

**ΠΡΑΚΤΙΚΑ  
ΤΡΙΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ  
ΓΙΑ ΤΙΣ  
ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

---

Β΄ ΤΟΜΟΣ

Θεσσαλονίκη 9-11/11/1988



**ΕΛΚΕΠΑ**

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

**ΘΕΜΑ 13 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ****ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΗΡΕΑΖΟΝΤΕΣ ΤΙΣ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ**

Α.Ι. Καράμπελας, Ν. Ανδρίτσος και Α. Μουζά  
 Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διαδικασιών, Ταχ. Θυρ. 19517  
 Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
 540 06 Θεσσαλονίκη

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Συνοψίζονται τα αίτια σχηματισμού επικαθίσεων θειούχων και πυριτικών ενώσεων και τα συνθήκη προβλήματα που προκαλούν στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις. Η μελέτη των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των ρευστών δείχνει ότι η δημιουργία επικαθίσεων τόσο θειούχων όσο και πυριτικών ενώσεων επηρεάζεται σημαντικά από το pH. Η θερμοκρασία φαίνεται ότι επηρεάζει σημαντικά μόνο τις επικαθίσεις θειούχων ενώσεων. Η ρύθμιση του pH προβάλλει ως η κύρια "χημική" μέθοδος αντιμετώπισης των επικαθίσεων για ρευστά υψηλής θερμοκρασίας. Έλεγχος των επικαθίσεων μπορεί επίσης να επιτευχθεί με κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία της γεωθερμικής εγκατάστασης.

**ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ:** Επικαθίσεις, Γεωθερμία, Υψηλής Ενθαλπίας Ρευστά, Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, Θειούχες Ενώσεις, Πυριτικά, Μέθοδοι αντιμετώπισης.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο σχηματισμός επικαθίσεων (scaling) στις σωληνώσεις και συσκευές γεωθερμικών εγκαταστάσεων είναι το κυριώτερο εμπόδιο στην οικονομική εκμετάλλευση των γεωθερμικών πεδίων. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο σε εγκαταστάσεις εκμεταλλεύσεως γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι εγκαταστάσεις με ρευστά χαμηλής ενθαλπίας δεν πάσχουν από επικαθίσεις. Οι επικαθίσεις συνίστανται από μεγάλο αριθμό χημικών ενώσεων - κάτι που αναμένεται χυριζοντας τον σύνθετο χαρακτήρα των ρευστών.

Ο σχηματισμός των επικαθίσεων μπορεί να ελεγχθεί, τουλάχιστον μερικώς, με τον σωστό σχεδιασμό της μονάδας, με την κατάλληλη εκλογή των συνθηκών λειτουργίας, με την προσθήκη χημικών ουσιών ("αναστολέων"), με την απομάκρυνση των σχηματιζομένων στερεών με χημικά ή φυσικά μέσα, και τέλος με περιοδικές διακοπές της λειτουργίας και καθαρισμό των σωληνώσεων.

Στην ανακοίνωση αυτή εξετάζονται οι επικαθίσεις των θειούχων ενώσεων των βαρέων μετάλλων και των πυριτικών ενώσεων οι οποίες προκαλούνται από ρευστά υψηλής ενθαλπίας όπως της Μήλου. Εν τούτοις ωριμάμενα σχόλια και συμπεράσματα αφορούν και επικαθίσεις ανθρακικών και θειικών ενώσεων.

## ΑΙΤΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ, ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ ΤΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ

Το γεωθερμικό ρευστό στις συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας του ταμειυτήρα είναι συνήθως κορεσμένο με άλατα τα οποία είναι ελάχιστα διαλυτά. Βασική αιτία σχηματισμού επικαθήσεων είναι η εκτόνωση του ρευστού, δηλαδή τόνος η συνεχής πτώση πίεσης στις σωληνώσεις όσο και η απότομη εκτόνωση σε κάποιο σημείο για ρύθμιση των συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης. Η μείωση της μάζας του υγρού κατά την εκτόνωση και η παράλληλη ελάττωση της θερμοκρασίας δημιουργούν συνθήκες υπερκορεσμού των αλάτων στο υγρό και ευνοούν το σχηματισμό επικαθήσεων. Ένας εξίσου σημαντικός λόγος για την αύξηση του υπερκορεσμού στο υγρό είναι η αύξηση του pH που προκαλείται από την απελευθέρωση  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{S}$ , σαν συνέπεια της εκτόνωσης. Η αύξηση του pH, όπως είναι γνωστό, μειώνει την διαλυτότητα πολλών αλάτων όπως των ανθρακικών και των θειούχων.

Η σύσταση των επικαθήσεων στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις είναι αρκετά περίπλοκη και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και πίεση του παραγωγικού συστήματος, την σύσταση του γεωθερμικού ρευστού και από την θέση τους σε σχέση με το σημείο εκτόνωσης. Συνήθως χαμηλής ενθαλπίας ρευστά ( $T < 150^\circ\text{C}$ ), που έχουν και μικρή αλατότητα, δημιουργούν επικαθήσεις ανθρακικών αλάτων. Ρευστά μεγαλύτερης θερμοκρασίας αλλά μικρής αλατότητας δημιουργούν κυρίως επικαθήσεις ενώσεων του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$  και μεταλλο-πυριτικά άλατα), ενώ ρευστά με μεγάλη αλατότητα σχηματίζουν επικαθήσεις με αρκετά περίπλοκη σύσταση (πυριτικά - θειούχα) (Owen and Michels, 1984). Τυπικό παράδειγμα της τελευταίας περιπτώσεως είναι οι επικαθήσεις της μονάδας της Μήλου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 (Karabelas et al., 1988). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μία τυπική ανάλυση του αζμολοίου από τη Μήλο.

Ο σχηματισμός των επικαθήσεων προκαλεί σημαντική αύξηση στην πτώση πίεσης λόγω μείωσης της διατομής των σωληνώσεων και αύξησης της τραχύτητάς των. Αποτέλεσμα αυτών είναι αφενός η μείωση της παραγωγικότητας των γεωτρήσεων και της εγκατάστασης, και αφετέρου το αυξημένο κόστος συντήρησής της. Ιδιαίτερα προβλήματα στη λειτουργία μιάς μονάδας προκαλεί η τάση να δημιουργούνται επικαθήσεις σε συγκεκριμένα σημεία, ιδιαίτερα αμέσως μετά το σημείο της μερικής ή ολικής εκτόνωσης του ρευστού ή στις αντλίες επανέγχυσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι, αν εκτεταμένη εκτόνωση γίνεται κοντά στον ταμειυτήρα, είναι πολύ πιθανό να κλείσουν οι σχισμές του διάτρητου σωλήνα άντλησης (slotted liner) με επακόλουθο την αχρήστευση της γεωτρήσης. Τοπική αύξηση επικαθήσεων μπορεί να παρατηρηθεί επίσης σε σημεία αλλαγών της διαμέτρου των σωληνώσεων και σε σημεία που υπάρχει παρεμπόδιση της ροής (π.χ. σε σημεία που είναι τοποθετημένα όργανα) λόγω ρευστοδυναμικών αιτιών.

Η υφή των επικαθήσεων (βαθμός σαθρότητας), η ανάπτυξή τους με τη μορφή στοιβάδων (λόγω κυρίως αλλαγών στις συνθήκες λειτουργίας) και οι συχνές διακοπές λειτουργίας της μονάδας, με τις επακόλουθες συστολές και διαστολές, μπορεί να προκαλέσουν την αποκόλληση τεμαχίων των επικαθήσεων και την μεταφορά τους σε συγκεκριμένα σημεία (π.χ. χωνίες) όπου συσσωρεύονται. Τα "φερτά" αυτά υλικά προξενούν προφανή προβλήματα στη ροή του ρευστού (σημαντική αύξηση της πτώσης πίεσης), όπως δείχνει πρόσφατη εμπειρία στη Μήλο.

## ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ

### (α) Θειούχες ενώσεις

Όταν γίνεται εκτόνωση ενός γεωθερμικού ρευστού, τότε δύο αντιτιθέμενες τάσεις ενεργούν σε σχέση με τα θειούχα ιόντα (Owen and Michels, 1984). Για ελαφρώς όξινα ρευστά, όπως αυτά της Μήλου ( $\text{pH} = 5.5$ ), μεγάλο ποσοστό των ιόντων θείου μεταφέρεται στην αέρια φάση σαν  $\text{H}_2\text{S}$ , προκαλώντας έτσι μείωση

της συγκέντρωσης των ιόντων  $S^{2-}$ . Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, η αύξηση του pH λόγω της απελευθέρωσης του  $CO_2$  και της υδρόλυσης του  $CO_3^{2-}$  μετατρέπει κάποιο μέρος των οξείων θειούχων ιόντων σε ιόντα  $S^{2-}$ , ευνοώντας έτσι την καταβύθισή τους (precipitation) με την μορφή των θειούχων ενώσεων βαρέων μετάλλων (Pb, Cu, Zn κ.λ.π.). Επιπλέον η καταβύθιση των θειούχων ενώσεων ευνοείται και από τη μείωση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της εκτόνωσης, επειδή η διαλυτότητά τους μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας.

Η επίδραση της θερμοκρασίας και του pH στη διαλυτότητα των θειούχων ενώσεων φαίνεται στα Σχήματα 1 και 2 για τρία θειούχα άλατα (PbS, ZnS και FeS) που συναντώνται στις επικαθήσεις της Μήλου. Οι καμπύλες στα σχήματα αυτά είναι υπολογισμένες από πίνακες που δίνει ο Helgeson (1967). Τονίζεται ότι για υψηλές θερμοκρασίες και για τα περίπλοκα χημικά συστήματα, οι διαλυτότητες αυτές πρέπει να θεωρηθούν ως προσεγγιστικές μόνο των πραγματικών τιμών επειδή δεν έχουν ελεγχθεί με πειραματικά δεδομένα.

Η θεωρητική διαλυτότητα των παραπάνω θειούχων ενώσεων και η διαθεσιμότητα των ιόντων  $S^{2-}$  καθορίζουν τη σειρά καταβύθισης και τη μάζα των ενώσεων αυτών. Παρά το ότι η καταβύθιση δεν είναι ταυτόσημη με την επικαθήση στερεών (scaling), οι ίδιοι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τη σειρά με την οποία εμφανίζονται, κατά μήκος των σωληνώσεων, οι θειούχες ενώσεις στις επικαθήσεις. Πράγματι, οι δυσδιάλυτες ενώσεις χαλκίτης (PbS) και χαλκοπυρίτης ( $CuFeS_2$ ) απαντώνται κυρίως στα πρώτα μέτρα των σωληνώσεων μετά την εκτόνωση στην μονάδα της Μήλου (Karabelas et al., 1988).

Η σημαντική επίδραση του pH στη δημιουργία επικαθήσεων PbS σε σωληνώσεις έχει μελετηθεί πειραματικά σε συνθήκες περιβάλλοντος (Andritsos & Karabelas, 1988). Έχει βρεθεί ότι για συγκεκριμένη αρχική συγκέντρωση PbS, σκληρές επικαθήσεις δημιουργούνται σε μία σχετικά περιορισμένη περιοχή του pH, κοντά στο pH όπου υπάρχει πλήρης διαλυτοποίηση του άλατος. Έχει επίσης επιβεβαιωθεί η παρατηρούμενη σε χημικές εγκαταστάσεις μείωση του ρυθμού επικαθήσεων κατά μήκος των σωληνώσεων, η οποία φαίνεται ότι οφείλεται κυρίως σε συσσωμάτωση των αρχικά δημιουργούμενων μικροσκοπικών σωματιδίων.

#### (β) Πυριτικά

Ως χωνοστόν, ρευστά υπερκορεσμένα σε  $SiO_2$  έχουν την τάση να αποβάλλουν στερεά πυριτικά με πολυμερισμό του μονομερούς  $SiO_2$  ή  $H_4SiO_4$ . Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο ρυθμός πολυμερισμού είναι το pH, ο βαθμός υπερκορεσμού, η αλατότητα, η θερμοκρασία και η ύπαρξη στερεών σωματιδίων (Makrides et al., 1980; Weres et al., 1981).

Η επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στη διαλυτότητα των διαφόρων μορφών του  $SiO_2$  έχει μελετηθεί αρκετά (π.χ. Fournier και Marshal, 1982; Marshal και Chen, 1982; και Chen και Marshal, 1982). Γενική είναι η τάση να αυξάνει η διαλυτότητα με τη θερμοκρασία T, για  $T < 300^\circ C$ , με συνέπεια να ελαττώνεται ο βαθμός υπερκορεσμού. Η ελάττωση αυτή ανατρέχει, εν μέρει τουλάχιστον, από την παρατηρούμενη (Owen, 1975) αύξηση του ρυθμού πολυμερισμού με τη θερμοκρασία. Επομένως, συνολικά η αύξηση της θερμοκρασίας δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τον σχηματισμό σωματιδίων πολυμερούς  $SiO_2$ .

Η επίδραση του pH στη διαλυτότητα αμόρφου  $SiO_2$  είναι σημαντική για  $pH < 8.5$ , ενώ για μεγαλύτερα pH παρατηρείται ραγδαία αύξηση της διαλυτότητας (Iler, 1979), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Σημαντική είναι η επίδραση του pH στο ρυθμό πολυμερισμού. Γενικά η παρουσία ιόντων  $OH^-$  φαίνεται ότι καταβύθει τον πολυμερισμό των πυριτικών, βοηθώντας στην δημιουργία δεσμών σιλοξανίου. Ο μέγιστος ρυθμός πολυμερισμού παρατηρείται για τιμές του pH μεταξύ 5 και 8 και ο ελάχιστος για  $pH < 3$  (Makrides et al., 1981). Το Σχήμα 4 δείχνει την μείωση της ταχύτητας πολυμερισμού με ελάττωση του pH.

Το ισοηλεκτρικό σημείο (iep) των πυριτικών είναι σε  $pH \approx 2.2$  (Iler, 1979). Τα κολλοειδή σωματίδια είναι επομένως αρνητικά φορτισμένα σε διαλύματα με

pH>2.5. Συσσωμάτωση των κολλοειδών σωματιδίων μπορεί να επιτευχθεί, ανάλογα με το βαθμό υπερκορεσμού και το pH, με διάφορους ηλεκτρολύτες, επιταχύνεται δε από στερεά σωματίδια (πυρήνες). Έχει επίσης παρατηρηθεί (Owen, 1975) ακόμη και σε ακόρεστα διαλύματα πυριτικών η συγκαταβύθιση (coprecipitation) με υδροξείδια Fe, Al, Mg, Mn κ.λ.π. Η δημιουργία μεταλλο-πυριτικών ενώσεων (π.χ. σίδηρο-πυριτικά) είναι πολύ πιθανή σε ωρισμένες περιπτώσεις (Gallup, 1988) αλλά γενικά δεν έχει επαρκώς ερευνηθεί.

Η γνωστή μείωση της διαλυτότητας των πυριτικών με αύξηση της αλατότητας αυξάνει τον βαθμό υπερκορεσμού και ευνοεί γενικά τον πολυμερισμό.

### ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΚΑΘΗΣΕΩΝ

#### (α) Χημικές Μέθοδοι

Από τα προηγούμενα χίεται φανερό ότι το pH είναι βασικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει κατά τον ίδιο τρόπο, τόσο τον πολυμερισμό και τη συσσωμάτωση των πυριτικών όσο και την καταβύθιση των θειούχων ενώσεων. Επί πλέον η δημιουργία πυρήνων των δυσδιαλύτων θειούχων ενώσεων υποβοηθεί και τον πολυμερισμό/συσσωμάτωση των πυριτικών. Επομένως οι επικαθήσεις θειούχων και πυριτικών ενώσεων μπορούν να αντιμετωπισθούν με τους εξής τρόπους

- i) Ελάττωση του pH
- ii) Ελεγχόμενη οξειδωση των ιόντων θείου
- iii) Χημικά πρόσθετα ("αναστολείς").

Πρόσθετα (π.χ. οργανοφωσφορικές ενώσεις) έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην αποτροπή επικαθήσεων ανθρακικών σε θερμοκρασίες κάτω των 150°C. Η ανεπιτυχής εφαρμογή τους για επικαθήσεις πυριτικών οφείλεται κυρίως στην χημική αστάθεια των προσθέτων σε υψηλές θερμοκρασίες (Harrar, 1981).

Η δεύτερη μέθοδος (οξειδωση ιόντων θείου σε στοιχειακό θείο ή θειικά ιόντα) περιγράφεται από τους Jackson και Hill (1976) και παρουσιάζει ενδιαφέρον. Δεν φαίνεται όμως να έχει δοκιμασθεί πειραματικά, ίσως λόγω δυσκολίας στην εφαρμογή της. Τούτο διότι το οξειδωτικό μέσο μπορεί να αυξήσει τη διαβρωτικότητα του ρευστού, αλλά και να συμβάλλει στην δημιουργία δυσδιαλύτων οξειδίων και θειικών ενώσεων.

Η ρύθμιση του pH φαίνεται ότι έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε αρκετές περιπτώσεις (π.χ. Greens and Owen, 1977; Harrar, 1981; Gallup, 1988). Οι Rothbaum and Rohde (1979) αναφέρουν ότι στα χρωθερμικά πεδία Weirakei και Broadlands ρύθμιση του pH μεταξύ 4 και 5 ελαττώνει το ρυθμό σχηματισμού επικαθήσεων πυριτικών μέχρι 100 φορές. Ενδιαφέρουσα είναι επίσης και η περίπτωση επικαθήσεων από σίδηροπυριτικές ενώσεις για τις οποίες αναφέρεται (Gallup, 1988) σημαντική ελάττωση με μείωση του pH μόνο κατά 0.1-0.3 μονάδες.

Από τον Πίνακα 1 και το Σχήμα 1 φαίνεται ότι για τα χρωθερμικά ρευστά της Μήλου μείωση του pH κατά μία μονάδα είναι δυνατόν να αποτρέψει τις επικαθήσεις θειούχων ενώσεων. Τούτο χίεται σαφές στον Πίνακα 3. Δηλαδή για pH=4.3 η διαλυτότητα των θειούχων ενώσεων, με εξαίρεση το σίδηρο, είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη διαθεσιμότητα των ιόντων των μετάλλων στα ρευστά.

Πίνακας 3: Σύγκριση διαλυτότητας θειούχων ενώσεων σε 230°C με περιεκτικότητα κατιόντων στα ρευστά της Μήλου.

Μέταλλα	Περιεκτικότητα στα ρευστά, ppm	Διαλυτότητα θειούχων, ppm M <sup>++</sup>	
		pH 5.3	pH 4.3
Pb	1.8	0.75	7.3
Zn	3.3	4.1	39.0
Fe	20.0	1.8	17.5
Cu	0.2	0.2	2.0

Η παραπάνω πρόβλεψη ενισχύεται επίσης από ερευνητική εργασία σε συνθήκες περιβάλλοντος (Andritsos & Karabelas, 1988) που δείχνει ότι οι επικαθήσεις PbS εμφανίζονται σε μία περιορισμένη περιοχή του pH, και μάλιστα γύρω από το pH όπου υπάρχει πλήρης διαλυτοποίηση του άλατος.

Τα πιθανά μειονεκτήματα της προαναφερόμενης μεθόδου, τα οποία απαιτούν πρόσθετη μελέτη, είναι η πιθανώς αυξημένη τάση για διάβρωση των ρευστών με μειωμένο pH, και το κόστος του οξέος. Λόγω του "ρυθμιστικού" χαρακτήρα των γεωθερμικών ρευστών είναι πιθανόν να απαιτούνται σημαντικές ποσότητες οξέος για μείωση του pH. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί κατά αξιόπιστο τρόπο μόνο πειραματικά και στις πραγματικές συνθήκες των ρευστών.

### (β) Κατάλληλος Σχεδιασμός και Λειτουργία της Μονάδας

Συνοπτικά αναφέρονται μερικοί βασικοί τρόποι ελέγχου των επικαθήσεων:

Έλεγχος της εκτόνωσης. Εκτεταμένη εκτόνωση στο σωλήνα της γεώτρησης και ιδιαίτερα κοντά στο κατώτερο τμήμα (slotted liner) πρέπει να αποφεύγεται για προφανείς λόγους. Η έκταση της εκτόνωσης εκεί μπορεί πολλές φορές να ελεγχθεί ικανοποιητικά με την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης. Γενικά επιδιώκεται να γίνεται εκτόνωση σε σχετικά χαμηλές πιέσεις μόνο στις επιφανειακές εγκαταστάσεις όπου οι επικαθήσεις μπορούν να αντιμετωπισθούν ευκολότερα και κατά οικονομικότερο τρόπο.

Σχεδιασμός Σωληνώσεων. Ο σημαντικότερος μηχανισμός σχηματισμού επικαθήσεων φαίνεται ότι είναι η διάχυση ιόντων ή/και μικροσκοπικών σωματιδίων προς την εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα (Andritsos & Karabelas, 1988). Επομένως, η αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα και η συνακόλουθη μείωση της μέσης ταχύτητας (για σταθερή ογκομετρική παροχή υγρού) μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση του ρυθμού επικαθήσεων. Εκτός απ' την επιλογή κατάλληλης διαμέτρου, και άλλα μέτρα κατά τον σχεδιασμό των σωληνώσεων είναι δυνατόν να διευκολύνουν την αντιμετώπιση των επικαθήσεων, όπως η αποφυγή αλλαγών της διαμέτρου και εμποδίων στη ροή, η τοποθέτηση παρακαμπτηρίων γραμμών (by-pass) σε καίρια σημεία (π.χ. orifices), η αποφυγή πολλών γωνιών και καμπών, και η τοποθέτηση δοχείων συλλογής στερεών (pots).

Συνθήκες Λειτουργίας. Είναι επιθυμητή η διατήρηση σταθερών συνθηκών (πίεσης, θερμοκρασίας και παροχής) σε μία γεωθερμική μονάδα. Ιδιαίτερα οι σχετικά μακράς διάρκειας διακυμάνσεις της πίεσης και θερμοκρασίας σε τιμές μικρότερες απ' τις συνθήκες σχεδιασμού είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε επιτάχυνση του ρυθμού επικαθήσεων, σε σχηματισμό στοιβάδων επικαθήσεων με διαφορετικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά και τέλος, λόγω και θερμικών τάσεων, σε αποκόλληση τεμαχίων απ' τις επικαθήσεις.

### ΣΧΟΛΙΑ

Η ερευνητική προσπάθεια που γίνεται πάνω στα προβλήματα των επικαθήσεων φαίνεται ότι αρχίζει να αποδίδει αποτελέσματα με γενικότερη εφαρμογή. Θα πρέπει όμως να τονισθεί ότι κάθε γεωθερμικό ρευστό είναι δυνατόν να παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, αφειλόμενες στη σύστασή του και στην αλληλεπίδραση των αντιστοιχών φυσικοχημικών παραχόντων. Γιαυτό το λόγο η εμπειρία που αποκτάται σε κάποια μονάδα είναι συνήθως δύσκολο να μεταφέρεται αυτούσια σε άλλη, με διαφορετικής σύστασης ρευστό. Επομένως οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν θα πρέπει να δοκιμασθούν πειραματικά σε κάθε πεδίο.

### BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Andritsos, N. and A.J. Karabelas, (1988), "Laboratory Studies of PbS Scale



- Formation in Steel Pipes", παρουσιάσθηκε στο International Workshop on DEPOSITION OF SOLIDS IN GEOTHERMAL SYSTEMS, Reykjavik, August 16-19.
- Chen, C.A. and W.L. Marshal, (1982), "Amorphous Silica Solubilities IV. Behavior in pure water and aqueous sodium chloride, sodium sulfate, magnesium chloride and magnesium sulfate solutions up to 350°C", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, pp 279-287.
- Fournier, R.O. and W.L. Marshal, (1983), "Calculation of amorphous silica solubilities at 25 to 300°C and apparent cation hydration numbers in aqueous salt solutions using the concept of effective density of water", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, pp 587-596.
- Gallup, D.L., (1988), "Iron Silicate Formation and Inhibition at the Salton Sea Geothermal Field", παρουσιάσθηκε στο International Workshop on DEPOSITION OF SOLIDS IN GEOTHERMAL SYSTEMS, Reykjavik, August 16-19.
- Grens, J.Z. and L.B. Owen, (1977), "Field Evaluation of Scale Control Methods", *Transactions Geothermal Resources Council*, 1, 119.
- Harrar, J.E., (1981), "Final Report on Studies of Brine Chemistry and Scaling of the Salton Sea Geothermal Field, 1977-1979", Lawrence Livermore Laboratory, Report UCID-18917.
- Helgeson, H.G., (1969), "Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures", *Am. Jour. Sci.*, 267, pp 729-804.
- Iler, R.K., (1979), "The Chemistry of Silica", John Wiley & Sons Inc.
- Jackson, D.D., and J.H. Hill, (1976), "Possibilities for Controlling Heavy Metal Sulfides in Scale from Geothermal Brines", Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-51977.
- Karabelas, A.J. et al., (1988) "Characteristics of Scales from the Milos Geothermal Plant", παρουσιάσθηκε στο International Workshop on DEPOSITION OF SOLIDS IN GEOTHERMAL SYSTEMS, Reykjavik, August 16-19.
- Marshal, W.L. and C.A. Chen, (1982), "Amorphous silica solubilities V. Prediction of Solubility behavior in aqueous mixed electrolyte solutions up to 300°C", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, pp 289-291.
- Makrides, A.C. et al., (1980), "Condensation of Silica from Supersaturated Silica Acid Solutions", *J. Colloid Interf. Science*, 73, No 2, pp 345-367.
- Owen, L.B., (1975), "Precipitation of Amorphous Silica from High Temperature hypersaline Geothermal Brines", Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-51866.
- Owen, L.B. and D.E. Michels, (1984), "Geochemical Engineering Reference Manual", Department of Energy, Rep No DOE/SF/11520-T1.
- Rothbaum, H.P. and A.G. Rohde, (1979), "Kinetics of Silica Polymerization and Deposition from Dilute Solutions between 5 and 180°C", *J. Colloid Interf. Science*, 71, No 3, pp 533-559.
- Weres, O. et al., (1981), "Kinetics of Silica Polymerization", *J. Colloid Interf. Science*, 84, No 2, pp 379-402.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα των συγγραφέων σε θέματα επικαθήσεων έχει υποστηριχθεί οικονομικά από την Επιτροπή Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (EEC Contract No 3N3G-0040-GR), την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, ΥΒΕΤ και τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, προς τους οποίους εκφράζονται θερμές ευχαριστίες. Η συνεργασία με τα στελέχη του Τομέα Γεωθερμίας της ΔΕΗ ήταν και είναι πάντα ποζήτημη.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ανάλυση Αιμολαίμου**

1. Φυσικές Ιδιότητες:  
 - pH : 5.3  
 - Αγωγιμότητα : 55500  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
 - Πυκνότητα : 1.066  $\text{gr}/\text{ml}$   
 - Εκληρότητα : 1096.5  $^{\circ}\text{F}$
2. Χημική Ανάλυση

Κατιόντα	ppm	mg/l	Ανιόντα	ppm	mg/l
Na <sup>+</sup>	31500.0	1369.6	Cl <sup>-</sup>	65400.0	1842.3
K <sup>+</sup>	9500.0	243.6	SO <sup>2-</sup>	20.0	0.4
Ca <sup>2+</sup>	4380.0	219.0	*S <sup>2-</sup>	2.4	0.08
Mg <sup>2+</sup>	4.0	0.3	F <sup>-</sup>	3.9	0.21
Fe <sup>2+</sup>	19.1	0.35	*HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	25.0	0.4
Mn <sup>2+</sup>	29.5	0.55	NO <sub>3</sub>	280.0	4.6
Zn <sup>2+</sup>	3.3	0.05			
Li <sup>+</sup>	81.2	11.7	Total	65731.3	1847.99
Str <sup>2+</sup>	70.1	0.8			
Ba <sup>2+</sup>	37.2	0.3			
Pb <sup>2+</sup>	1.8	0.01	Χλωρίς Φοστίο	ppm	
Ni <sup>2+</sup>	1.1	0.02	As	13.8	
Co <sup>2+</sup>	1.7	0.03	Sb	3.6	
Cu <sup>2+</sup>	0.2	0.0	B	125.0	
Cr <sup>3+</sup>	0.1	0.0	SiO <sub>2</sub> (ολικό)	1000.0	
Ca <sup>2+</sup>	0.2	0.0	*SiO <sub>2</sub> (μονομερές)	950.0	
Aq <sup>+</sup>	0.2	0.0	CO <sub>2</sub>	280.0	
Σύνολο	45629.7	1846.31			

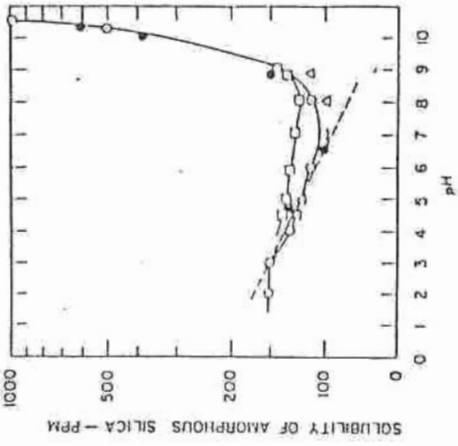
\* Μεταθέσεις επιτόπου

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Χημική Ανάλυση Δειγμάτων Επικαθίσου**

Σύνθεση (κ.θ. %)						
Εστοιχείο	Δείγμα Νο 1	Δείγμα Νο 3	Δείγμα Νο 5	Δείγμα Νο 8	Δείγμα Νο 9	Δείγμα Νο 10
Na	0.7	0.2	2.2	1.5	2.9	1.5
K	0.2	0.1	0.8	0.5	1.1	0.5
Mg	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.1
Ca	*	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
Mn	0.2	0.3	2.9	1.6	1.4	0.5
Pb	33.8	8.9	0.2	0.9	1.2	0.7
Fe	13.9	20.0	30.7	33.5	22.0	9.9
Zn	15.5	28.9	0.4	3.5	5.2	1.6
Ag	0.1	0.1	*	*	*	*
Cu	3.0	1.9	0.1	0.1	0.3	0.1
Sb	0.5	0.1	*	*	*	*
Si	11.9	12.7	25.4	24.7	25.8	48.2
Cl	1.1	0.2	3.4	1.9	5.3	2.6
S	10.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Σύνολο	91.0	73.6	66.7	68.6	65.8	65.8
Χρυσταλλικές Φάσεις						
	PbS β-ZnS CuFeS <sub>2</sub> α-ZnS	β-ZnS PbS FeS <sub>2</sub> CuFeS <sub>2</sub>	-	Fe <sub>0.95</sub> S	NaCl β-ZnS	*Αμορφες Πυριτικές Ενώσεις

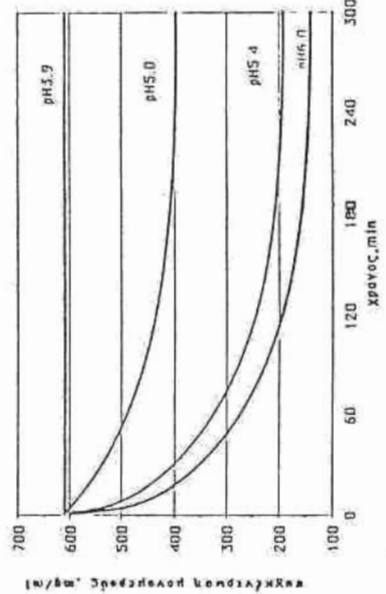
\* Ίχνη (<0.1%) n.a.: δεν αναλύθηκε Cr: Ίχνη Ni, Sn: δεν βρέθηκαν



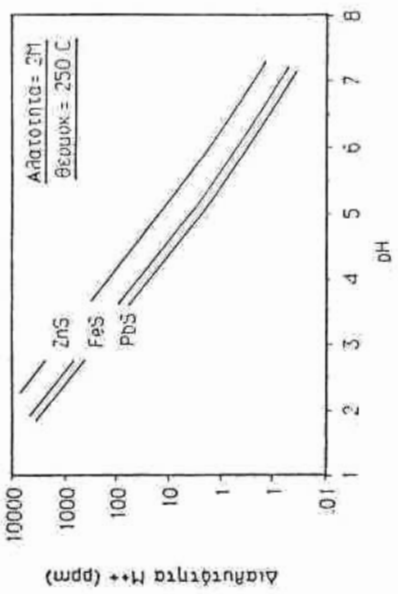


ΓΡ-20

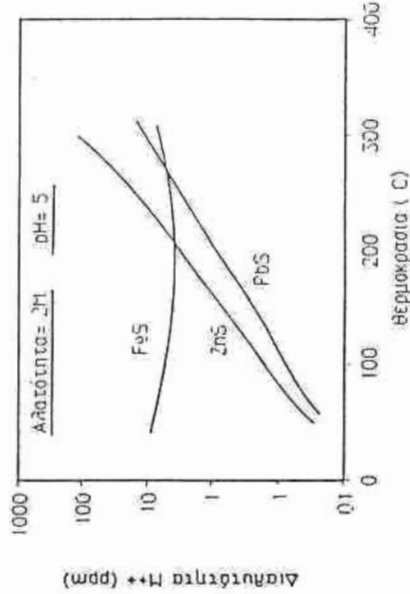
Σχήμα 3: Επίδραση του pH στην διαλυτότητα του αμόρφου πυριτίου (Iler, 1979).



Σχήμα 4: Παλιμερισμός του αμόρφου πυριτίου σε όξινα διαλύματα και θερμοκρασία περιβάλλοντος (Owen, 1975).



Σχήμα 1: Επίδραση του pH στη διαλυτότητα θειούχων ενώσεων



Σχήμα 2: Επίδραση της θερμοκρασίας στη διαλυτότητα θειούχων ενώσεων