειται δηλαδή για πολύ νέα ηφαιστειακά - τα νεότερα σε όλη τη δυτική Καλιφόρνια. Αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από πυριτικές λάβες (ρυοδακίτες) καθώς και βασαλτικούς ανδεσίτες, ανδεσίτες και δακίτες (USGS, 2023) Η πιο πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα οδήγησε στην απόθεση στρωμάτων τέφρας, στάχτης και βομβίδων (Εικόνα 3) που συνδέονται με μία σειρά κρατήρων μάαρ (Maar: δακτυλοειδείς κρατήρες που πληρώθηκαν με νερό - ηφαιστειολίμνες, Εικόνα 4) και κώνων σκωριών που πιθανότητα εξερράγησαν πριν από 40.000 έως 8.500 χρόνια (USGS, 2023). Η πιο εντυπωσιακή γεωλογική δομή είναι το όρος Konociti. Πρόκειται για έναν ηφαιστειακό δόμο ηλικίας 300.000 ετών (Πλειστόκαινο) που αποτελείται κυρίως από δακίτη (Εικόνα 5), με νεότερες λάβες σε κάποιες κορυφές, που αποτελούν δείγμα νεότερης δραστηριότητας (USGS, 2023).

Η περιοχή που παρατηρείται η σημαντική θερμική ανωμαλία (συμπεριλαμβανομένης της έκτασης του γ/θ πεδίου) ονομάζεται «γεωθερμική περιοχή The Geysers-Great Lake». Η ύπαρξη μιας ευρείας και σημαντικής ανωμαλίας Bouguer καθώς και οι χαμηλές ταχύτητες σεισμικών κυμάτων, υποδεικνύουν ότι σε κάποιο βάθος κάτω από τα ηφαιστειακά πετρώματα της Great Lake υπάρχει ένας μεγάλος μαγματικός θάλαμος που αποτελεί την πηγή θερμότητας του γεωθερμικού πεδίου (McLaughlin et al., 1981).



Εικόνα 3 : Ηφαιστειακές αποθέσεις στην περιοχή Clear Lake (πηγή: USGS, 2019)



Σχήμα 5 : Η ηλικία και η θέση των σχηματισμών των τεσσάρων περιόδων ηφαιστειακής δραστηριότητας στην περιοχή Clear Lake (πηγή: USGS, 2023).



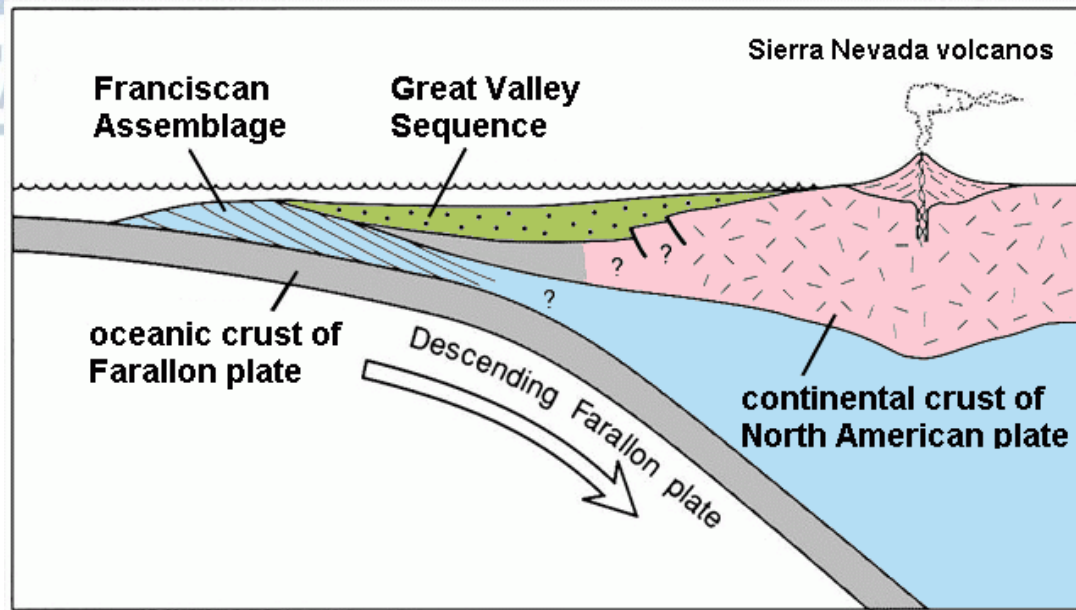
Εικόνα 4: Η λίμνη Little Borax, κατά μήκος των δυτικών ακτών της Clear Lake αποτελεί ένα μικρό μάαρ και μία από τις νεότερες δομές στην περιοχή (πηγή: USGS, 2023).



Εικόνα 5 : Στο βάθος της εικόνας διακρίνεται το ηφαιστειακό όρος Konociti (πηγή; USGS, 2019)

Οι ηφαιστειακοί σχηματισμοί της περιοχής Sonoma (SVF) είναι κυρίως Πλειοκαινικής ηλικίας και εντοπίζονται νότια του γεωθερμικού πεδίου. Αποτελούνται κυρίως από ανδεσίτη, ρυόλιθο, οψιδιανό, πυροκλαστικούς τόφφους, κίσηρη και ροές βασαλτών (Kunkel et al.,1960; Graymer et al.,2006).

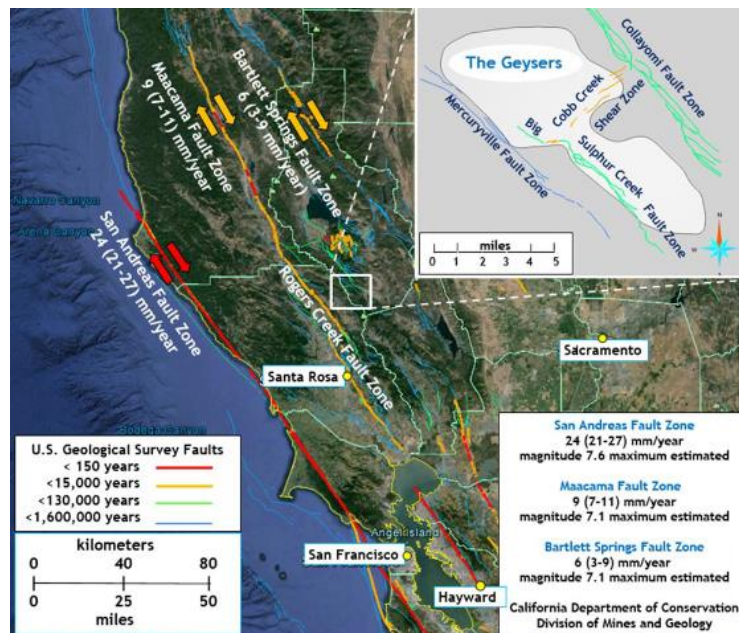
Δυτικά του γεωθερμικού πεδίου, κατά μήκος της ακτογραμμής της Καλιφόρνιας, (Dickinson et al.,1972) αναπτύσσεται η ιζηματογενής ακολουθία Great Valley, με πάχος 12 km. Πρόκειται για Μεσοζωικά (Κατώτερο Ιουρασικό-Κρητιδικό) πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από σχιστόλιθους και ψαμμίτες (Bailey et al.,1964). Τα πετρώματα αυτά αποτέθηκαν κατά κύριο λόγο πάνω σε βασάλτες της σειράς CRO, μέσα σε μια αρχαία θαλάσσια λεκάνη που οριοθετείται προς τα δυτικά από τις παράκτιες οροσειρές της Καλιφόρνιας και ανατολικά από τη Sierra Nevada. Θωρείται ότι η ακολουθία Great Valley αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τα ιζήματα που αποτέθηκαν σε μια εμπροσθοτόξια λεκάνη (forearc basin) η οποία δημιουργήθηκε λόγω της σύγκλισης τεκτονικών πλακών στη δυτική ακτή της Βόρειας Αμερικής κατά την περίοδο του Ιουρασικού και του Κρητιδικού. Η σύγκλιση αφορούσε την καταβύθιση ωκεάνιου φλοιού κάτω από ηπειρωτικό περιθώριο, πολύ πριν τη δημιουργία του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα (Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την θέση της λεκάνης Great Valley στην ευρύτερη περιοχή της δυτικής Καλιφόρνιας και την καταβύθιση της ωκεάνιας κάτω από την ηπειρωτική τεκτονική πλάκα (πηγή: Irwin et al.,1990)

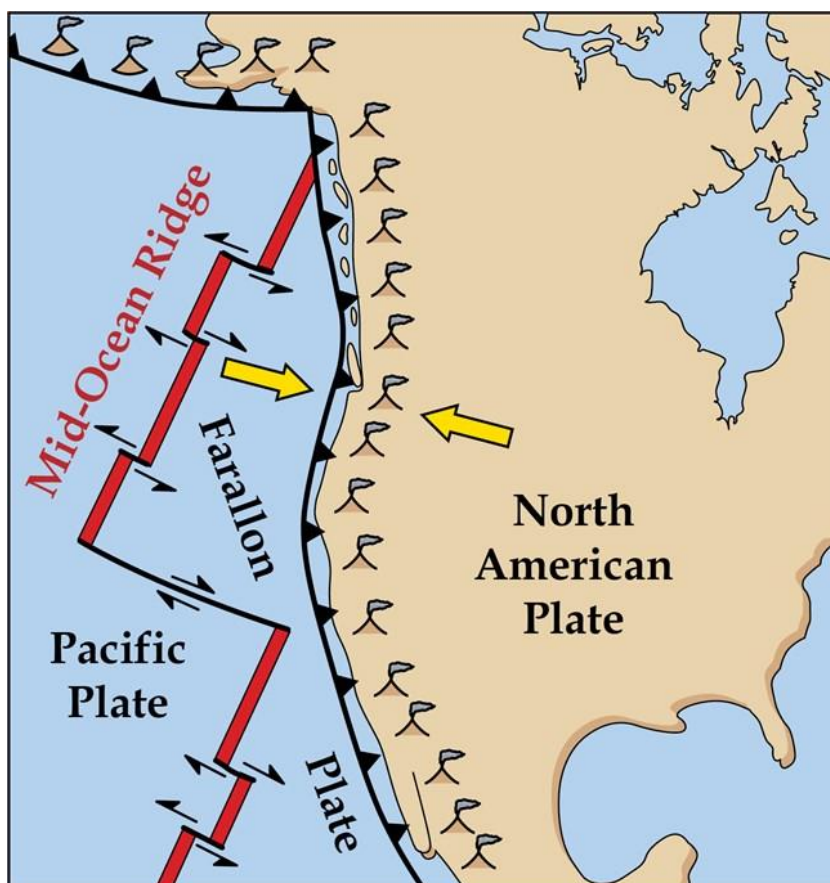
2.2.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

Το γεωθερμικό πεδίο The Geysers οριοθετείται δυτικά από το δεξιόστροφο οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα Mercuryville (Mercuryville Fault Zone) και ανατολικά από το ρήγμα Collayomi (Collayomi Fault Zone) (Σχήμα 7).



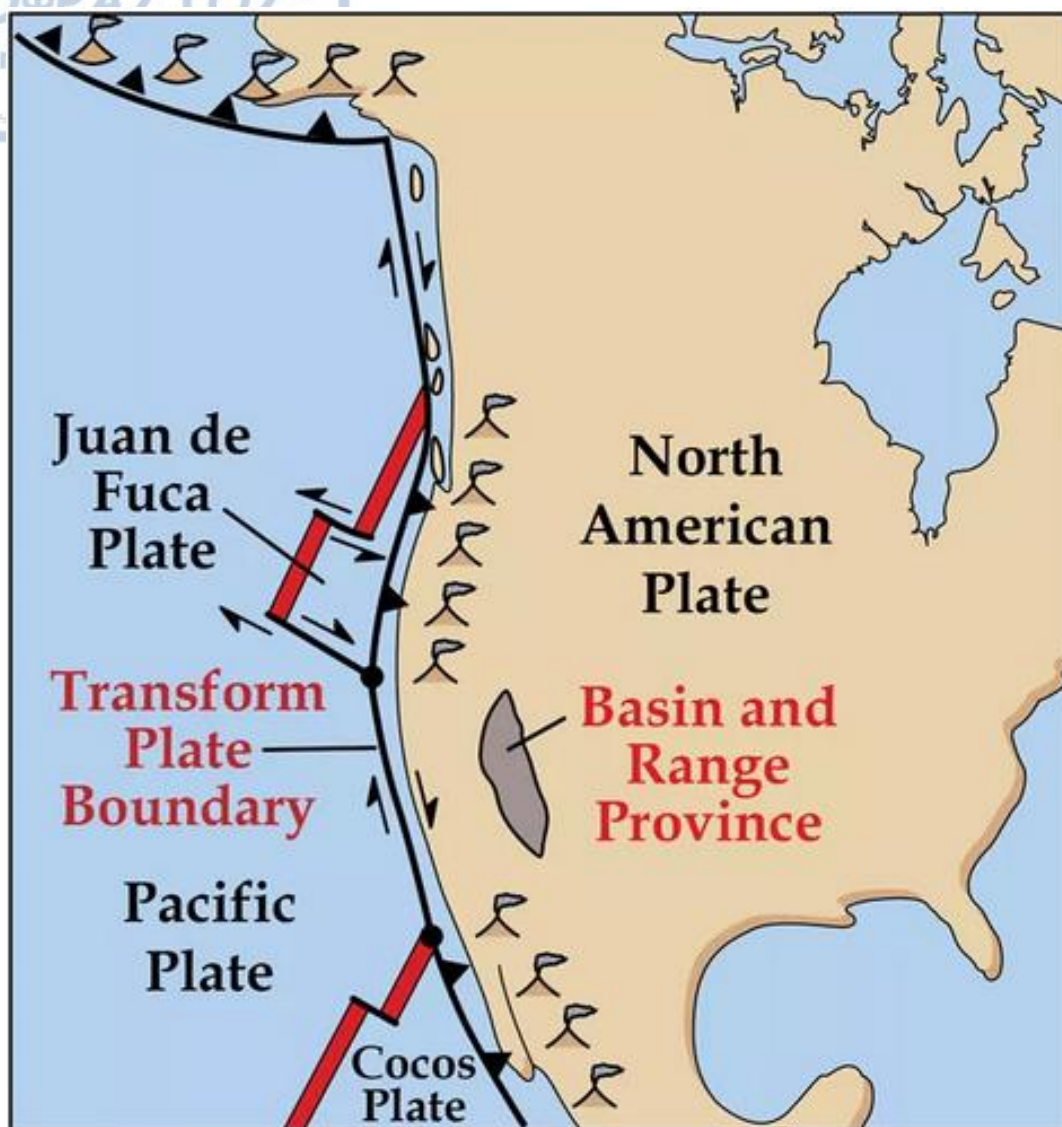
Σχήμα 7 : Ζώνες ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή του γεωθερμικού πεδίου The Geysers (πηγή: Hartline, Walter and Wright,2019).

Εντός της έκτασης που καλύπτει το πεδίο υπάρχει το ρήγμα Big Sulphur Creek (BSCF) και η ζώνη διάτμησης Cobb Creek (Cobb Creek shear zone). Τα συστήματα ρηγμάτων της περιοχής αντιπροσωπεύουν την παλιά υποβύθιση των πλακών Ειρηνικού και Farallon κάτω από την δυτική πλευρά της Βορειοαμερικανικής τεκτονικής πλάκας, πριν από 40 Ma (Σχήμα 8).



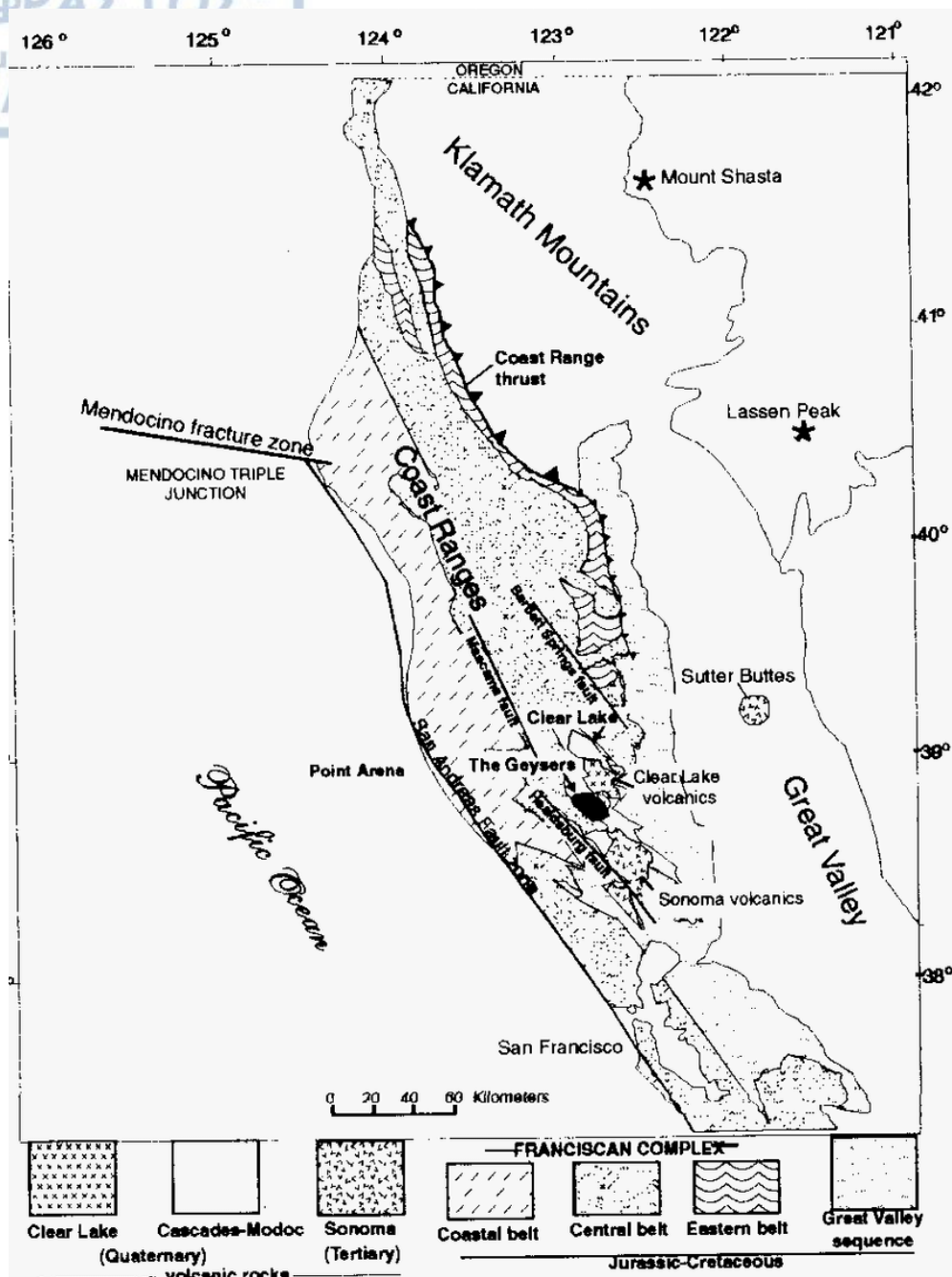
Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση της υποβύθισης των πλακών Farallon και Ειρηνικού κάτω από την Βορειοαμερικανική, πριν από 40Ma (πηγή: National Park Service).

Την περίοδο του Ηωκαίνου, η μεσοωκεάνια ράχη που χώριζε τις τεκτονικές πλάκες Ειρηνικού και Farallon, εισήλθε στην ζώνη υποβύθισης της Αμερικανικής με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό της πλάκας Farallon στις νέες τεκτονικές πλάκες Juan De Fuca και Cocos Plates (Σχήμα 9). Εξαιτίας της σύνδεσης των τριών πλακών (triple junction), προκλήθηκε μια μετακίνηση δεξιόστροφης κατεύθυνσης που σήμερα αποτελεί τη ζώνη ρηγμάτων του Αγίου Ανδρέα (Hartline, Walters and Wright, 2019).



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση της ένωσης των τριών πλακών Ειρηνικού, Αμερικανικής και Χονάν δε Φούκα
(πηγή : National Park Service)

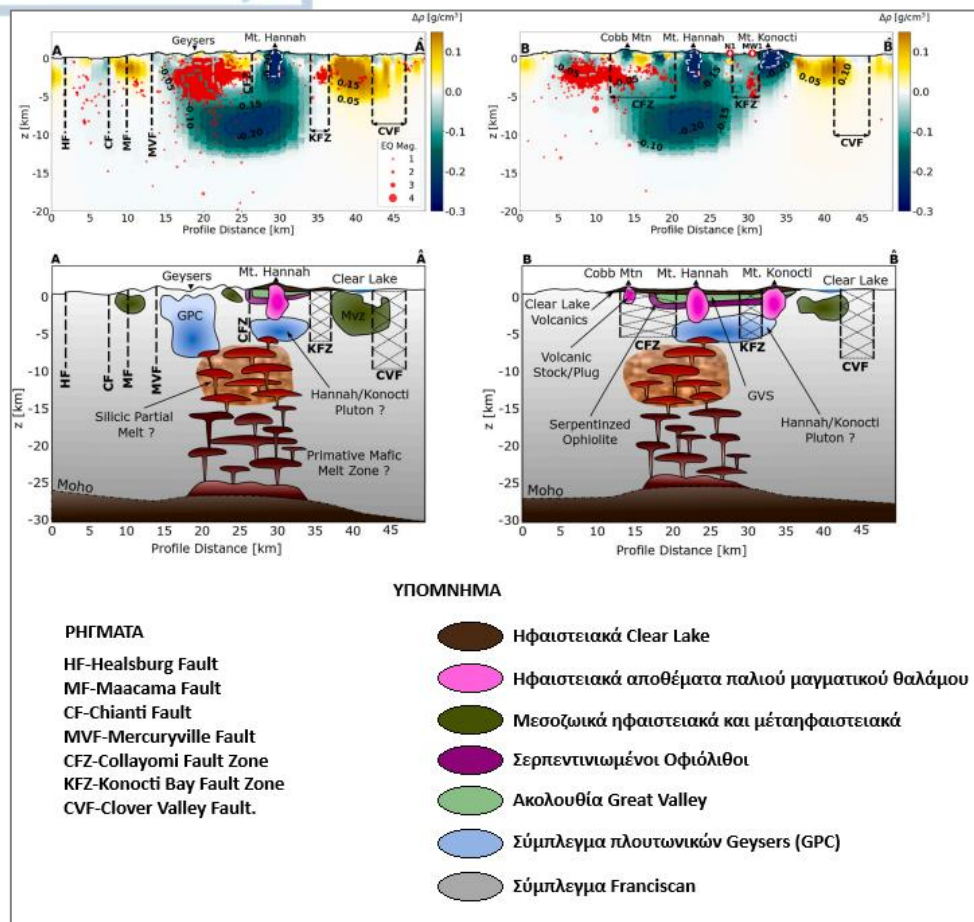
Το σημείο που συνδέονται οι τρεις τεκτονικές πλάκες μετακινήθηκε κατά μήκος του περιθωρίου της Βόρειας Αμερικανικής πλάκας, από την Νότια Καλιφόρνια στην τωρινή της θέση, στο ακρωτήριο Mendocino της Βόρειας Καλιφόρνιας (Σχήμα 10) (Stanley and Rodriguez, 1992). Πιστεύεται ότι η μετακίνηση αυτή ήταν η αιτία πρόκλησης ηφαιστειακής δραστηριότητας στην Καλιφόρνια, κατά την περίοδο του Τριτογενούς-Τεταρτογενούς (Dickinson and Sydnor, 1979; Donnelly and Hearn, 1981).



Σχήμα 10 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης με την θέση του ακρωτηρίου Mendocino (πηγή: McLaughlin, 1981)

Η συγκεκριμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα συνδέεται με τις μαγματικές διεισδύσεις που θεωρούνται ότι αποτελούν την πηγή θερμότητας του γεωθερμικού πεδίου, όπως αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια. Τα πλουτωνικά σώματα που εντοπίστηκαν μετά από γεωφυσικές έρευνες (Isherwood, 1975) σε βάθη 7 km κάτω από τα ηφαιστειακά πετρώματα της περιοχής Clear Lake (CLVF, Σχήμα 4), πήραν την ονομασία Geysers Plutonic Complex (GPC), ενώ στη βιβλιογραφία συναντώνται και

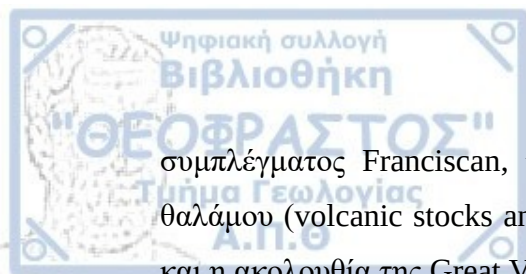
με την ονομασία μαγματικό σύστημα The Geysers (crystal magmatic system in The Geysers) ή φελσίτης (felsite).



Σχήμα 11 : Τομές του γεωθερμικού πεδίου The Geysers με τις θέσεις των ρηγμάτων και τα υπόκεντρα των σεισμών στην περιοχή (πηγή : Mitchel, Peacock and Burgess, 2023).

Οι μαγματικές διεισδύσεις δημιουργήθηκαν όταν κατά το Τεταρτογενές υπήρχε συνεχής ροή μάγματος από μεγαλύτερα βάθη προς την επιφάνεια, μέσω των ρηγμάτων Collayomi και Mercuryville (Σχήμα 7), προκαλώντας επαναλαμβανόμενη τήξη των πλουτωνικών πετρωμάτων και διατήρησαν το σύστημα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Τα ρήγματα αυτά αποτελούν μέρος του συστήματος ρηγμάτων του Αγίου Ανδρέα και δημιουργήθηκαν λόγω βόρειο-βορειοανατολικής συμπίεσης (McLaughlin, 1981).

Στο Σχήμα 11 απεικονίζονται οι τομές ΑΑ και ΒΒ με ΒΑ-ΝΔ και ΒΒΑ-ΝΝΔ διεύθυνσης, που δείχνουν ακριβώς τη σύνδεση των γεωλογικών σχηματισμών του γεωθερμικού πεδίου με τα ρήγματα της περιοχής και τα υπόκεντρα των σεισμών (Mitchel et al., 2023) και φυσικά τα βάθη των μαγματικών διεισδύσεων και θαλάμων. Στην επιφάνεια κυριαρχούν οι σχηματισμοί Clear Lake και πετρώματα του



συμπλέγματος Franciscan, και βαθύτερα τα ηφαιστειακά του παλιού μαγματικού θαλάμου (volcanic stocks and plugs), τα ηφαιστειακά του Μεσοζωικού, οι οφιόλιθοι και η ακολουθία της Great Valley.

Σύμφωνα με τους Mitchel, Peacock and Burgess (2023), παρόλο που όλα τα ρήγματα συμβάλουν στην τροφοδοσία του μαγματικού θαλάμου GPC ως μικροί αγωγοί μάγματος (volcanic vents), τον κυριότερο ρόλο παίζουν τα ρήγματα Collayomi και Mercuryville. Στις γεωφυσικές τομές (Σχήμα 11, πάνω) απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα τα υπόκεντρα των σεισμών, οι εντάσεις των σεισμών και η θέση τους. Τα περισσότερα υπόκεντρα βρίσκονται κοντά ή εντός του μαγματικού θαλάμου.

Η τροφοδοσία του πλουτωνικού συμπλέγματος Geyser (GPC) συνεχίζεται μέχρι και σήμερα μέσω των ρηγμάτων Collayomi και Mercuryville (Peacock et al.,2020), ενώ η διαρκής άνοδος μάγματος αναμένεται να συνεχιστεί και στο μέλλον μέσω του ίδιου μηχανισμού (Stanley and Rodriguez,1992).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το γεωθερμικό σύστημα του πεδίου The Geysers αποτελείται τυπικά από τον ταμιευτήρα με τα γεωθερμικά ρευστά (ατμός), το στεγανό κάλυμμα και την πηγή θερμότητας. Το συγκεκριμένο γεωθερμικό πεδίο έχει αποτελέσει αντικείμενο διαχρονικών και διεξοδικών μελετών (ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα), με συλλογή τεράστιου όγκου δεδομένων για την πληρέστερη κατανόηση των συνθηκών δημιουργίας, τη λειτουργία, την προέλευσή του κλπ. Τα συνοπτικά αποτελέσματα των ερευνών αυτών παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

3.1 ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2.2 η πηγή θερμότητας του γεωθερμικού πεδίου είναι ένα εκτεταμένο μαγματικό σώμα που στη βιβλιογραφία είναι γνωστό ως GPC (σύμπλεγμα πλουτωνικών πετρωμάτων του Geysers) ή φελσίτης (felsite). Πρόκειται ουσιαστικά για όξινους πυριγενείς (γρανιτικούς) σχηματισμούς με ηλικία Πλειόκαινο ή και νεότερα (Truesdell et al., 1991; Lowenstern et al., 1999). με διεύθυνση B-N και βάθος από 0,7 έως 7,5 km (Peacock et al., 2020; Moore et al., 2001).

Ενδείξεις για την ύπαρξη ενός μαγματικού θαλάμου και πολύ πρόσφατων διεισδύσεων υπήρχαν από την αρχή της γεωθερμικής έρευνας στην περιοχή (Kennedy and Truesdell, 1996), οι οποίες βασίστηκαν σε γεωχημικά και γεωλογικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα η υψηλή θερμική ροή ακριβώς στη θέση του πεδίου (>12 Heat Flow Units) σε σχέση με γειτονικές περιοχές όπου η θερμική ροή δεν ξεπερνά τις 2HFU (Kennedy and Truesdell, 1996; Walters and Combs, 1991), γειτνίαση με την ενεργή ηφαιστειακή περιοχή της Clear Lake με πολύ νέα πετρώματα-προϊόντα πρόσφατης (0,03Ma) εκρηξιγενούς δραστηριότητας (Donnelly-Nolan et al., 1981), γεωφυσική έρευνα (Chapman, 1975; Isherwood, 1981; Iyer et al., 1981) κλπ.

Η γεωχημική έρευνα έπαιξε διαχρονικά σημαντικότατο ρόλο στην ανίχνευση των χαρακτηριστικών των γεωθερμικών ρευστών του πεδίου που αποτελούν δείκτες για την προέλευσή τους (μετεωρικό ή μαγματικό νερό), την τροφοδοσία του πεδίου και φυσικά την αναγνώριση της πηγής θερμότητας.

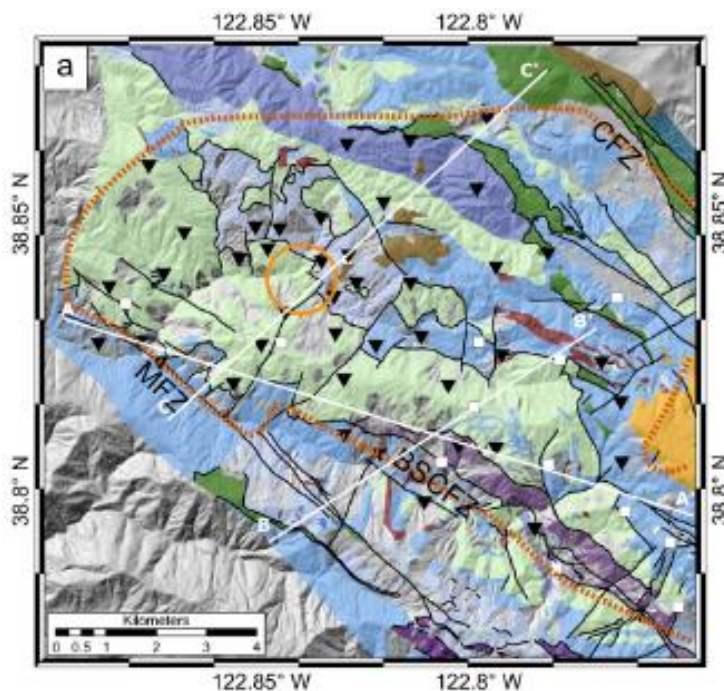
Το κύριο μαγματικό σώμα έχει συναντηθεί σε γεωτρήσεις του νοτιοανατολικού και του νότιου-κεντρικού τμήματος του πεδίου, ενώ προς το βορά το σώμα αυτό προφανώς

βρίσκεται σε μεγαλύτερα βάθη. Φλέβες πυριγενών πετρωμάτων έχουν βρεθεί κατά τη διάνοιξη γεωτρήσεων σε όλο το πεδίο.

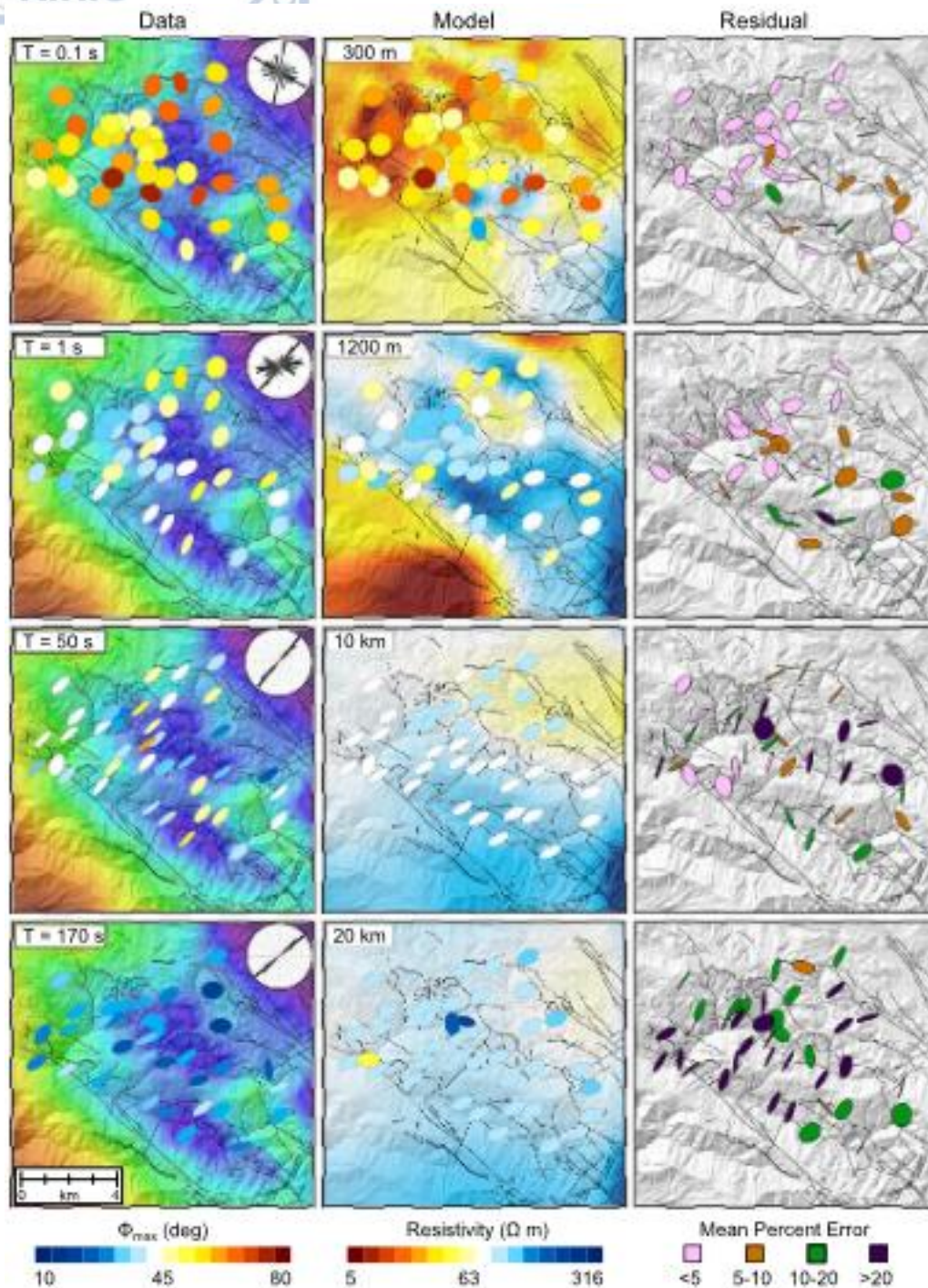
Για τη χαρτογράφηση του μαγματικού σώματος σημαντικό ρόλο έπαιξε τα τελευταία χρόνια η γεωφυσική έρευνα η οποία ξεκίνησε το 1972 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα (Peacock et al., 2020), εκμεταλλευόμενη τις νέες διαθέσιμες τεχνολογίες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της.

Η γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε σε κάποιες από τις πιο πρόσφατες μελέτες (Peacock et al., 2020) ήταν η μαγνητοτελλουρική (MT). Η MT είναι μία παθητική γεωφυσική μέθοδος που μετρά την ηλεκτρική απόκριση της Γης σε φυσικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία (Peacock et al. 2020; Chave and Jones, 2012). Ο λόγος των μετρούμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σχετίζεται με την υπο-επιφανειακή ηλεκτρική ειδική αντίσταση μέσω της συνάρτησης μεταφοράς MT, η οποία είναι ευαίσθητη προς τα ρευστά. Συλλέχθηκαν δεδομένα για την βορειοδυτική περιοχή του πεδίου από 41 σταθμούς MT (Σχήμα 12).

Οι ελλείψεις φάσεων (Σχήμα 13) απεικονίζουν τα επιφανειακά στρώματα πιο αγωγίμα από τα βαθύτερα, υποδεικνύοντας ότι έχουν υποστεί υδροθερμική εξαλλοίωση.



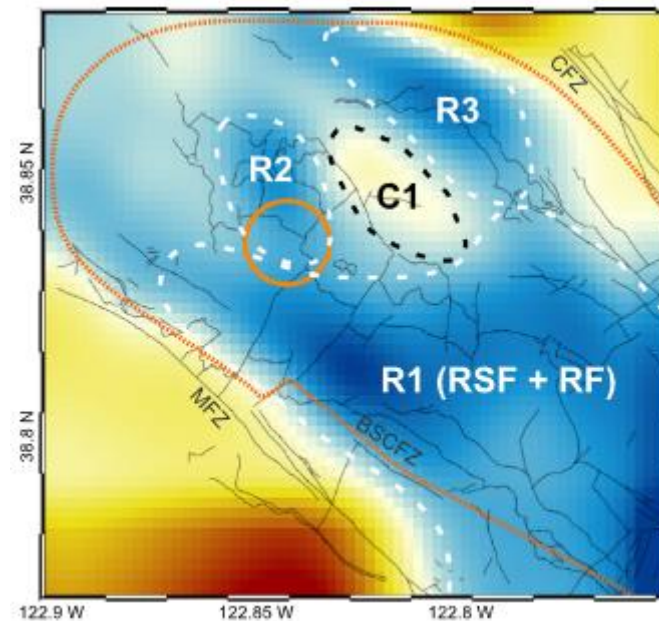
Σχήμα 12: Χάρτης με τους 41 σταθμούς MT στο γεωθερμικό πεδίο (διακεκομμένο πορτοκαλί περίγραμμα) και τα 3 κύρια ρήγματα MFZ- Mercurille Fault Zone, BSCFZ- Big Sulphur Creek Fault Zone, CFZ- Colloiyami Fault Zone (πηγή: Peacock et al., 2020).



Σχήμα 13 : Δεδομένα τανυστών ελλείψεων φάσεων (αριστερή στήλη), μοντέλο ειδικής αντίστασης (μεσαία στήλη) και η διαφορά των 2 (δεξιά στήλη). (πηγή: Peacock et al., 2020)

Έπειτα από την αναπαράσταση των στοιχείων MT σε τρισδιάστατο μοντέλο ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας αντίστροφο κώδικα ModEM (Egbert and Kelbert, 2012; Peacock et al., 2020), εντοπίστηκαν τρία κύρια σώματα. Τα στρώματα κοντά στην επιφάνεια απεικονίζουν ένα μίγμα αγωγικών και με μικρή ειδική ηλεκτρική

αντίσταση υλικών που συνδέονται με τα πετρώματα του Franciscan complex. Το σώμα με την μεγαλύτερη ειδική αντίσταση R1 ($>60 \Omega m$) αντιπροσωπεύει ένα συνδυασμό με το ανώτερο στρώμα του ταμιεντήρα (RSF- Resistive Steam Field) και το κατώτερο το πλουτωνικό σώμα GPC (Geysers Plutonic Complex). Το σώμα R2 αποτελεί μέρος του GPC και το σώμα R3 μέρος του R1. Το C1 είναι μία αγώγιμη ανωμαλία ($< 30 \Omega m$) που επεκτείνεται μέχρι την επιφάνεια (Σχήμα 14).

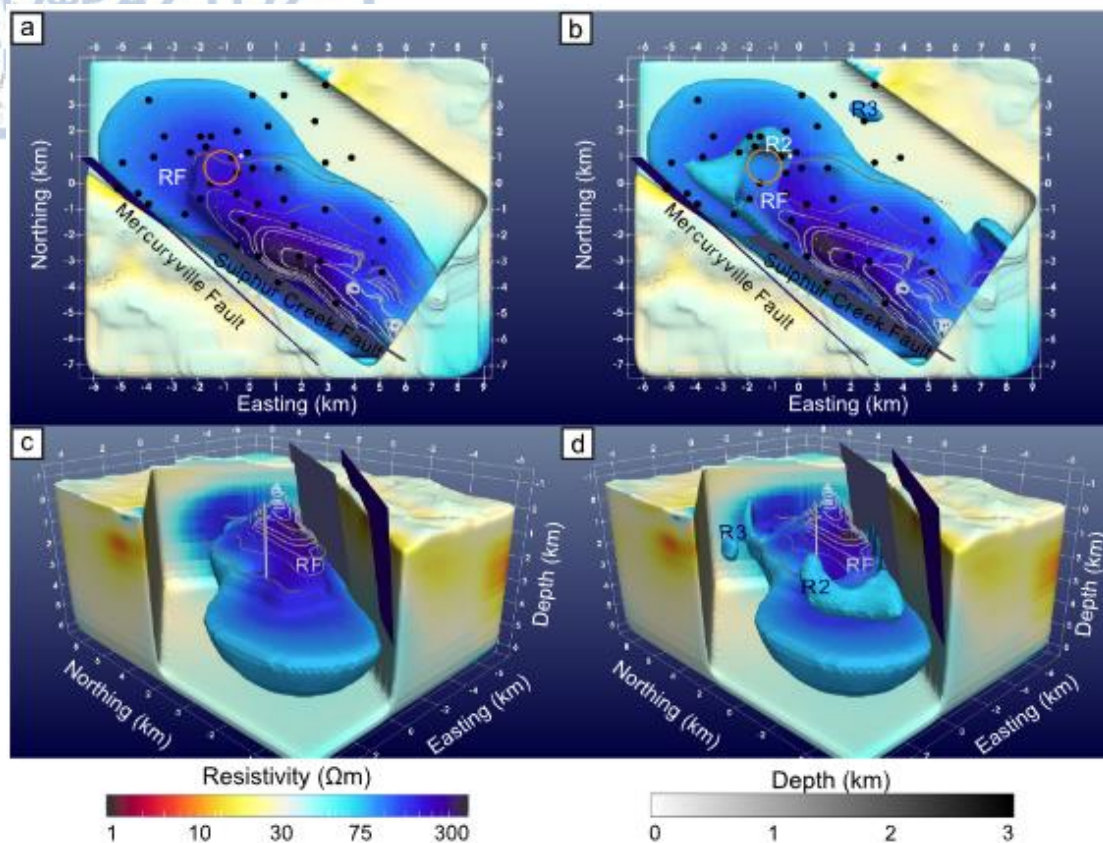


Σχήμα 14 : Τομή βάθους στα 1200 m του 3D μοντέλου ειδικής αντίστασης MT με τις θέσεις ανωμαλιών (πηγή: Peacock, 2020). MFZ- Mercurille Fault Zone, BSCFZ- Big Sulphur Creek Fault Zone, CFZ- Colloayami Fault Zone.

Για την χαρτογράφηση του GPC και την εκτίμηση της γεωμετρίας του (Σχήμα 15) χρησιμοποιήθηκε :

- γνωστό βάθος της ανώτερης επιφάνειας, και
- όριο ειδικής αντίστασης $70 \Omega m$

Ωστόσο, επειδή το βάθος του GPC είναι άγνωστο, η περιοχή βορειοδυτικά του γνωστού βάθους ορίζεται ως ελεύθερη παράμετρος με το κατώτερο όριο ειδικής αντίστασης $50 \Omega m$ για να επιτρέπονται στο μοντέλο υψηλότερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 15 : Μοντέλο 3D ειδικής αντίστασης του GPC. Εικόνες α και c αντιπροσωπεύουν την ειδική αντίσταση σε γνωστά βάθη του GPC και υποθέτουν ότι το βάθος αυξάνεται προς τα Βόρεια. Εικόνες b και d βάζουν άγνωστο συντελεστή Βόρεια του GPC και δείχνουν τα ανώμαλα σημεία του GPC, R2 και R3. Τα R2 και R3 είναι ελαφρώς λιγότερο ανθεκτικά από το κύριο σώμα του GPC υποδηλώνοντας υψηλότερες θερμοκρασίες και μικρότερες ηλικίες (πηγή: Williams et al., 1993 and Peacock et al., 2020).

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής μελέτης, το πλουτωνικό σώμα GPC οριοθετείται στα βορειοανατολικά από τη ζώνη ρηγμάτων Collayomi και προς τα νοτιοδυτικά από τη ζώνη ρηγμάτων Mercuryville (Σχήμα 15). Και οι δύο ζώνες συνδέονται με το σύστημα ρηγμάτων του Αγίου Ανδρέα (Hearn et al., 1988) και θεωρούνται υπεύθυνα για τη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών (εφελκυστικές τάσεις) που επιτρέπουν την άνοδο του μάγματος (Peacock et al., 2020). Ο ρόλος των ρηγμάτων στη δημιουργία των μαγματικών διεισδύσεων αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.2.2.

Οι μαγματικές διεισδύσεις έλαβαν χώρα σε διάφορες φάσεις ξεκινώντας πριν από 1,75 εκατομμύρια έτη (Ma) (Schmitt et al., 2003b). Η κύρια φάση των διεισδύσεων άρχισε πριν από περίπου 1.2 Ma, ως γρανοδιορίτης. Πριν από 1.0–0.9 Ma, η θερμοκρασία του είχε πέσει κάτω από 350°C (Dalrymple et al., 1999; Schmitt et al., 2003b). Με βάση την ηλικία και την πολύ γρήγορη ψύξη του μάγματος, σήμερα η θερμοκρασία του μαγματικού σώματος δεν θα έπρεπε να ξεπερνά τους 130 C περίπου

(Norton and Hulen, 2001). Επειδή όμως αυτό δεν έχει συμβεί, προφανώς υπάρχουν νεότερες μαγματικές διεισδύσεις που διατηρούν το γεωθερμικό σύστημα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Williams et al., 1993; Dalrymple et al., 1999; Norton and Hulen, 2001; Stimac et al., 2001). Σύμφωνα με τα μοντέλα θερμικής ροής μια πολύ πρόσφατη (περίπου πριν 11 χιλιάδες χρόνια -ka) διείσδυση στο βορειοδυτικό τμήμα του πεδίου, όπου παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες γεωθερμικές βαθμίδες, προσέφερε επιπλέον θερμότητα στο γεωθερμικό σύστημα (Williams et al., 1993; Stimac et al., 2001; Norton and Hulen, 2001; Lowenstern and Janik, 2005).

3.2 ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑΣ - ΡΕΥΣΤΑ

Ο ταμιευτήρας του γεωθερμικού πεδίου αναπτύσσεται κυρίως μέσα σε μεγάλου πάχους και έκτασης μετα-ιζήματα του Ιουρασικού που ανήκουν στο Franciscan complex. Αποτελείται από μετρίου βαθμού μεταμορφωμένο γραουβάκη, με παρουσία γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων και πυριτικών ορυκτών (Lipman et al., 1978). Ο γραουβάκης έχει μεγάλη συνεκτικότητα και μικρή πρωτογενή περατότητα (<3% πορώδες και <1md περατότητα), όμως είναι έντονα τεκτονισμένος (δευτερογενής περατότητα), με την παραγωγικότητά του να εξαρτάται από τον αριθμό, το μέγεθος και την υδραυλική επικοινωνία των διακλάσεων και των ρωγμών μέσα στις οποίες φιλοξενούνται και κυκλοφορούν τα γεωθερμικά ρευστά.

Οι επωθήσεις που έλαβαν χώρα κατά την περίοδο από το Ιουρασικό έως το Τριτογενές οδήγησαν στη δημιουργία οριζόντιας ή υπο-οριζόντιας περατότητας τόσο στα πετρώματα του ταμιευτήρα όσα και σε αυτά του υπερκείμενου καλύμματος. Στη συνέχεια (από το Τριτογενές μέχρι σήμερα) η τεκτονική δραστηριότητα προκάλεσε τοπικά έντονες, κατακόρυφες ρηγματογενείς ζώνες, οι οποίες συχνά αποτελούν τον στόχο των κεκλιμένων γεωθερμικών παραγωγικών γεωτρήσεων.

Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωτρήσεις του γεωθερμικού πεδίου The Geysers παράγουν ξηρό ατμό, παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις κατά τα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης ο παραγόμενος ατμός μπορεί να είναι υγρός. Το ευρέως αποδεκτό μοντέλο του πεδίου με κυρίαρχο ρευστό τον ατμό (vapor dominated system) που παρουσιάστηκε αρχικά από τους White, Muffler and Truesdell (1971) και Truesdell and White (1973), υποστηρίζει ότι ο ταμιευτήρας περιέχει υψηλής κινητικότητας ατμό μέσα σε μεγάλες διακλάσεις και ρωγμές και νερό σε υγρή μορφή που είναι

πρακτικά ακίνητο και παγιδευμένο μέσα σε πολύ μικρές και απομονωμένες ρωγμές (Weres et al., 1977) ή απορροφάται από τις θερμές επιφάνειες.

Στις περιοχές που βρίσκονται υπό εκμετάλλευση (λειτουργούν παραγωγικές γεωτρήσεις), λόγω μείωσης της πίεσης αλλά και λόγω της θερμότητας των πετρωμάτων, το περισσότερο μέρος του νερού σε υγρή μορφή φτάνει σε σημείο βρασμού και μετατρέπεται σε ατμό. Καθώς η εκμετάλλευση προχωρά, η πίεση συνεχίζει να πέφτει ακόμη περισσότερο, οπότε η περιοχή όπου επικρατούν συνθήκες βρασμού επεκτείνονται όλο και πιο μακριά από τη γεώτρηση. Ο βρασμός της υγρής φάσης συνεχίζεται μέχρι το πέτρωμα να γίνει ξηρό ή μέχρι το μόνο νερό σε υγρή μορφή να εγκλωβιστεί σε απομονωμένες ρωγμές. Το νερό αυτό στον υπό εκμετάλλευση ταμιευτήρα μετατρέπεται τελικά σε ατμό λόγω της συνεχιζόμενης μείωσης της πίεσης.

Σε περιοχές του πεδίου που δεν είχαν υποστεί προηγούμενη εκμετάλλευση, οι περισσότερες γεωτρήσεις κατά τα αρχικά στάδια της άντλησης παράγουν ένα μίγμα νερού και ατμού επί μέρες ή και μήνες μετά την έναρξη λειτουργίας της παραγωγικής γεώτρησης. Στη συνέχεια παράγουν κορεσμένο ή ελαφρά υπέρθερμο ατμό. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αρχική άντληση ρευστών από μία παραγωγική ζώνη που βρίσκεται κοντά στην οροφή του ταμιευτήρα με κυρίαρχο ρευστό το νερό ή της άντλησης διαφασικών ρευστών (νερό + ατμός) από παραγωγική ζώνη που περιέχει νερό σε υγρή μορφή με κάποια κινητικότητα, όπου όμως η μείωση της πίεσης να μην είναι αρκετή για να προκαλέσει την πλήρη μετατροπή του σε ατμό (Truesdell et al., 1991).

Μέχρι σήμερα, σε καμία από τις εκατοντάδες γεωτρήσεις που έχουν διανοιχθεί στο πεδίο και έφτασαν σε βάθη έως 3,9 km, δεν έχουν βρεθεί ρευστά σε υγρή μορφή, γεγονός που υποδηλώνει ότι όλο το νερό που υπήρχε αρχικά μέσα στις ρωγμώσεις έχει όντως μετατραπεί σε ατμό (Moore et al., 2001 και περιεχόμενη βιβλιογραφία).

Σύμφωνα με τους Moore et al. (2001), αλλά και παλαιότερες μελέτες (Hulen et al., 1991; Moore et al., 1998), οι συνθήκες επικράτησης του ατμού στο πεδίο επιτεύχθηκαν πριν από 0,28 έως 0,25 Ma και το σύστημα παραμένει έτσι έως σήμερα.

Η θερμοκρασία του παραγόμενου ατμού δεν είναι ενιαία σε όλο το πεδίο. Στο βορειοδυτικό και στο βόρειο-κεντρικό τμήμα του πεδίου, αναπτύσσονται δύο κύριες παραγωγικές ζώνες (Lowenstern et al., 1999), οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους (Walters et al., 1992). Ο ταμιευτήρας που αναπτύσσεται σε μικρότερο βάθος

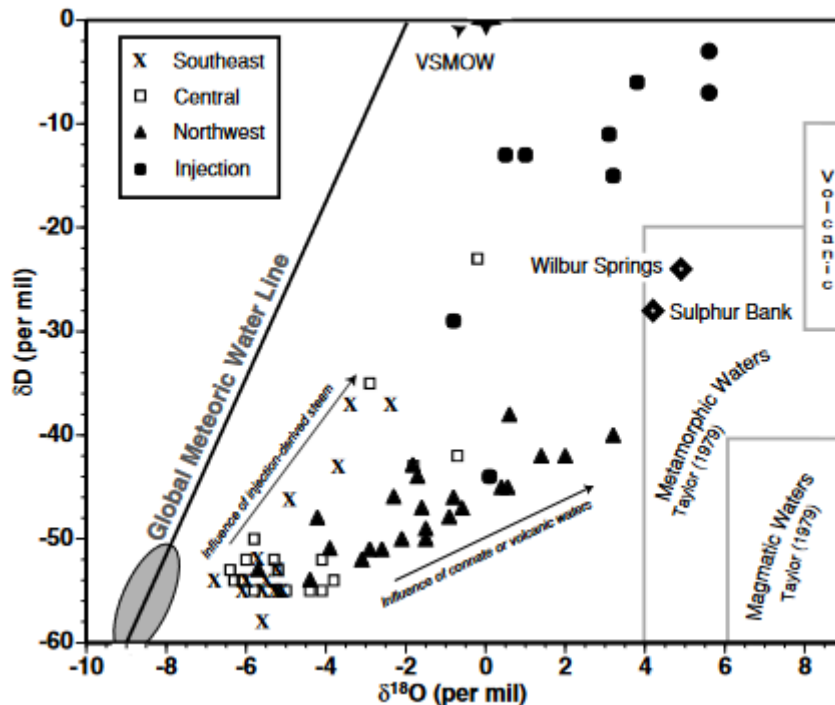
ονομάζεται NTR (Normal Temperature Reservoir) και περιέχει ρευστά θερμοκρασίας έως 240°C, με πίεση 35 bars. Ο βαθύτερος ταμιευτήρας ονομάζεται HTR (High Temperature Reservoir) αναπτύσσεται μέσα σε μεταγραφουβάκη που περιέχει ακτινόλιθο, βιοτίτη και πλούσιο σε ασβέστιο πλαγιόκλαστο, ορυκτά που δημιουργήθηκαν λόγω μεταμόρφωσης επαφής. Η πίεση στον βαθύτερο ταμιευτήρα είναι παρόμοια με αυτήν στον NTR, όμως οι θερμοκρασίες συνήθως ξεπερνούν τους 300°C (Walters et al., 1992), και φτάνουν τους 400° (Lutz et al., 2012).

Στο νοτιοανατολικό τμήμα του πεδίου απουσιάζει η HTR ζώνη και υπάρχει διαφοροποίηση κυρίως όσον αφορά στην προέλευση των γεωθερμικών ρευστών (Lowenstern et al., 1999). Στο τμήμα αυτό η τροφοδοσία του ταμιευτήρα θεωρείται ότι επιτυγχάνεται κυρίως από μετεωρικά νερά, όπως θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους (Kennedy and Truesdell, 1996; Lowenstern et al., 1999).

Τα γεωθερμικά ρευστά διαφοροποιούνται και ως προς τη χημική και ισοτοπική τους σύσταση ανάμεσα στο βόρειο-βορειοδυτικό και στο νότιο και νότιο-κεντρικό τμήμα του πεδίου. Στη μελέτη της Γεωλογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (Lowenstern et al., 1999; USGS), η οποία αφορά στη χημική και ισοτοπική ανάλυση 81 δειγμάτων ατμού που συλλέχθηκαν από το 1978 μέχρι το 1991, ελέγχθηκε η περιεκτικότητα του ατμού σε CO_2 , H_2S , He, H_2 , O_2 , Ar, N_2 , CH_4 , NH_3 , δD και $\delta^{18}O$ του H_2O , $\delta^{13}C$ του CO_2 και $\delta^{14}S$ του H_2S). Τα δείγματα προερχόταν από 74 γεωθερμικές γεωτρήσεις που παρήγαγαν κορεσμένο ατμό. Η ισοτοπική ανάλυση είχε ως σκοπό τη συσχέτιση του οξυγόνου του γεωθερμικού ρευστού με αυτό του μετεωρικού νερού, και κατ' επέκταση τη διερεύνηση του μηχανισμού τροφοδοσίας του υδροθερμικού συστήματος.

Στο νοτιοανατολικό τμήμα του πεδίου ο ατμός έχει την ισοτοπική υπογραφή μετεωρικού ελαφρώς οξυγονωμένου νερού (Truesdell et al., 1987). Αυτό υποδεικνύει ότι σε αυτήν την περιοχή η τροφοδοσία του πεδίου γίνεται κυρίως από μετεωρικά νερά. Η έλλειψη τρίτιου στα δείγματα αυτά υποδηλώνει ότι η διαδικασία εμπλουτισμού του συστήματος δεν είναι μια ταχεία διαδικασία που σχετίζεται με την εκμετάλλευση του πεδίου αλλά συντελέστηκε αργά και σταδιακά (> 60 χρόνια) ή/και με τη συμβολή παλιών νερών (Truesdell et al., 1991). Τα δείγματα από το βορειοδυτικό τμήμα έχουν

υψηλές τιμές $\delta^{18}\text{O}$ και δD , γεγονός που δείχνει πολύ μικρότερη συμμετοχή μετεωρικών νερών στη σύσταση του ατμού (Σχήμα 16).



Σχήμα 16. Διάγραμμα ποσότητας δD - $\delta^{18}\text{O}$ δειγμάτων με βάση την τοποθεσία των γεωτρήσεων του πεδίου (συμβολισμοί : ×-Νοτιοανατολικά, □-Κεντρικά, ▲-Νοτιοδυτικά, ■-Θέσεις Γεωτρήσεων Επανεισαγωγής) (Πηγή : Lowenstern et al., USGS, 1999).

Η χημική ανάλυση των δειγμάτων έδειξαν υψηλές αναλογίες ήλιου (He) μαζί με περιεκτικότητες χλωρίου (Cl), που υποδηλώνουν την ύπαρξη μαγματικής πηγής (Kennedy and Truesdell, 1996). Οι μεγάλες ποσότητες CO_2 , CH_4 , NH_3 και N_2/Ar ερμηνεύονται ως αποτελέσματα θερμικών εξαλλοιώσεων των μετα-ιζημάτων και των μεταμορφωμένων ασβεστικών φλεβών του συμπλέγματος Franciscan που αντίστοιχα οφείλονται στην ύπαρξη της θερμικής πηγής (Bergfeld et al., 2001).

3.3. ΣΤΕΓΑΝΟ ΚΑΛΥΜΜΑ (CAP ROCK)

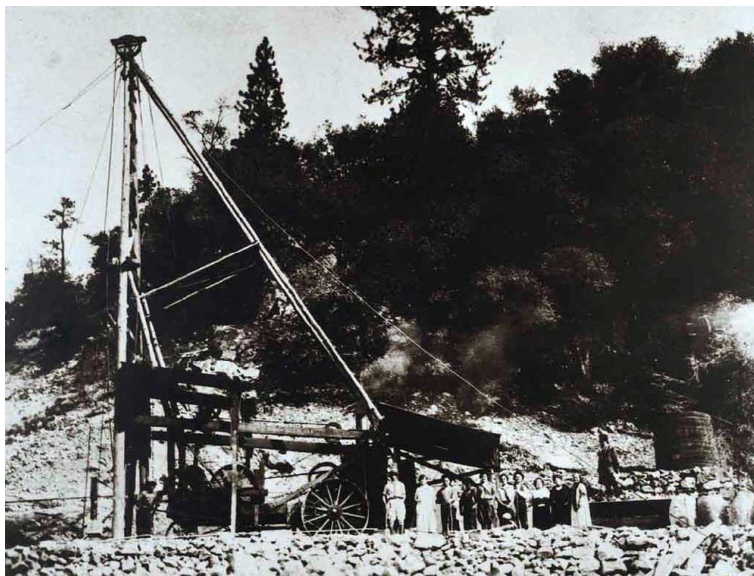
Το στεγανό κάλυμμα (cap rock) του ταμιευτήρα αποτελείται από πετρώματα του Franciscan complex: μεταγραουβάκη, mélange [υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης μεταμορφωμένα σώματα (400–600 C, 10–12 kbar), μετα-ιζήματα και μεταμορφωμένα πυριγενή (250°C, 5–8 kbar) (Ernst and McLaughlin, 2012)], και πρασινόλιθους μαζί με σχιστοκερατόλιθους και σερπεντινίτη, τα οποία έχουν τοποθετηθεί τεκτονικά (thrust) πάνω στα πετρώματα του ταμιευτήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ

4.1. ΠΡΩΙΜΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ (1920-1960)

Στις αρχές του περασμένου αιώνα (δεκαετία 1920), ο John C. Grant, ιδιοκτήτης ξενοδοχείου και χώρων αναψυχής στην περιοχή, χρησιμοποιώντας μια μικρή ηλεκτρική γεννήτρια ατμού, παράγει για πρώτη φορά ηλεκτρική ενέργεια από γεωθερμία στο Geysers, με σκοπό να ηλεκτροδοτήσει την ιδιοκτησία του αλλά και να προμηθεύσει ενέργεια στις γειτονικές κομοπόλεις Healdsburg and Cloverdale (www.geysers.com).

Η πρώτη γεωθερμική γεώτρηση κατέληξε σε αποτυχία λόγω έκρηξης (blowout). Η δεύτερη απόπειρα (1922) ήταν επιτυχής, με την πρώτη γεωθερμική γεώτρηση βάθους περίπου 60m να αποτελεί γεγονός (Εικόνα 6).



Εικόνα 6 : Η πρώτη επιτυχημένη γεωθερμική παραγωγική γεώτρηση στο The Geysers(πηγή: www.geysers.com)

Το 1923, ιδρύθηκε από τον John C. Grant η εταιρεία *The Geysers Development Company*, μια μικρή οικογενειακή επιχείρηση με σκοπό τη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή. Η εταιρεία κατασκεύασε την πρώτη γεωθερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής στην Αμερικανική Ήπειρο, ισχύος 35kW. Δυστυχώς, εκείνη την εποχή, η γεωθερμία ήταν αδύνατον να ανταγωνιστεί τα πολύ φθηνά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνταν για ηλεκτροπαραγωγή και έτσι η μονάδα σταμάτησε να λειτουργεί το 1934 (www.geysers.com, <https://web.mit.edu> “a brief history of

geothermal energy"). Παρόλα αυτά, η εταιρεία *The Geysers Development Company* διατηρεί μέχρι σήμερα δικαιώματα χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας στην περιοχή.



Εικόνα 7 : Η πρώτη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ατμό στο *The Geysers* (πηγή: www.geysers.com)

Το **1955** η εταιρεία *Magma Power Company* κατασκευάζει τη γεώτρηση *Magma 1*, που αποτελεί ουσιαστικά την *πρώτη* σύγχρονη γεωθερμική γεώτρηση στο πεδίο, σε έκταση την οποία μίσθωσε από την εταιρεία *The Geysers Development Company*

Την επόμενη χρονιά, η εταιρεία *Thermal Power Company* ενώνεται με την *Magma Power Company*, δημιουργώντας την κοινοπραξία «*Magma-Thermal*». Το **1958**, η εταιρεία *Pacific Gas and Electric Company (PG&E)* συνάπτει συμφωνία για προμήθεια ατμού από την *Magma-Thermal*.

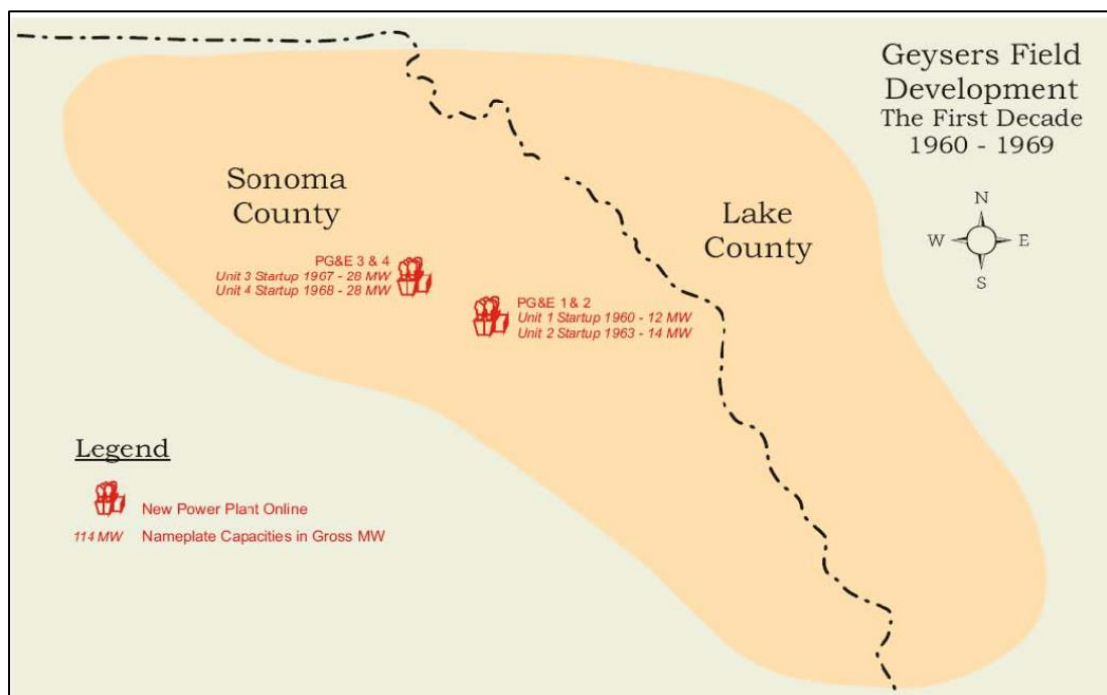
4.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ (1960 – ΣΗΜΕΡΑ)

Η συστηματική εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου *The Geysers* για ηλεκτροπαραγωγή ξεκίνησε το 1960, καθιστώντας το παλαιότερο αξιοποιούμενο γεωθερμικό πεδίο των Ηνωμένων Πολιτειών και το πιο σημαντικό όσον αφορά στη συμμετοχή του στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία (Brophy et al., 2010).

Η *Pacific Gas and Electric* κατασκεύασε την πρώτη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγική μονάδα, ισχύος 12MW (Unit-1. Εικόνα 8), η οποία τέθηκε σε λειτουργία τον Σεπτέμβριο του **1960**. Το **1968** η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς στο πεδίο ήταν πλέον 82 MW, ενώ στο τέλος της δεκαετίας έφτασε τα 100MW.



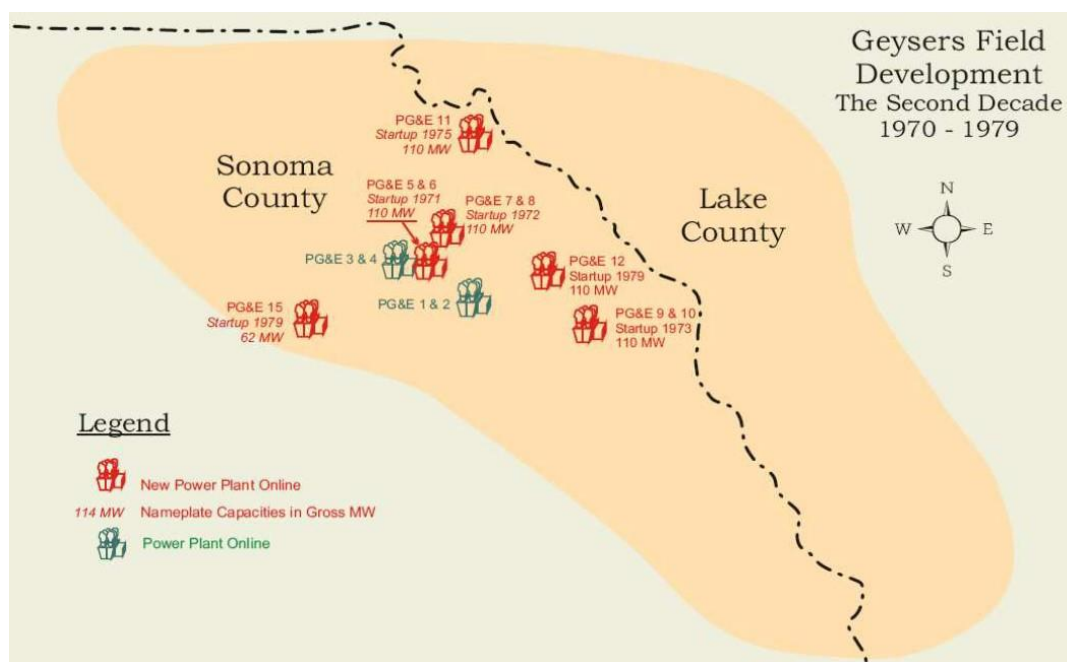
Εικόνα 8: Η πρώτη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγική μονάδα της PG&E, 1960 (πηγή: www.geysers.com)



Σχήμα 17: Ανάπτυξη γεωθερμικού πεδίου την περίοδο 1960-1969 (πηγή: www.osti.gov/servlets/purl/1048267)

Τη δεκαετία του **1970** η παραγωγή άρχισε να αυξάνεται με μεγαλύτερους ρυθμούς, φτάνοντας στο τέλος του **1979** τα 500 MW. Οι γεωτρήσεις παραγωγής έφταναν σε βάθος έως 2,5 km (www.geysers.com). Ταυτόχρονα, η επανεισαγωγή του συμπυκνώματος του ατμού μετά τη χρήση του άρχισε να αποτελεί κοινή πρακτική, σε ποσοστό όμως που δεν ξεπερνούσε το 25% του παραγόμενου ατμού (Sanyal and Enedy, 2011). Η επιτυχημένη λειτουργία του πεδίου επί δύο δεκαετίες αλλά και η

σοβαρή πετρελαϊκή κρίση στα μέσα της δεκαετίας του 1970 που είχε οδηγήσει στην αναζήτηση νέων εναλλακτικών πηγών ενέργειας παγκοσμίως, είχε ως αποτέλεσμα την προσέλκυση μεγάλου επενδυτικού ενδιαφέροντος, τόσο από τον τοπικό δημόσιο (κυρίως δημοτικές επιχειρήσεις και φορείς γειτονικών περιοχών) και από τον ιδιωτικό τομέα (ανεξάρτητοι παραγωγοί).



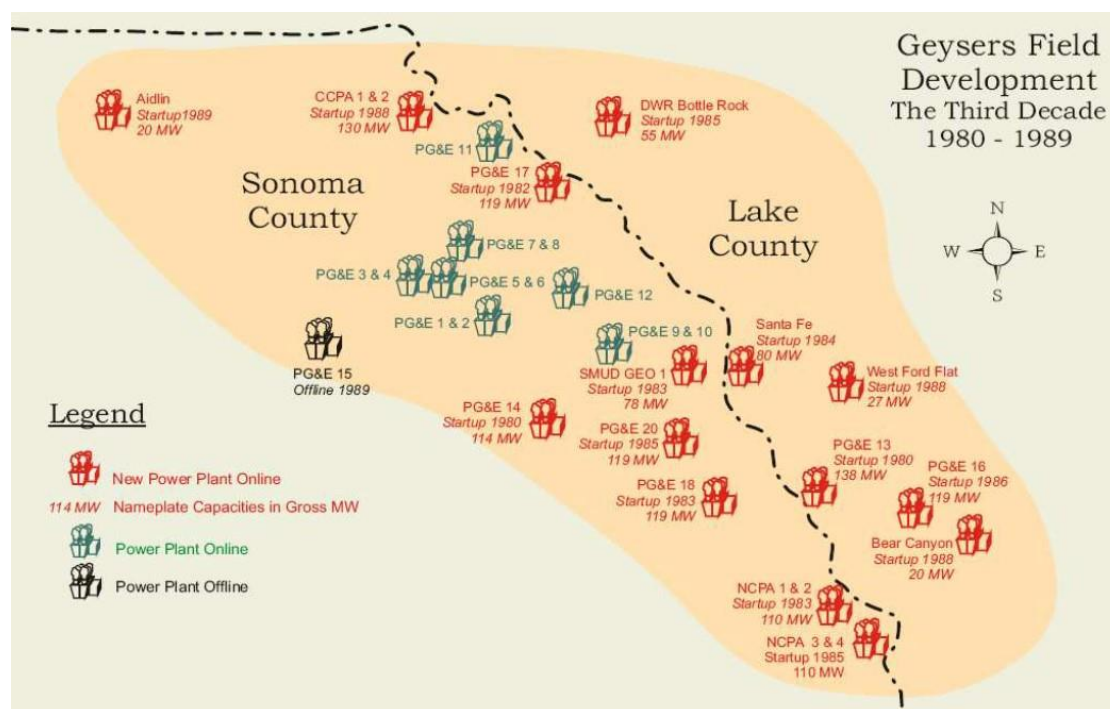
Σχήμα 18: Ανάπτυξη γεωθερμικού πεδίου την περίοδο 1970-1979 (πηγή: www.osti.gov/servlets/purl/1048267)

Τη δεκαετία του **1980**, η νέα πολύ μεγάλη αύξηση των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου σε συνδυασμό με τα πολύ ελκυστικά οικονομικά κίνητρα και κυβερνητικές εγγυήσεις, ευνοϊκά δάνεια κλπ, που δόθηκαν για την ανάπτυξη της γεωθερμίας (Sanyal and Eneedy, 2011), οδήγησαν σε εντυπωσιακή ανάπτυξη του πεδίου, με ανόρυξη πολλών νέων γεωτρήσεων, κατασκευή νέων μονάδων και σημαντική αύξηση της παραγωγής.

Η αύξηση της παραγωγής, οδήγησε στην ανάγκη για αύξηση και των επανεισαγόμενων ποσοτήτων νερού. Από το **1982** και μετά, για την επανεισαγωγή άρχισε να χρησιμοποιείται εκτός από τον συμπυκνωμένο ατμό, νερό της βροχής που συλλεγόταν κατά την υγρή περίοδο καθώς και όσες ποσότητες νερού επιτρεπόταν από τους κανονισμούς να δεσμευτούν από τοπικά ρέματα και επιφανειακούς ταμιευτήρες.

Το **1986**, η Υπηρεσία Ηλεκτρικής Ενέργειας της Βόρειας Καλιφόρνιας (Northern California Power Agency –NCPA), αποκτά δικαιώματα εκμετάλλευσης μέρους του πεδίου, κατασκευάζει δύο δικές της μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, και αναλαμβάνει, ως ο αρμόδιος δημόσιος φορέας, το ρόλο του λειτουργού/διαχειριστή και παραγωγού ηλεκτρικής ενέργειας (www.geysers.com).

Το **1987**, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο πεδίο φτάνει στην κορύφωσή της. Βρίσκονται σε λειτουργία 21 μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (Σχήμα 19), με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 2.043 MW και παραγόμενη ισχύ περίπου 1600 MW. Οι εταιρείες οι φορείς που εμπλεκόταν πλέον στην εκμετάλλευση του πεδίου ήταν πάρα πολλές: Unocal, Magma, Thermal Power Company, GEO operator, MCR Geothermal, Geysers Geothermal Company, NCPA, Occidental Geothermal, DWR (Department of Water Resources), CCPA, Mission Energy, PG&E, SMUD (Sacramento Municipal Utility District) κλπ. Κάθε εταιρεία λειτουργούσε με τις δικές της πρακτικές, διαφορετικά συμβόλαια πώλησης ατμού ή ενέργειας, χωρίς καμία απολύτως ανταλλαγή πληροφοριών και επιστημονικών δεδομένων.



Σχήμα 19 : Ανάπτυξη γεωθερμικού πεδίου την περίοδο 1980-1989 (πηγή: www.osti.gov/servlets/purl/1048267)

Μέσα στα επόμενα χρόνια, μοιραία η παραγωγή ατμού και κατ' επέκταση η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος άρχισε σταθερά να μειώνεται, ως αποτέλεσμα της πτώσης πίεσης του ατμού στον ταμιευτήρα λόγω υπερβολικής (καταχρηστικής)

εκμετάλλευσης (Sanyal and Eneedy, 2011). Από την άλλη, ο διαρκής και σκληρός ανταγωνισμός μεταξύ των εταιρειών, είχε οδηγήσει στην κατασκευή ολοένα και περισσότερων γεωτρήσεων και μονάδων ώστε να διατηρηθεί η παραγωγή τους σε επίπεδα οικονομικά αποδοτικά. Η κατάσταση αυτή προκάλεσε επιπρόσθετα προβλήματα, με επιπλέον μείωση της συνολικής παραγωγής ενέργειας από το πεδίο και αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών γεωτρήσεων.

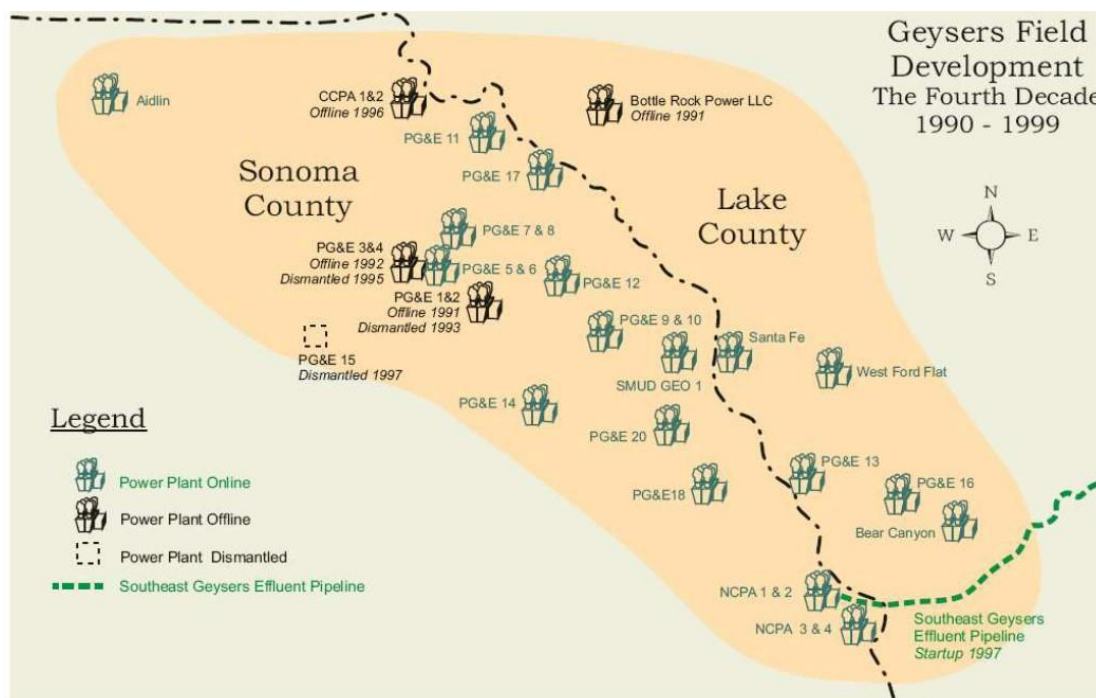
Το **1989** η PG&E αναγκάστηκε να τερματίσει τη μονάδα Unit-15 (Σχήμα 19), ενώ η εταιρεία Calpine Corporation αποφασίζει να επενδύσει στο πεδίο, αγοράζοντας μερίδιο 1 MW από τη μονάδα Aidlin, που είχε εγκατεστημένη ισχύ 20MW. Η Aidlin είναι η τελευταία που κατασκευάστηκε στο πεδίο, στο βορειοδυτικό του άκρο, και σηματοδότησε το τέλος της περιόδου κατασκευής νέων γεωθερμικών μονάδων. Την ίδια χρονιά οι εταιρείες που εκμεταλλευόταν το πεδίο αποφάσισαν τελικά να συνεργαστούν με σκοπό τη διεξαγωγή μελετών για περαιτέρω αύξηση της εισαγωγής νερού στον ταμιευτήρα.

Το **1990**, η εταιρεία Calpine αγοράζει δύο υπάρχουσες μονάδες, τις Bear Canyon and West Ford Flat, με συνολικά παραγόμενη ισχύ 43 MW, ενώ εκδηλώνει το ενδιαφέρον της για να επενδύσει σε μονάδες του νοτιοανατολικού τμήματος του πεδίου.

Το **1992** η PG&E κλείνει ακόμη δύο μονάδες της, τις Units 1, 2, 3 και 4, διοχετεύοντας περισσότερες ποσότητες ατμού στις μονάδες 5 και 6 (Σχήμα 20). Λόγω της συνεχιζόμενης μείωσης της παραγωγής, η Επιτροπή Ενέργειας της Καλιφόρνιας αποφασίζει να εκπονήσει νέα μελέτη για την αντιμετώπιση της κατάστασης, η οποία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα εκτεταμένο πρόγραμμα επανεισαγωγής και η προσωρινή μείωση της παραγωγής, ώστε να επιβραδυνθεί η πτώση πίεσης στον ταμιευτήρα, είναι η ενδεδειγμένη λύση του προβλήματος. Ήδη βέβαια, πολλές μονάδες είχαν ήδη σταματήσει να λειτουργούν, εξαιτίας τόσο τεχνικών προβλημάτων αλλά και μείωσης του παραγόμενου ατμού από τις γεωτρήσεις τους.

Το **1995** η συνολική παραγόμενη ισχύς στο πεδίο είχε ήδη μειωθεί στα 900 MW (Sanyal and Eneedy, 2011) και συνέχιζε να παρουσιάζει πτωτική τάση. Οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο πεδίο είναι πλέον λιγότερες και αρχίζουν να εφαρμόζουν κοινές πρακτικές και στρατηγικές εκμετάλλευσης. Η εταιρεία Calpine, η NCPA και η Υγειονομική Υπηρεσία της Κομητείας Lake (Lake Country Sanitation) αποφασίζουν

να συνεργαστούν και να κατασκευάσουν από κοινού έναν αγωγό μεταφοράς νερού από γειτονικές περιοχές, συνολικού μήκους περίπου 47 km (Southeast Geysers Effluent Pipeline -SEGEP), με σκοπό τη χρήση του στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Το νερό θα προερχόταν από τη λίμνη "Clear Lake" και τα επεξεργασμένα λύματα των μονάδων επεξεργασίας "LACOSAN" της Υγειονομικής Υπηρεσίας της κομητείας Lake (Goyal and Conant, 2010).



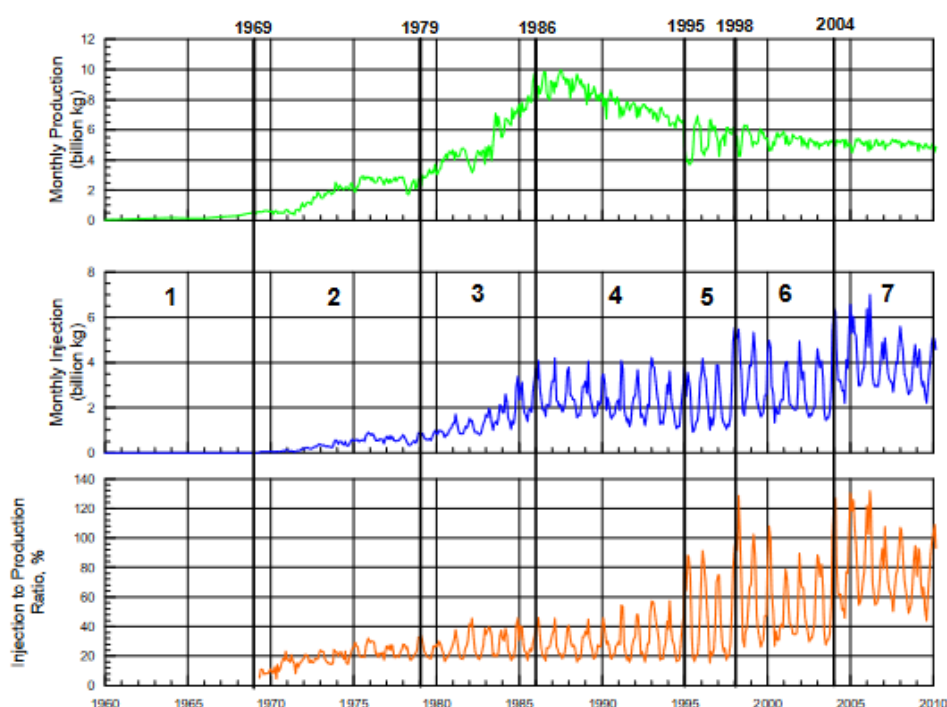
Σχήμα 20: Ανάπτυξη γεωθερμικού πεδίου την περίοδο 1990-1999 (πηγή: www.osti.gov/servlets/purl/1048267)

Η κατασκευή του αγωγού ολοκληρώνεται το **1997**, οπότε ξεκινά η μεταφορά περίπου 35.000 m³/ημέρα επεξεργασμένου νερού στο πεδίο και η επανεισαγωγή του στον ταμιευτήρα. Ήδη από την αρχή του προγράμματος, η μείωση της παραγωγής ανακόπτεται και παρουσιάζονται σημάδια σταθεροποίησής της. Η σχέση επανεισαγωγής και παραγωγής απεικονίζεται στα διαγράμματα του Σχήματος 21.

Το **1998** η εταιρεία Calpine αποκτά την ιδιοκτησία της μονάδα Sonoma Power Plant εγκατεστημένης ισχύος 72 MW που ανήκε στη Δημοτική Επιχείρηση του Sacramento.

Η συμμετοχή λιγότερων εταιρειών στην εκμετάλλευση του πεδίου και η καλύτερη συνεργασία μεταξύ τους οδήγησε στην βελτίωση των διαχειριστικών τακτικών του πεδίου αλλά και σε σταθεροποίηση της παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση του λειτουργικού κόστους (Sanyal and Enedy, 2011).

Κατά την τριετία **1995-1998**, η εξομάλυνση των προβλημάτων που υπήρχαν αποδόθηκε και σε δύο ακόμη, μη αναμενόμενους, παράγοντες: στη μείωση της ζήτησης εξαιτίας της πολύ φτηνότερης τιμής της υδροηλεκτρικής ενέργειας και την απότομη αύξηση της επανεισαγωγής (έφτασε έως και το 50% του παραγόμενου ατμού) λόγω της αύξησης των ποσοτήτων νερού που δεσμευόταν από την επιφανειακή απορροή εξαιτίας της ιδιαίτερα βροχερής περιόδου.



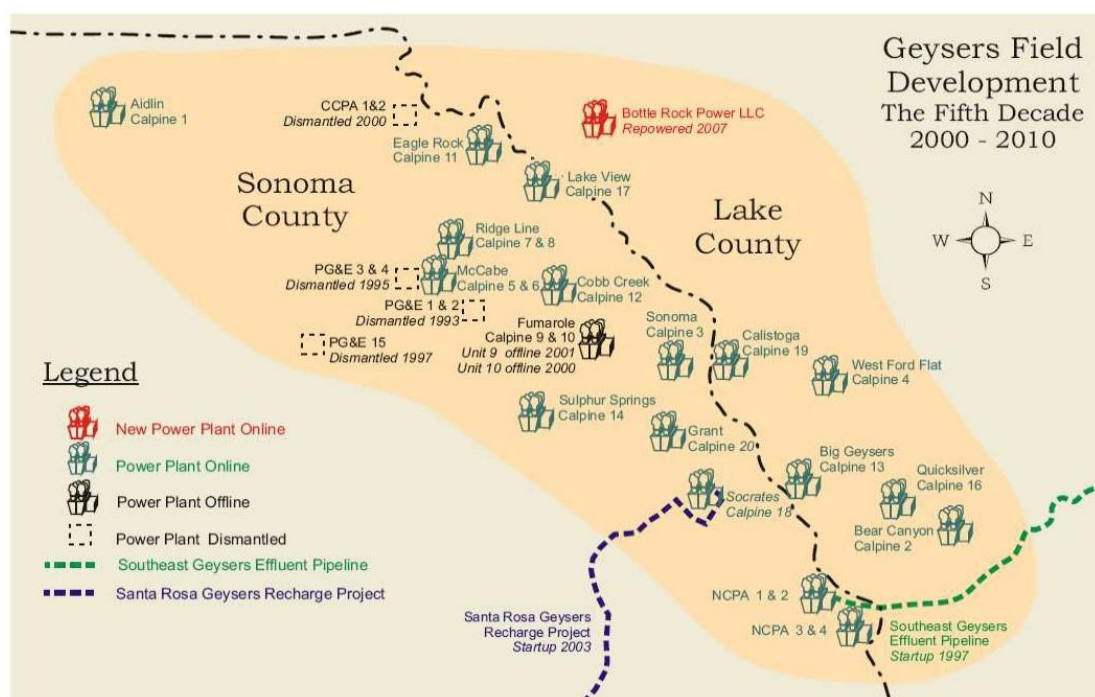
Σχήμα 21. Διαγράμματα μηνιαίας παραγωγής και επανεισαγωγής σε σχέση με τον χρόνο (πράσινο και μπλε χρώμα) και αντίστοιχα το διάγραμμα σχέσης παραγωγής-επανεισαγωγής (%), πορτοκαλί χρώμα) (πηγή : Sanyal and Eneedy, 2011).

Το **2000** η Calpine αγοράζει άλλες 19 μονάδες και αποκτά τα αντίστοιχα δικαιώματα εκμετάλλευσης. Πλέον στο πεδίο δραστηριοποιούνται δύο μόνο εταιρείες: η Calpine και η NCPA. Η Calpine προχωρά άμεσα στη βελτίωση του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς ατμού από τις γεωτρήσεις στις μονάδες, διασυνδέοντας μεταξύ τους επιμέρους δίκτυα, ώστε να μην απαιτείται η παύση λειτουργίας των γεωτρήσεων σε περίπτωση διακοπής (για οποιονδήποτε λόγο) λειτουργίας της μονάδας την οποία τροφοδοτούν, οπότε ο ατμός θα μπορεί να διοχετεύεται απευθείας σε άλλη μονάδα και η παραγωγή να παραμένει στα επιθυμητά επίπεδα.

Το **2003** η Calpine και ο Δήμος της Santa Rosa ολοκληρώνουν την κατασκευή άλλων 65 km του αγωγού μεταφοράς επεξεργασμένων υδάτων, μέσω του οποίου

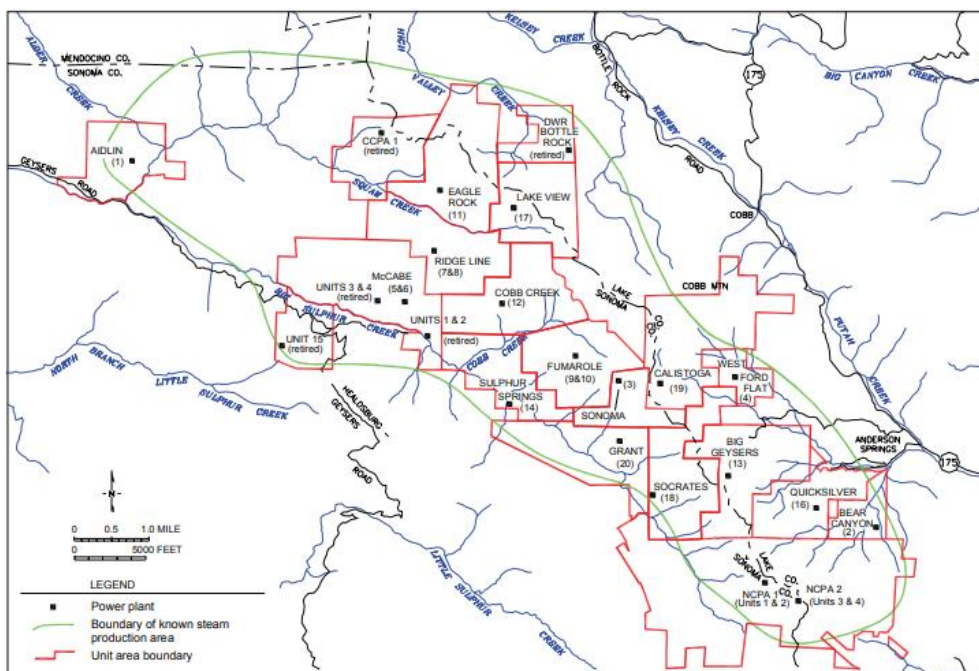
διοχετεύονται καθημερινά περίπου 42.000 m³ (11 εκατομμύρια γαλλόνια) νερού στο Geysers για επανεισαγωγή. Το έργο κατασκευής του αγωγού ονομάστηκε Santa Rosa Geysers Recharge Project (SRGRP) και ξεκίνησε να λειτουργεί τον Οκτώβριο του 2003 μεταφέροντας νερό από τα επεξεργασμένα λύματα της πόλης Santa Rosa. Από το 2004 και μετά, η επανεισαγωγή έφτασε το 80% του παραγόμενου ατμού (Sanyal and Enedý, 2011)

Το 2009, η παραγωγή ισχύος από το πεδίο είχε σταθεροποιηθεί στα 725 MW, παρέχοντας σταθερό φορτίο βάσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της Καλιφόρνιας. Η σταθεροποίηση της παραγωγής οφείλεται αφενός στην τεχνολογική αναβάθμιση των μονάδων αλλά και στην αυξημένη ποσότητα νερού επανεισαγωγής άρα και στις μεγαλύτερες ποσότητες ατμού. Πράγματι, μετά το 2004, ο ρυθμός μείωσης της παραγωγικότητας των γεωτρήσεων αλλά και της παραγόμενης ενέργειας άρχισε να βελτιώνεται κατά περίπου 1-2% ετησίως (Sanyal and Enedý, 2011). Επιπλέον, η αυξημένη εισαγωγή επιφανειακών νερών στον ταμιευτήρα οδήγησε σε βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου ατμού, λόγω μεγαλύτερης διάλυσης των μη συμπυκνούμενων αερίων του παραγόμενου ατμού. Αυτό με τη σειρά του είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση του βαθμού απόδοσης των μονάδων και τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων (Beall et al, 2007; Pruess et al, 2008; Sanyal and Enedý, 2011).



Σχήμα 22: Ανάπτυξη γεωθερμικού πεδίου την περίοδο 2000-2010 (πηγή: www.osti.gov/servlets/purl/1048267)

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία που αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία (USGS, 2023), **σήμερα** στο πεδίο βρίσκονται σε λειτουργία 18 μονάδες γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής (Σχήμα 23), 13 εκ των οποίων ανήκουν στην εταιρεία Calpine. Η τελευταία γεώτρηση παραγωγής ατμού στο πεδίο κατασκευάστηκε το 2021. Η συνολική παραγόμενη ισχύς είναι 835 MW, αρκετή για να ηλεκτροδοτήσει περίπου 835.000 κατοικίες ή μία πόλη στο μέγεθος του San Francisco.



Σχήμα 23: Χάρτης με τις θέσεις των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων που βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία. Με το κόκκινο περίγραμμα ορίζεται η εκμεταλλεύσιμη έκταση του πεδίου για κάθε μονάδα. Με το πράσινο χρώμα απεικονίζονται τα όρια του γεωθερμικού πεδίου (πηγή: Sanyal and Eneedy, 2011)

4.3 ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΑΝΕΙΣΑΓΩΓΗΣ - ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

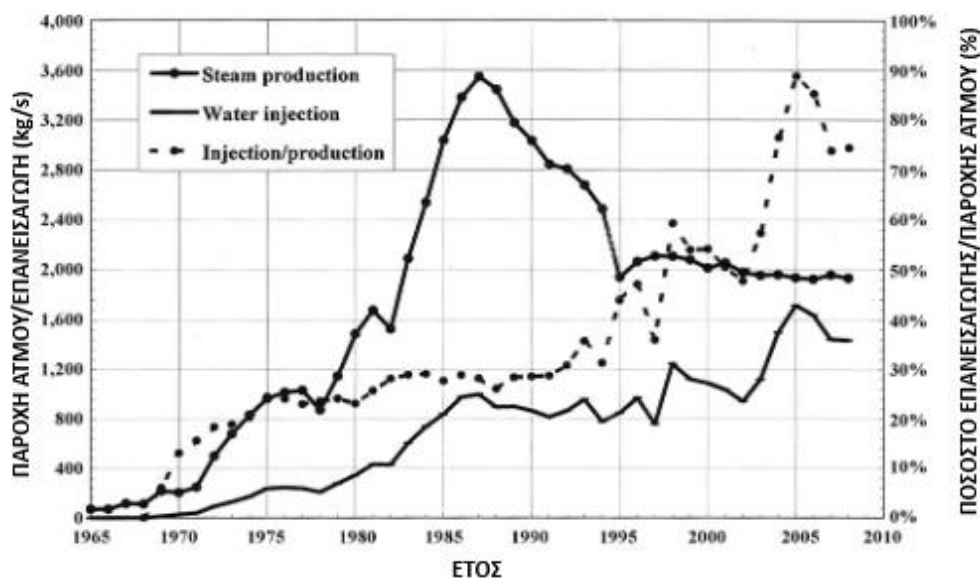
Οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη λύση για την αποφυγή θερμικής και χημικής ρύπανσης σε μία περιοχή που βρίσκεται υπό εκμετάλλευση. Εκτός αυτού, με την επανεισαγωγή επιτυγχάνεται η επανατροφοδοσία του ταμειυτήρα σε ρευστά και η βιώσιμη λειτουργία του πεδίου (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004).

Όταν τον περασμένο αιώνα ξεκίνησε η συστηματική αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας είτε σε άμεσες χρήσεις είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, δεν γινόταν επανεισαγωγή των χρησιμοποιούμενων ρευστών. Με το πέρασμα των χρόνων, είτε για περιβαλλοντικούς είτε για καθαρά ενεργειακούς λόγους, η επανεισαγωγή είναι πλέον υποχρεωτική και επιβεβλημένη. Σε γεωθερμικά συστήματα που η επανατροφοδοσία

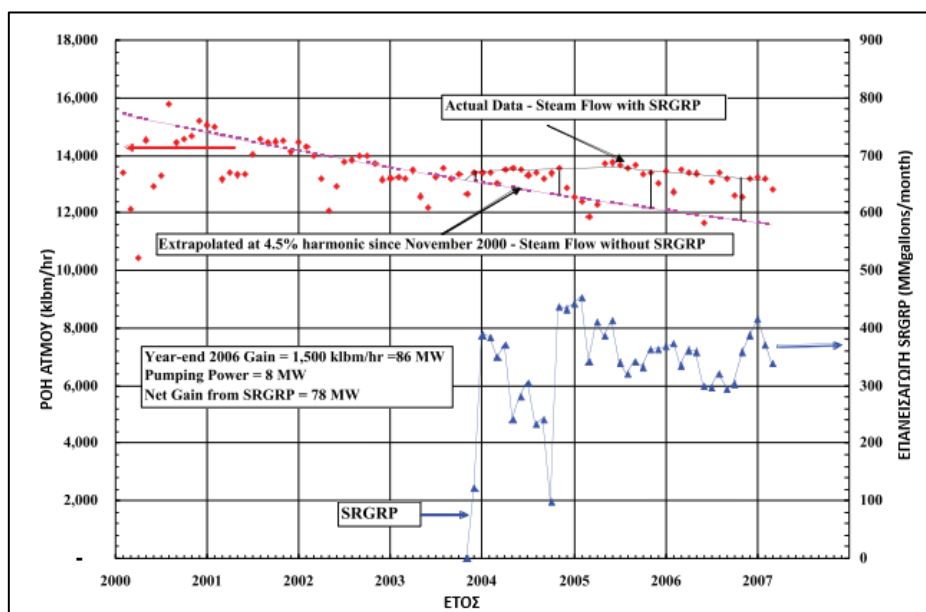
του υπό εκμετάλλευση ταμιευτήρα γίνεται πάρα πολύ αργά (όπως είναι τα γεωθερμικά πεδία ατμού του Larderello στην Ιταλία και The Geysers στις ΗΠΑ) ή η προέλευση του γεωθερμικού ρευστού είναι μαγματική, μετά την πάροδο κάποιων ετών εκμετάλλευσης παρατηρήθηκαν φαινόμενα σημαντικής πτώσης πίεσης, με αποτέλεσμα, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, τη δραστική μείωση της παραγωγής ατμού και ενέργειας, παρόλη την ύπαρξη τεράστιας ποσότητας θερμότητας αποθηκευμένης στα πετρώματα του ταμιευτήρα. Έτσι, η εισαγωγή νερού στον ταμιευτήρα ώστε να δημιουργηθεί νέος ατμός και να διατηρηθεί η πίεσή του, κατέστη μονόδρομος.

Όπως είναι φανερό από τα διαγράμματα που προηγήθηκαν αλλά και αυτά των Σχημάτων 24 και 25, η έναρξη προγραμμάτων συστηματικής επανεισαγωγής αποτέλεσε κομβικό σημείο για τη βιωσιμότητα του πεδίου The Geysers. Στις πρώτες επανεισαγωγές που ξεκίνησαν το 1969 (Goyal and Conant, 2010) χρησιμοποιήθηκε το συμπύκνωμα του ατμού από τους πύργους ψύξης των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Από το 1980, εκτός από το συμπύκνωμα του ατμού, επανεισαγόταν ποσότητες νερού από τη βροχή και από τον γειτονικό ποταμό Big Sulphur Creek. Όμως, δεδομένης της πολύ μεγάλης περιοχής εκμετάλλευσης και της πολύ μικρής ή καθόλου φυσικής επαναφόρτισης του συστήματος από μετεωρικά νερά (Isherwood, 1997, Goyal et al., 2010), οι ποσότητες νερού επανεισαγωγής δεν ήταν αρκετές, με αποτέλεσμα η πίεση του ατμού να μειώνεται ολοένα και περισσότερο, ενώ αυξήθηκε σημαντικά η ενθαλπία του και η θερμοκρασία του (Goyal et al., 2010). Για τον λόγο αυτόν, την περίοδο εκείνη ξεκίνησαν και οι πρώτες μελέτες αναζήτησης νερού για επανεισαγωγή από εξωτερικές πηγές και στη συνέχεια η κατασκευή των αγωγών SEGEP και SRGRP.

Ο αγωγός SEGEP διασχίζει το νοτιοανατολικό σχήμα του πεδίου (Σχήμα 20). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 21, η επανεισαγωγή προκάλεσε αύξηση και σταθεροποίηση της παροχής ατμού, ιδιαίτερα μετά το 2003, οπότε άρχισε να λειτουργεί και ο αγωγός SRGRP.



Σχήμα 24: Διάγραμμα με τα δεδομένα παραγωγής και επανεισαγωγής των έργων SEGEP και SRGRP μαζί με τις αναλογίες τους ανάλογα με τον χρόνο (πηγή: Goyal and Conant, 2010).



Σχήμα 25: Διάγραμμα με τα οφέλη στην παραγωγή από τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής του SRGRP (πηγή: Goyal and Pingol, 2007).

Σύμφωνα με τους Goyal and Pingol (2007), στο τέλος του 2006, τα οφέλη από την λειτουργία του SRGRP υπολογίστηκαν σε 78 MW (Σχήμα 21).

Όπως όμως έχει παρατηρηθεί και σε άλλες περιπτώσεις εισπίεσης νερού στο υπέδαφος, το ρευστό (νερό) δρα ως «λπιαντικό», μειώνοντας την τριβή μεταξύ των πετρωμάτων και δημιουργώντας μικρής έντασης σεισμούς (Majer et al., 2007). Το γεωθερμικό πεδίο The Geysers βρίσκεται σε μία πολύ ενεργή τεκτονικά και ιδιαίτερα

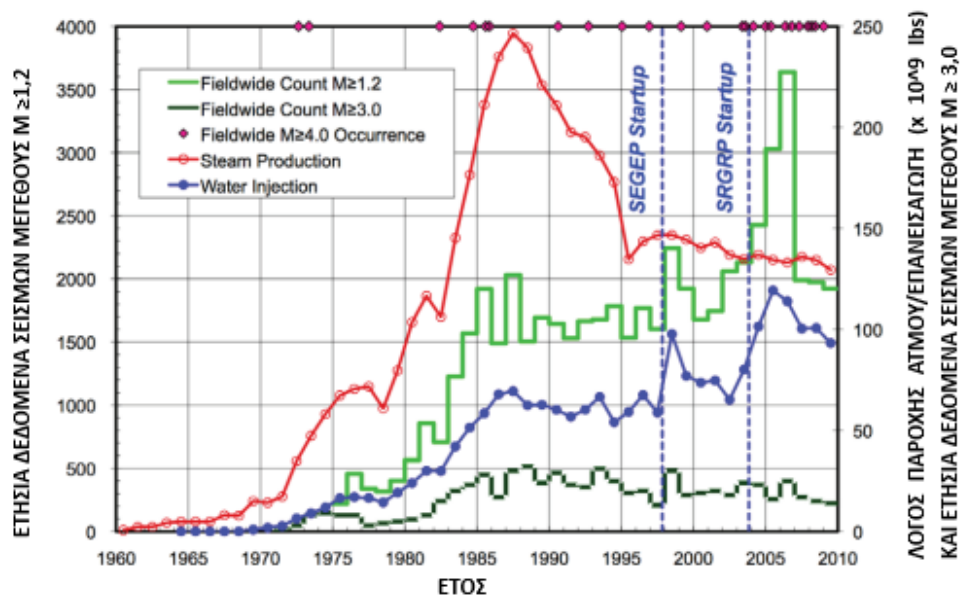
σεισμογενή περιοχή. με περίπου χίλια σεισμικά γεγονότα να καταγράφονται ετησίως (Khan, 2010). Ο αριθμός των σεισμών μεγάλου μεγέθους είναι μικρός και δεν μεταβάλλεται από έτος σε έτος (Beall et al., 2010).

Η επαγόμενη σεισμικότητα στην περιοχή συνδέθηκε όχι μόνο με την επανεισαγωγή αλλά και με την παραγωγή, λόγω της απομάκρυνσης (μέσω της άντλησης) μεγάλων ποσοτήτων ατμού. Η παρακολούθηση των μικροσεισμών (Micro-Earthquake Surveillance - MEQS) και η συσχέτισή τους με την παραγωγή και την επανεισαγωγή ρευστών στο πεδίο ξεκίνησε ήδη από το 1970 (Majer et al., 2007). Με βάση τα στοιχεία που συλλέχθηκαν επί 20 χρόνια (1976-1998) από το πρόγραμμα MEQS, παρατηρήθηκαν τρεις τύποι επαγόμενης σεισμικότητας:

- α.) ρηχή σεισμικότητα που προκαλείται από την παραγωγή και έχει μεγάλη χρονική καθυστέρηση του 1 έτους,
- β.) βαθιά επαγόμενη σεισμικότητα λόγω γεωτρήσεων επανεισαγωγής με σύντομη χρονική καθυστέρηση 2 μηνών,
- γ.) βαθιά σεισμικότητα προκαλούμενη από την παραγωγή με χρονική καθυστέρηση των 2 μηνών

Η κορύφωση της παραγωγής το 1987 με τη λειτουργία πολλών γεωτρήσεων παραγωγής και κάποιων επανεισαγωγής θεωρείται ότι συσχετίζονται με τον μεγαλύτερο αριθμό καταγεγραμμένων σεισμών (Σχήμα 26) με μέγεθος $M \geq 1,2$ (Beall et al., 2010). Την περίοδο 1987-1997, η ετήσια παραγωγή αλλά και οι επανεισαγές μειώθηκαν, με τον αριθμό των σεισμών να μην παρουσιάζει αξιόλογες μεταβολές (Beall et al., 2010).

Ο αριθμός των μικροσεισμών αυξήθηκε μετά την κατασκευή των αγωγών SEGEP" και "SRGRP" και των μεγαλύτερου όγκου νερού που επανεισαγόταν στον ταμιευτήρα (Khan ,2010). Πλέον, η σεισμική παρακολούθηση του πεδίου γίνεται από την Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών των ΗΠΑ (USGS), του Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Berkley (LBNL – University of California) και την εταιρεία Calpine.



Σχήμα 26: Διάγραμμα με την ετήσια παραγωγή (κόκκινη γραμμή), τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής (μπλε γραμμή) και τους καταγεγραμμένους σεισμούς (πράσινες γραμμές) από το 1960 μέχρι το 2010 (πηγή: Beall et al., 2010).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το γεωθερμικό πεδίο The Geysers (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) αξιοποιείται συστηματικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το 1960 μέχρι σήμερα. Από τη δεκαετία του 1970 είναι το πεδίο με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη και παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ από γεωθερμία παγκοσμίως.

Βρίσκεται βορειοδυτικά της πόλης του San Francisco (California, USA) και καλύπτει έκταση μεγαλύτερη των 100 km². Στην περιοχή του πεδίου επικρατούν μεταμορφωμένοι σχηματισμοί και μετα-ιζήματα ενός συμπλέγματος πετρωμάτων που ονομάζεται Franciscan complex με ηλικία Κατώτερο Ιουρασικό–Μειόκαινο όπου κυριαρχούν οι μετα-γραουβάκες, και πρόσφατα ηφαιστειακά πετρώματα της περιοχής Clear Lake (Ολόκαινο–Κάτω Πλειόκαινο). Στο νότιο τμήμα του υπάρχουν επιφανειακές εμφανίσεις οφιολίθων που συνιστούν τμήμα του υποβάθρου του δυτικότερου περιθωρίου της πλάκας της Κεντρικής και Βόρειας Καλιφόρνιας.

Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας αναπτύσσεται κατά κύριο λόγο μέσα σε τεκτονισμένους και μεταμορφωμένους γραουβάκες του Ιουρασικού και περιέχει ξηρό ατμό. Η θερμοκρασία του ατμού δεν είναι ενιαία σε όλο το πεδίο: στο βορειοδυτικό και βορειο-κεντρικό τμήμα του πεδίου συναντώνται δύο παραγωγικές ζώνες: η μικρότερου βάθους (NTR) με θερμοκρασίες έως 240°C και αυτή που εντοπίστηκε βαθύτερα (HTR) με θερμοκρασίες που συνήθως ξεπερνούν τους 300°C, φτάνοντας και τους 400°C. Στο νοτιοανατολικό τμήμα του πεδίου απουσιάζει η HTR ζώνη.

Η πηγή θερμότητας του πεδίου είναι ένα εκτεταμένο μαγματικό σώμα όξινων πυριγενών σχηματισμών με ηλικία Πλειοκαινική ή και νεότερη, που εντοπίζονται σε βάθη 0,7 έως 7,5 km. Οι μαγματικές διεισδύσεις έλαβαν χώρα σε διάφορες φάσεις ξεκινώντας πριν από 1,75 εκατομμύρια έτη, με πιο πρόσφατη να θεωρείται μία διείσδυση στο βορειοδυτικό τμήμα του πεδίου, με ηλικία, σύμφωνα με τα μοντέλα θερμικής ροής, περίπου 11 χιλιάδες χρόνια.

Το Geysers δεν αποτελεί ένα κλασσικό γεωθερμικό σύστημα όπου ο ταμιευτήρας τροφοδοτείται συνεχώς από επιφανειακά νερά. Αντίθετα πρόκειται για ένα μάλλον ένα «κλειστό» σύστημα, του οποίου ο ατμός έχει κυρίως μαγματική προέλευση με μικρή συμμετοχή επιφανειακών και μετεωρικών νερών. Το

συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι και αυτό που έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ιστορία του πεδίου, όσον αφορά στην αξιοποίησή του, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.

Η ιστορία αυτή μπορεί να χωριστεί σε επτά βασικές περιόδους: τα πρώτα χρόνια (1960-1969), την εποχή της σταδιακής και σταθερής ανάπτυξης (1970-1979), την ραγδαία ανάπτυξη (1980-1987), την προβληματική περίοδο (1988-1995), την ενδιάμεση καθοριστική περίοδο (1995-1998), τη μεταβατική φάση σταθεροποίησης (1999-2004), και την τελευταία περίοδο που διαρκεί μέχρι σήμερα κατά την οποία υπάρχει σταθερότητα, ορθολογική ανάπτυξη και αισιοδοξία για το άμεσο μέλλον.

Η μέχρι σήμερα 64χρονη ιστορία του πεδίου, αντανακλά, όπως συμβαίνει σχεδόν πάντα στις περιπτώσεις εντατικής εκμετάλλευσης της γεωθερμίας, τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων, διαχειριστικών πρακτικών και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου γεωθερμικού συστήματος.

Κομβικό σημείο στην ανάπτυξη του πεδίου και την ανακοπή/αντιστροφή της πτωτικής πορείας του, έπαιξε η αλλαγή στον τρόπο αντίληψης μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, η πιο ενιαία και ορθολογική διαχείριση, η ανταλλαγή επιστημονικών δεδομένων με σκοπό τη βέλτιστη χρησιμοποίησή τους, και, φυσικά η έναρξη των προγραμμάτων αυξημένης επανεισαγωγής νερού στον ταμιευτήρα για τη σταθεροποίηση της πίεσής του που λειτούργησε ως το απόλυτο διαχειριστικό εργαλείο στο συγκεκριμένο πεδίο.



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Φυτίκας και Ανδρίτσος, Γεωθερμία (2004)

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Allis Rick. Insights on the formation of vapor-dominated Geothermal Systems. Energy & Geoscience Institute, University of Utah (2000).

Bailey H. Edgar, Irwin P. William, Jones L. David. Franciscan and related rocks and their significance in the geology of western California. California Div. Mines and Geology Bull (1964).

Bailey H. Edgar, Blake C. Milton, Jones L. David. On-land Mesozoic oceanic crust in California Coast Ranges. Geological Survey Professional Paper. 700C: C70–C81. ISSN 0096-0446 (1970).

Beall J. Joseph, Wright C. Melinda, Hulen B. Jeffrey. Pre and Post-Development Influences on fieldwide Geysers NCG Concentrations. Geothermal Resources Council Transactions (2007).

Beall J. Joseph, Wright C. Melinda, Pingol S. Alfonso, Atkinson Paul. Geothermal Consultant, Pollock Pines CA. Effect of High Rate Injection on Seismicity in The Geysers. Calpine Corporation, Middletown CA (2010).

Bergfeld Deb, Goff Fraser, Janik J. Cathy. Carbon isotope systematics and CO_2 sources in The Geysers – Clear Lake region, Northern California, USA (2001).

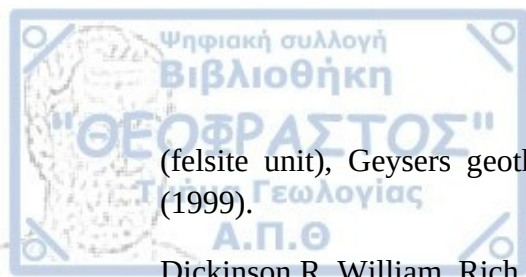
Brophy Paul, Lippmann J. Marcelo, Dobson F. Patrick, Poux Bastien. Geothermal Resources council. The Geysers Geothermal Field Update 1990-2010 (2010).

Chamorro R. César, Mondéjar E. María, Ramos Roberto, Segovia J. José, Martín C. María, Villamañán A. Miguel. World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies (2012).

Chapman H. Rodger. Geophysical Study of the Clear Lake Region, California. California Division of Mines and Geology (1975).

Chave D. Alan and Jones G. Alan. The Magnetotelluric Method, Theory and Practice (2012).

Dalrymple G. Brent, Grove Marty, Lovera M. Oscar, Harrison T. Mark, Hulen Jeffrey B, Lanphere A. Marvin. Age and thermal history of the Geysers plutonic complex



(felsite unit), Geysers geothermal field, California: a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U–Pb study (1999).

Dickinson R. William, Rich I. Ernest. Petrologic Intervals and Petrofacies in the Great Valley Sequence, Sacramento Valley, California (1972).

Dickinson R. William and Snyder S. Walter. Geometry of triple junctions related to the San Andreas transform: Journal of Geophysical Research (1979).

Donnelly-Nolan M. Julie and Hearn B. Carter. Geochronology and evolution of the Clear Lake volcanics (1981).

Egbert D. Gary, Kelbert Anna. Computational recipes for electromagnetic inverse problems (2012).

Ernst W. Gary, McLaughlin J. Robert. Mineral parageneses, regional architecture, and tectonic evolution of Franciscan metagraywackes, Cape Mendocino-Garberville-Covelo $30' \times 60'$ quadrangles, northwest California (2012).

Goyal P. Keshav and Pingol S. Alfonso. Geysers Performance Update Through 2006. Calpine Corporation, Middletown, CA, USA (2007).

Goyal P. Keshav, Conant T. Tim. Performance history of The Geysers steam field, California, USA (2010).

Graymer W. Russel, Moring C. Barry, Saucedo J. George, Wentworth M. Carl, Brabb E. Earl and Knudsen L. Keith. Geologic Map of the San Francisco Bay Region. United States Geological Survey, in cooperation with the California Geological Survey, Scientific Investigations Map 2918 (2006).

Hartline S. Craig, Walters A. Mark, Wright C. Melinda. Three-Dimensional Structural Model Building Constrained By Induced Seismicity Alignments at The Geysers Geothermal Field, Northern California. Calpine Corporation (2019).

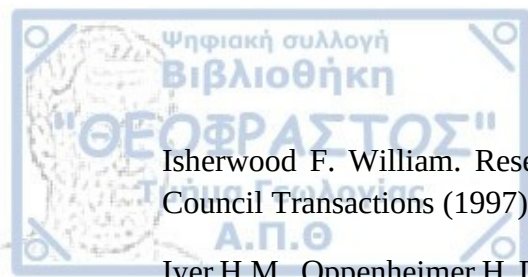
Hearn B. Carter, McLaughlin J. Robert, Donnelly-Nolan M. Julie. Tectonic framework of the Clear Lake basin, California (1988).

Hulen B. Jeffrey, Walters A. Mark, Nielson L. Dennis. Comparison of reservoir and caprock core from the Northwest Geysers steam field, California (1991).

Irwin P. William. Wallace, R.E., Geology and plate-tectonic development: In The San Andreas Fault System, California. USGS Professional Paper 1515 (1990).

Isherwood F. William. Gravity and magnetic studies of The Geysers-Clear Lake geothermal region (1975).

Isherwood F. William. Geophysical Overview of the Geysers (1981).



Isherwood F. William. Reservoir Depletion at The Geysers, Geothermal Resources Council Transactions (1997).

Iyer H.M., Oppenheimer H. David, Hitchcock Tim, Roloff N. Jeffrey, Coakley M. John. Large Teleseismic P-wave delays in The Geysers-Clear Lake Geothermal Area (1981).

Kennedy B. Mack and Truesdell H. Alfred. The Northwest Geysers High Temperature Reservoir: Evidence for Active Magmatic Degassing and Implications for the origin of the Geysers Geothermal Field (1996).

Khan M. Ali. The Geysers Geothermal Field, an Injection Success Story. Division of Oil, Gas, and Geothermal Resources, Santa Rosa, CA. (2010).

Kunkel Fred, Upson E. Joseph. Geology and Ground Water in Napa and Sonoma Valleys. U. S. Geological Survey (1960).

Lin Guoqing, Wu Bateer. Seismic velocity structure and characteristics of induced seismicity at the Geysers Geothermal Field, eastern California (2018).

Lipman C. Stephen, Strobel J. Calvin, Gulati S. Mohinder. Reservoir Performance of the Geysers field (1978).

Lowenstern B. Jacob, Janik J. Cathy, Fahlquist S. Lynne, Johnson S. Linda. Gas and Isotope Geochemistry of 81 steam samples from wells in The Geysers Geothermal field, Sonoma and Lake Counties, California, USA. USGS (1999).

Lowenstern B. Jacob, Janik J. Cathy, Fahlquist S. Lynne, Johnson S. Linda. A new compilation of gas and steam analyses from The Geysers geothermal field, California, USA. In: Proceedings of the 21st New Zealand Geothermal Workshop, Auckland University, New Zealand (1999).

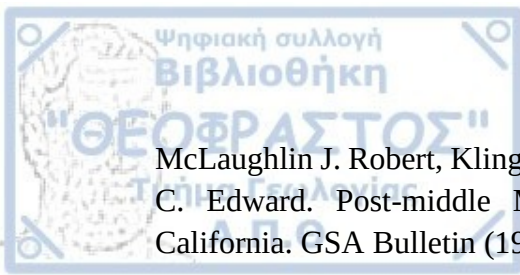
Lowenstern B. Jacob, Janik J. Cathy. The Origins of Reservoir Liquids and Vapors from The Geysers Geothermal Field, California (2005).

Lutz J. Susan, Walters A. Mark, Pistone Sarah, Moore N. Joseph. New Insights into the High-Temperature Reservoir, Northwest Geysers (2012).

Majer L. Ernest, Peterson E. John. The impact of injection on seismicity at The Geysers, California Geothermal Field (2007).

McLaughlin J. Robert, Donnelly N. Julie. Tectonic Setting of Pre-Tertiary Rocks and Its Relation to Geothermal Resources in the Geysers-Clear Lake Area, in Research in the Geysers-Clear Lake Geothermal Area, Northern California, USGS Professional Paper 1141 (1981).

McLaughlin J. Robert. Tectonic Setting Of PreTertiary rocks and its relation to geothermal resources in the geysers clear lake area (1981).



McLaughlin J. Robert, Kling A. Stanley, Poore Z. Richard, McDougal Kristin, Beutner C. Edward. Post-middle Miocene accretion of Franciscan rocks, northwestern California. GSA Bulletin (1982).

Mitchel A. Michael, Peacock R. Jared, Burgess D. Seth. Imaging the magmatic plumbing of the Clear Lake Volcanic Field using 3-D gravity inversions (2023).

Mondejar Montagud E. Maria, Chamorro R César. Geothermal power technologies. Encyclopedia of Sustainable Technologies (2017).

Moore N. Joseph, Anderson J. Alan, Adams C. Michael, Aines D. Roger, Norman I. David, Walters A. Mark. The fluid inclusion and mineralogic record of the transition from liquid to vapor-dominated conditions in The Geysers Geothermal System, California (1998).

Moore N. Joseph, Norman I. David, Kennedy B. Mack. Fluid inclusion gas compositions from an active magmatic–hydrothermal system: a case study of The Geysers geothermal field, USA (2001).

Muffler L.J. Patrick. Assessment of Geothermal Resources of the United States (1978).

Norton L. Denis, Hulen B. Jeffrey. Preliminary numerical analysis of the magma-hydrothermal history of The Geysers geothermal system, California, USA (2001).

Peacock R. Jared, Earney E. Tait, Mangan T. Margaret, Schermerhorn D. William, Glen M. Jonathan, Walters Mark, Hartline Craig. Geophysical characterization of the Northwest Geysers geothermal field, California (2020).

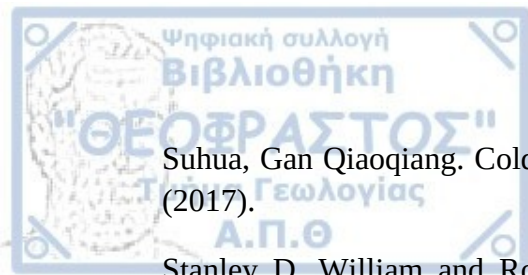
Pruess Karsten, Spycher Nicolas, Kneafsey J. Timothy. Water injection as a means for reducing non-condensable and corrosive gases in steam produced from vapor-dominated reservoirs (2008).

Rutqvist Johnny, Dobson F. Patrick, Garcia Julio, Hartline Craig, Jeanne Pierre, Oldenburg M. Curtis, Vasco W. Donald, Walters Mark. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California: Pre-stimulation Modeling and Interpretation of the Stimulation (2013).

Sanyal K. Subir and Eney L. Steven. Fifty Years of power generation at the Geysers Geothermal Field, California – The lessons learned. GeothermEx Inc. and Calpine Corporation (2011).

Schmitt K. Axel, Grove Marty, Harrison T. Mark, Lovera Oscar, Hulen Jeffrey, Walters Mark. The Geysers-Cobb Mountain Magma System, California (Part 2): timescales of pluton emplacement and implications for its thermal history (2003).

Song Haomin, Liu Youhai, Liu Zhejun, Singer H. Matthew, Li Chenyu, Cheney R. Alec, Ji Dengxin, Zhou Lyu, Zhang Nan, Zeng Xie, Bei Zongmin, Yu Zongfu, Jiang



Suhua, Gan Qiaoqiang. Cold Vapor Generation beyond the Input Solar Energy Limit (2017).

Stanley D. William and Rodriguez D. Brian. A Revised Tectonic Model for The Geysers-Clear Lake Geothermal Region, California (1992).

Stimac A. James, Goff Fraser, Wohletz Ken. Thermal modeling of the Clear Lake magmatic-hydrothermal system, California, USA (2001).

Truesdell H. Alfred and White E. Donald. Production of superheated steam from vapor-dominated geothermal reservoirs (1973).

Truesdell H. Alfred, Haizlip J. Robinson, Box Jr. W. T., D'Amore Franco. Fieldwide Chemical and Isotopic Gradients in Steam from The Geysers (1987).

Truesdell H. Alfred, Haizlip J. Robinson, Box Jr. W. T., D'Amore Franco. A Geochemical Overview of The Geysers Geothermal Reservoir, Geothermal Resources Council (1991).

Walters A. Mark and Combs Jim. Heat Flow in the Geysers-Clear Lake Geothermal Area of Northern California, USA. Geothermal Resources Council (1991).

Walters A. Mark. Heat Flow in the Geysers – Clear Lake Geothermal Area of Northern California, U.S.A. (1992).

Weres Oleh, Tsao Karen, Wood Byron. Resource, Technology, and Environment at The Geysers (1977).

White E. Donald, Muffler L.J. Patrick, Truesdell H. Alfred. Vapor Dominated hydrothermal systems compared with hot waters systems (1971).

Williams F. Collin, Galanis S. Peter, Moses H. Thomas, Grubb V. Frederick. Heat-flow studies in the Northwest Geysers geothermal field, California. Geothermal Research Council Transactions 17 (1993).

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<https://www.lovegeothermal.org/>

<https://www.usgs.gov/volcanoes/clear-lake-volcanic-field/science/geysers-geothermal-field> (USGS, The Geysers Geothermal field)

<https://geysers.com/The-Geysers/Geysers-By-The-Numbers> (Geysers by the numbers, Calpine Corporation, 2022)

https://www.researchgate.net/publication/341099488_Desalination_Using_Renewable_Energy (Abdelrahman Fawzy. Desalination Using Renewable Energy, 2020).



<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=323100> (Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism Program. Clear Lake Volcanic Field)

https://www.unionegeotermica.it/What_is_geothermal_en.html

<https://www.usgs.gov/volcanoes/clear-lake-volcanic-field/science/geysers-geothermal-field>

<https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-power-plants.php>

<https://www.energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation>

<https://www.nps.gov/subjects/geology/plate-tectonics-subduction-zones.htm>

<https://web.mit.edu> (A brief history of geothermal energy)

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1048267> (The Geysers Geothermal Field Update 1990/2010)

<https://geysers.com/history11> (Calpine, History Timeline of The Geysers)

<https://geysers.com/> (Calpine 2024).