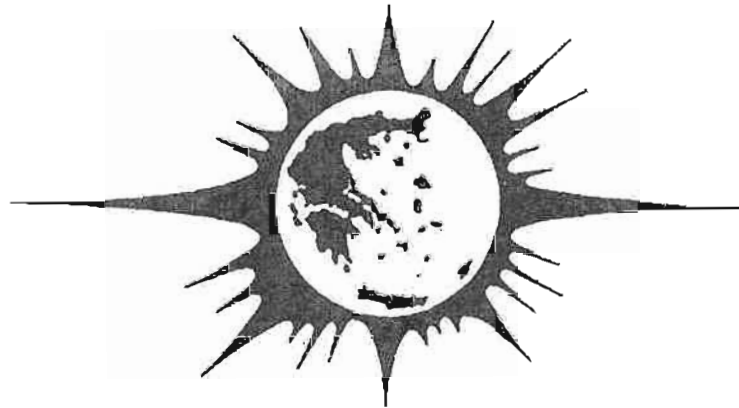


**I.H.T.**  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΤΕΤΑΡΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ**  
ΓΙΑ ΤΙΣ  
**ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Ξάνθη, 6-8 Οκτωβρίου 1992



**ΠΡΑΚΤΙΚΑ**  
**Τόμος Β**

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης  
Πολυτεχνική Σχολή

## ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ - Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

Α. Καραγιάννης, Α. Α. Μουζά και Α. Ι. Καραμπέλας  
 Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων  
 Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πολυτεχνικής Σχολής Α.Π.Θ.  
 Παν. Θυρίδα 455, 540 06 Θεσ/νίκη, FAX (31) 99 1453

## Περίληψη

Γίνεται επισκόπηση των πιθανών επιπτώσεων στο περιβάλλον από την εκμετάλλευση της γεωθερμίας, η οποία έχει εντατικοποιηθεί διεθνώς κατά τα τελευταία τριάντα χρόνια. Παράλληλα γίνονται συγκρίσεις με τα γεωθερμικά ρευστά του ελληνικού χώρου και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας δεν παρουσιάζουν αξία λόγου προβλήματα. Μόνο η τελική διάθεση του νερού πρέπει να μελετάται προσεκτικά, κατά περίπτωση, με πρόσθετο στόχο τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από την εκμετάλλευση.

Υπάρχει σημαντική και θετική εμπειρία διεθνώς από την αξιοποίηση ρευστών υψηλής ενθαλπίας. Τα απαέρια από οποιαδήποτε γεωθερμική εγκατάσταση μπορούν να ικανοποιούν ανώτερες προδιαγραφές με προσθήκη μονάδας δέσμησης του  $H_2S$ . Δοκιμασμένες μέθοδοι είναι διαθέσιμες γιαυτό το σκοπό, ενώ παράλληλα μελετώνται και νέες μέθοδοι προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες των γεωθερμικών εγκαταστάσεων. Για την τελική διάθεση των υγρών (άλμης) επικρατέστερη διεθνώς είναι η επανέγχυση η οποία λύνει οποιοδήποτε πρόβλημα επιφανειακής ρύπανσης. Καθίζηση εδάφους που έχει παρατηρηθεί σε μία γεωθερμική εκμετάλλευση της Ν. Ζηλανδίας αποδίδεται στην ποιότητα των πετρωμάτων του ταμειυτήρα και δεν πρέπει να απασχολεί για την αξιοποίηση ελληνικών ταμειυτήρων.

Στην εισήγηση συνοψίζεται τέλος η μεθοδολογία εκπόνησης μελετών, οι οποίες πρέπει να απασχολούν σε αξιόπιστες προβλέψεις πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και λήψη μέτρων, πριν απ' την ανάπτυξη και εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ακόλουθη διάκριση των γεωθερμικών ρευστών είναι χρήσιμη, μεταξύ άλλων, και για την εξέταση των επιπτώσεων από την αξιοποίησή τους.

Ρευστά χαμηλής ενθαλπίας. Πρόκειται κυρίως για θερμό νερό, θερμοκρασίας συνήθως κάτω από  $100^\circ C$ , συνοδευόμενο από μη συμπυκνώσιμα αέρια. Λόγω προελεύσεως και ήπιων συνθηκών στους σχετικούς ταμειυτήρες, τα ρευστά αυτά είναι αρκετά "φτωχότερα" σε διαλελυμένα ανόργανα συστατικά συγκρινόμενα με την επόμενη κατηγορία.

Ρευστά υψηλής ενθαλπίας. Στους ταμειυτήρες απ' όπου προέρχονται τα ρευστά αυτά επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (τυπικές τιμές 30-100 bar, 200-400°C). Τα ρευστά μπορεί να φθάνουν στην κεφαλή της γεώτρησης ως υπέρθερος ατμός με μη συμπυκνώσιμα αέρια (π.χ.  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ) ή και ως διαφασικό ρευστό. Το υγρό (άλμη) στη δεύτερη περίπτωση είναι συνήθως πλούσιο σε ανόργανα συστατικά, ενώ ο ατμός συνοδεύεται επίσης από μη συμπυκνώσιμα αέρια.

Απ' την παραπάνω συνοπτική περιγραφή είναι σαφές ότι η εξέταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων απ' τη χρήση της γεωθερμίας πρέπει να περιλαμβάνει πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με τα αέρια συστατικά καθώς και με τα υγρά (ανόργανα συστατικά, αποβαλλόμενη θερμότητα). Ειδικά για ταμειυτήρες υψηλής ενθαλπίας, έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία [3, 6] και η περίπτωση καθίζσεως κοντά σε γεωθερμικό πεδίο λόγω εντατικής εκμεταλλεύσεως. Έχει επίσης συζητηθεί η πιθανότητα σεισμικής διεγέρσεως σε σειсмоγενείς περιοχές. Ένα άλλο γενικώτερο πρόβλημα, το οποίο όμως προβάλλεται για οποιαδήποτε βιομηχανική δραστηριότητα (ή αξιοποίηση ενεργειακών πόρων), είναι η πιθανή υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος (αισθητική αλλοίωση χώρου, θόρυβοι, κλπ).

Εκμετάλλευση της γεωθερμίας γίνεται ουσιαστικά απ' τις αρχές του αιώνα μας σε περιορισμένη σχετικά κλίμακα (π.χ. Ιταλία Larderello, Ισλανδία κ.ά.). Οι προσπάθειες

για εκμετάλλευση έχουν όμως ενταθεί διεθνώς τα τελευταία 30 περίπου χρόνια. Η περίοδος αυτή συμπίπτει με το (δικαιολογημένο σε μεγάλο βαθμό) σκεπτικισμό που επικρατεί για την εντατική εκμετάλλευση φυσικών πόρων, και ο οποίος απαιτεί την αξιόπιστη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ένας άλλος εγγενής παράγων, ο οποίος επιβάλλει προσεκτική μελέτη των επιπτώσεων αυτών, αφορά τη σύσταση και το ενεργειακό περιεχόμενο των ρευστών. Οι ιδιότητες αυτές είναι συνάρτηση των γεωλογικών κυρίως χαρακτηριστικών κάθε περιοχής, πράγμα που καθιστά κάθε γεωθερμικό πεδίο "ιδιόμορφο". Η ιδιομορφία αυτή δυσκολεύει τη γενίκευση των συμπερασμάτων και την αυτούσια μεταφορά της αποκτηθείσας εμπειρίας από πεδίο σε πεδίο. Παρόλα αυτά, τα συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από τα διάφορα γεωθερμικά πεδία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για μια αρχική θεώρηση των επιπτώσεων από την ανάπτυξη ενός νέου πεδίου και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων οι οποίες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και μελέτη.

Στην εισήγηση αυτή θα συνοψισθεί η διεθνής εμπειρία (σε σχέση με περιβαλλοντικές επιπτώσεις) αρχικά για τα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας και ακολούθως για τα υψηλής ενθαλπίας. Αυτό κρίνεται σκόπιμο κυρίως για να αποφεύγονται συγχύσεις και για να μην προσάπτονται εσφαλμένα "αιτιάσεις", κυρίως στα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας.

## 2. ΡΕΥΣΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Πρέπει να τονισθεί ότι η εγκατεστημένη σήμερα διεθνώς ισχύς, η οποία συνδέεται με πεδία χαμηλής ενθαλπίας, είναι σχεδόν διπλάσια εκείνης από πεδία υψηλής ενθαλπίας. Η τελευταία [5] εκτιμάται ότι σήμερα ανέρχεται σε 5500-6000 MWe και αφορά παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως με κατευθείαν εκμετάλλευση του γεωθερμικού ατμού. Ο Πίνακας 1 δείχνει ενδιαφέροντα αποτελέσματα εκτεταμένης έρευνας της National Energy Authority της Ισλανδίας [12] για την περίπτωση χαμηλής ενθαλπίας το έτος 1980. Οι συντάκτες της έκθεσης αναγνωρίζουν παραλείψεις (λόγω αδυναμίας συγκέντρωσης στοιχείων), οι οποίες οδηγούν σε υποεκτίμηση της εγκατεστημένης ισοδύναμης ισχύος. Αν ληφθεί υπόψη η εντωμεταξύ αύξηση των εφαρμογών, εκτιμάται ότι η ισοδύναμη ισχύς από πεδία χαμηλής ενθαλπίας υπερβαίνει σήμερα τα 10000 MW. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος αυτής (>70%) δαπανάται για λουτρά, θέρμανση και συναφείς οικιακές χρήσεις.

Είναι προφανές ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από την αξιοποίηση του σημαντικού αυτού (ιδιαίτερα για την πατρίδα μας) ενεργειακού πόρου, πρέπει να εκτιμηθούν με μεγάλη προσοχή και υπευθυνότητα. Θα συνοψισθούν παρακάτω οι πιθανές επιπτώσεις από τα αέρια και τα υγρά.

### Αέρια

Παρά το γεγονός ότι η σύσταση τους μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά από πεδίο σε πεδίο, δεν έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ύπαρξη τοξικών ή επιβλαβών συστατικών. Στον Πίνακα 2 περιλαμβάνονται δεδομένα [4] από δύο συγγενείς γεωλογικά ταμιευτήρες (Triassic reservoirs) στη Γαλλία και Ιταλία οι οποίοι όμως αποδίδουν ρευστά με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στη μία περίπτωση τα αέρια είναι κυρίως  $N_2$  και  $CO_2$ , ενώ στην άλλη μεθάνιο ( $CH_4$ ). Σε πολλά ελληνικά πεδία υπάρχει  $CO_2$  σε πολύ μεγάλο ποσοστό [16]. Η διάθεση των αερίων, μετά το διαχωρισμό απ' το υγρό, μπορεί να γίνεται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα. Φυσικά προηγείται δέσμευση ή διαχωρισμός  $CO_2$  ή  $CH_4$  για εκμετάλλευση εφόσον τούτο κριθεί οικονομικά συμφέρον. Η σύσταση των αερίων πρέπει να προσδιορίζεται με ακρίβεια για την μελέτη ανάπτυξης ενός πεδίου και να ελέγχεται περιοδικά κατά τη διάρκεια εκμετάλλευσης του πεδίου.

### Υγρά

Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά και οι ιδιομορφίες των ταμιευτήρων επηρεάζουν τη σύσταση των υγρών, όπως δείχνει και ο Πίνακας 2. Γενικά, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών των ρευστών, η περιεκτικότητα σε τοξικά βαρέα μέταλλα ή άλλα τοξικά στοιχεία είναι συνήθως κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια για διάθεση σε επιφανειακούς

Πίνακας 1. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς από γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας [12].

Χώρα	Θερμική ισχύς (MW)		
	>0 °C	>15 °C	>40 °C
Ιαπωνία		4475	
Ουγγαρία	1523	1166	690
Ισλανδία	1361	1127	747
ΕΣΣΔ	669	555	364
Ιταλία	318	~265	~177
Κίνα	257	151	24
ΗΠΑ	...	~115	...
Γαλλία	74	56	25
Τσεχοσλοβακία	59	43	21
Ρουμανία	47	36	22
Αυστρία	7	5	4
Σύνολο	...	7994	...

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας [4].

	Melleray, Γαλλία	Μετανοπολί, Ιταλία
T (°C)	75.5	65
pH (στην κεφαλή)	-	7.05
αέριο/ηγρό	0.26	2
TDS (g/l)	35.2	94
Σύσταση Αέριας Φάσης (%οο)		
N <sub>2</sub>	63.1	0.8
CO <sub>2</sub>	29.3	1.2
CH <sub>4</sub>	6.2	97.7
Ar + H <sub>2</sub> + He	1.2	0.3
Σύσταση Υγρής Φάσης (ppm)		
Na <sup>+</sup>	11000	24100
K <sup>+</sup>	320	194
Ca <sup>2+</sup>	1236	2114
Mg <sup>2+</sup>	409	691
Fe <sup>2+</sup>	6.1	-
SiO <sub>2</sub>	37	29.1
Cl <sup>-</sup>	20000	42558
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1760	27
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	319	183

αποδέκτες. Τα νομοθετημένα ανώτατα όρια για τέτοιους αποδέκτες στη Β. Ελλάδα περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3. Στον Πίνακα 4 έχουν συγκεντρωθεί οι μέγιστες συγκεντρώσεις συστατικών από τα ελληνικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Είναι φανερό ότι τα συστατικά, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη αναλογία, δεν είναι γενικά επιβλαβή. Παρ' όλα αυτά πριν να αποφασισθεί η διάθεση σε επιφανειακούς αποδέκτες θα πρέπει να εκτιμηθεί ο βαθμός αραίωσης των γεωθερμικών υγρών ώστε να ικανοποιούνται οι σχετικοί περιορισμοί, όπως αυτοί του Πίνακα 3.

### Διάθεση υγρών

Τα σχόλια τα οποία συνοψίζονται εδώ αφορούν και τα υγρά που προέρχονται από ταμειντήρες υψηλής ενθαλπίας.

(α) Επανεγγύση (re-injection). Η μέθοδος είναι δαπανηρή γιατί απαιτεί βοηθητικές γεωτρήσεις και επι πλέον συνεπάγεται κόστος διοχέτευσης. Τα πλεονεκτήματά της όμως είναι σημαντικά [9, 20], όπως

- Επαύξηση του χρόνου εκμετάλλευσης του ταμειντήρα
- Αποφυγή θερμικής ρύπανσης
- Αποφυγή ανοργάνων αλάτων ή τοξικών συστατικών, αν υπάρχουν
- Μείωση της πιθανότητας καθίζησης του εδάφους απ' την εντατική εκμετάλλευση.

Με την πάροδο του χρόνου η μέθοδος αυτή φαίνεται ότι κερδίζει έδαφος διεθνώς παρά το σχετικά υψηλό της κόστος.

(β) Επιφανειακοί Αποδέκτες. Οι φυσικοί αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια, κλπ) απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, όπως έχει προαναφερθεί. Οι τεχνητοί αποδέκτες (δεξαμενές, τεχνητές λίμνες με στεγανοποίηση) δίνουν μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση των υγρών χωρίς αυστηρούς περιορισμούς (όπως αυτοί του Πίνακα 3).

(γ) Συνδυασμένη διάθεση/αξιοποίηση. Ο συνδυασμός παράλληλων και εν σειρά χρήσεων με μερική κατανάλωση (π.χ. για θέρμανση, άρδευση, ιχθυοκαλλιέργειες) και μερική τελική διάθεση σε αποδέκτες είναι σε ορισμένες περιπτώσεις μία ελκυστική λύση.

Πρέπει συμπερασματικά να τονισθεί ότι, εάν έχει μελετηθεί προσεκτικά ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας (με μοντέρνα μεθοδολογία που συνοψίζεται στο μέρος 4 της εισήγησης), τότε δεν φαίνεται να αντιμετωπίζει αξίους λόγου περιβαλλοντικούς περιορισμούς για την αξιοποίησή του. Φυσικά δεν είναι τυχαίο ότι στην ανεπτυγμένη Ιαπωνία υπάρχει εγκατεστημένη ισοδύναμη ισχύς περίπου 4500 MW μόνο από ρευστά χαμηλής ενθαλπίας.

### 3. ΡΕΥΣΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Οι επιπτώσεις απ' τα συστατικά της αέριας και της υγρής φάσης μπορούν να εξετασθούν ανεξάρτητα.

#### Αέρια

Τα συνηθέστερα μη συμπυκνώσιμα αέρια που συνοδεύουν το γεωθερμικό ατμό είναι το CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>. Γενικά, αιωρούμενα σωματίδια δεν υπάρχουν. Η ποσότητα των μη συμπυκνώσιμων αερίων μπορεί να φθάνει μέχρι και ~6% της συνολικής μάζας. Τις περισσότερες φορές το CO<sub>2</sub> βρίσκεται στη μεγαλύτερη αναλογία, χωρίς αυτό να δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα. Γενικά το παραγόμενο CO<sub>2</sub> από γεωθερμικά ρευστά είναι τουλάχιστον μιά τάξη μεγέθους λιγότερο [6] απ' το παραγόμενο από ισοδύναμη μονάδα, η οποία λειτουργεί με συμβατικά καύσιμα.

Το H<sub>2</sub>S είναι ο κύριος ρυπαντής ο οποίος απαιτεί ειδική μέριμνα για την απομάκρυνσή του. Το H<sub>2</sub>S είναι αέριο τοξικό με ανώτατο όριο συγκέντρωσης σε χώρους εργασίας (και για 8ωρη έκθεση) τα 10 ppm. Η πολιτεία της Καλιφόρνια έχει θέσει διαφορετικό κριτήριο, δηλαδή 0.03 ppm H<sub>2</sub>S [1] στην ατμόσφαιρα. Η ισχύουσα Ελληνική νομοθεσία δεν καλύπτει τα απαέρια απ' τους γεωθερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Κάποιες σχετικές αποφάσεις για άλλα συστατικά (SO<sub>2</sub>, CO) έχουν περιληφθεί σε δύο ΦΕΚ (135/α28-7-87, 92/2/18-3-88) και σε κοινοτική οδηγία (80/779 ΕΟΚ).

Πίνακας 3. Ανώτατα επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας, pH και συγκέντρωσης των κυριότερων ρυπαντών (σε ppm) για διάθεση υγρών αποβλήτων σε επιφανειακούς αποδέκτες [19].

	Θάλασσα*	Ποταμός**	Λίμνη**
T(°C)	35-40	30	30
pH	6-8.5	6-8.5	6-8.5
Συγκέντρωση(ppm)			
Λιωρούμενα Στερεά	70	25-40	25
F	30	10	8
Fe	25	15	15
Mn	4	1-2	1.5
Cu	3	1-2	1
Zn	10	5-10	1
B	2	1-2	1
As	2	0.1-2	1
Cd	0.5	0.25-2	0.2
Cr	3	1-4	1.5
Cl (ελεύθερο)	1	0.4-2	0.5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		250	
Pb	1	0.05-1	0.5
Hg	0.05	0.01-0.02	0.02
Ba	10	2-10	5

\* Θερμιακός κόλπος, \*\* Τυπικές τιμές για Β. Ελλάδα

Πίνακας 4. Μέγιστες συγκεντρώσεις ελληνικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας [16].

ουσία	συγκέντρωση (ppm)	γεωθερμικό πεδίο
Na <sup>+</sup>	15831.0	Πικρολίμνη Κιλκίς
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4636.0	Πικρολίμνη Κιλκίς
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1110.0	Πικρολίμνη Κιλκίς
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.5	Πικρολίμνη Κιλκίς
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	158.0	Πικρολίμνη Κιλκίς
K <sup>+</sup>	710.0	Νίσυρος
Ca <sup>2+</sup>	1500.0	Νίσυρος
Mn <sup>2+</sup>	4.0	Νίσυρος
Mg <sup>2+</sup>	1281.0	Μέθανα Πειραιώς
Cl <sup>-</sup>	20352.0	Μέθανα Πειραιώς
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2490.0	Μέθανα Πειραιώς
Br <sup>-</sup>	57.0	Μέθανα Πειραιώς
I <sup>-</sup>	0.2	Μέθανα Πειραιώς
Fe <sup>2+</sup>	1.5	Κόκκινο Νερό Λάρισσας
Al <sup>3+</sup>	4.4	Κόλπος Γέρας Μυτιλήνης
Zn <sup>2+</sup>	0.4	Νιγρίτα Σερρών
Li <sup>+</sup>	7.0	Πολύχνητος Λέσβου
Sr <sup>2+</sup>	27.5	Λισβοχώρι Λέσβου
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	16.0	Θέρμα Εβρου
HS <sup>-</sup>	3.0	Αηδονοχώρι Καρδίτσας
F <sup>-</sup>	9.5	Νέα Απολλωνία Θεσ/νίκης
Pb <sup>2+</sup>	<0.5	
Cd <sup>2+</sup>	<0.5	

Πίνακας 5. Σύσταση αέριας φάσης αντιπροσωπευτικών γεωθερμικών ρευστών από πεδία υψηλής ενθαλπίας (σε ppm).

	Larderello [7]	M. Amiata [7]	Cerro Prieto [15]	Warakei [6]	Hawaii [2]	Geysers [6]
CO <sub>2</sub>	58117	67285	14000	1465	1151	3260
H <sub>2</sub> S	610	214	1500	40	910	222
CH <sub>4</sub>	269	752	-	4.4	-	194
H <sub>2</sub>	40	14	-	1.0	12	56
N <sub>2</sub>	338	268	-	4.6	134	52

Πίνακας 6. Σύσταση υγρής φάσης αντιπροσωπευτικών γεωθερμικών ρευστών από πεδία υψηλής ενθαλπίας (σε ppm).

	Larderello [7]	Salton Sea* [14]	Hawai [2]	Geysers [10]	Cerro Prieto [15]
B	160	350	4.3	620	-
Li	-	211	1.1	4.4	29
Na	3.4	52000	4927	1190	10375
K	0.02	14000	756	23	3042
Mg	0.05	106	0.26	55	0.5
Ca	1.6	24000	358	20	416
Cl	4.3	145000	8968	644	21300
Br	-	-	44	1.6	-
As	0.05	11	0.09	-	-
Hg	-	-	< 0.05	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	21.2	84	24	598	-
SiO <sub>2</sub>	3.9	-	-	42	1050
Pb	-	100	< 0.01	-	-
Zn	-	660	0.02	-	0.5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	140	18.5	3290	5.9
Fe	0.2	2300	< 0.01	48	-
NH <sub>3</sub>	149.6	-	0.01	464	-
TDS	107.1	240000	15800	5000	36220

\* Ακόμη ~ 2140 ppm (Ba, Mn, Sr, Ni, Cu)

Ο Πίνακας 5 περιλαμβάνει συστάσεις της αέριας φάσης από γνωστά γεωθερμικά πεδία σε διάφορα σημεία της γης. Φαίνεται ότι σε ορισμένα (π.χ. Cerro Prieto) η συγκέντρωση H<sub>2</sub>S στον ατμό είναι σημαντική. Εν τούτοις απ' όλα τα πεδία του Πίνακα 5 μόνο στις μονάδες της περιοχής των Geysers λειτουργούν συστήματα δέσμησης του H<sub>2</sub>S [14]. Σημειώνεται ότι στο γεωθερμικό ατμό της Μήλου (μονάδα 2 MW) είχε μετρηθεί, απ' την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου μας, συγκέντρωση H<sub>2</sub>S περίπου 500 ppm. Η λειτουργία της μονάδας 2 MW έχει διακοπεί από τις αντιδράσεις των κατοίκων της Μήλου, μεταξύ άλλων και λόγω της οσμής του H<sub>2</sub>S. Στο Larderello όπου λειτουργούν μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος πάνω από 100 MW για αρκετές δεκαετίες, η συγκέντρωση H<sub>2</sub>S φαίνεται ότι είναι ~600 ppm. Οπωσδήποτε, με βάση τα σημερινά δεδομένα, προβλέπεται να τοποθετηθούν συστήματα δέσμησης του H<sub>2</sub>S σε όλες σχεδόν τις μονάδες με αξιόλογα ποσοστά υδροθείου στον ατμό.

Υπάρχουν ήδη αρκετές διαθέσιμες μέθοδοι για δέσμηση του H<sub>2</sub>S [1, 5, 6] που δεν είναι δυνατόν να παρουσιασθούν εδώ. Διακρίνονται γενικά οι εξής κατηγορίες:

Μέθοδοι καθαρισμού των απαερίων από  $H_2S$  (π.χ. μέθοδος Stretford) και μέθοδος εξουδετέρωσης  $H_2S$  διαλελυμένου στο συμπύκνωμα ατμού. Εκτός απ' αυτές βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης νέες μέθοδοι για καθαρισμό του ατμού (εκλεκτική απορρόφηση  $H_2S$ ) με άλαλι [17] καθώς και μέθοδος διαχωρισμού των μη συμπυκνώσιμων αερίων ( $H_2S$  και  $CO_2$ ) απ' τον ατμό με τη βοήθεια ειδικών συμπυκνωτών άμεσης επαφής [18]. Γενικά με τις διαθέσιμες σήμερα μεθόδους είναι δυνατόν να δεσμευθεί το  $H_2S$  στον επιθυμητό βαθμό ώστε να ικανοποιηθούν οποιοσδήποτε προδιαγραφές ποιότητας απαερίων. Κριτήρια οικονομικότητας και λειτουργικότητας χρησιμοποιούνται για την επιλογή του βέλτιστου συστήματος δέμευσης.

### Άλμη

Αρκετά μεγάλες διαφορές παρατηρούνται στη σύσταση των υγρών που διαχωρίζονται απ' τον ατμό. Στον Πίνακα 6 δίδονται ενδεικτικά συστάσεις από γνωστά πεδία. Τα δεδομένα από Larderello και Geysers αφορούν πεδία όπου επικρατεί ο ατμός. Στο πεδίο του Salton Sea γίνεται εντατική εκμετάλλευση παρά το ότι τα ρευστά είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένα με άλατα. Απ' τα πεδία που αντιπροσωπεύονται στον Πίνακα 6 προέρχεται πάνω απ' το 60% της παγκοσμίως παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία. Συγκρινόμενες οι συστάσεις των ρευστών αυτών με τις αντίστοιχες των ελληνικών πεδίων Μήλου και Νισύρου (Πίνακας 7) διαπιστώνεται ότι:

- Τα ρευστά Μήλου και Νισύρου δεν παρουσιάζουν τίποτε το ιδιαίτερο ή ενοχλητικό, ιδιαίτερα καθόσον αφορά την περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα, As, B.
- Η αλατότητα των ρευστών Μήλου-Νισύρου είναι αρκετά μικρότερη έναντι αυτής του Salton Sea.
- Η θερμοκρασία και πίεση των ελληνικών ταμειτηρών είναι αρκετά υψηλές ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν με ικανοποιητικούς βαθμούς απόδοσης.

Για λόγους που προαναφέρθηκαν η επανέγχυση (re-injection) της άλμης τείνει να επικρατήσει διεθνώς ως η πιό πρόσφορη μέθοδος ειδικά για τα ρευστά υψηλής ενθαλπίας. Λύσεις για τα τεχνικά προβλήματα που συνδέονται με την επανέγχυση (επικαθήσεις σε σωληνώσεις, συμπεριφορά ταμειτήρα κλπ) είναι πλέον στο στάδιο της εφαρμογής, ενώ παράλληλα υπάρχει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα για ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων.

### Καθίζηση και Διέγερση Σεισμικότητας

Έχει παρατηρηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις [14] ότι η εντατική εκμετάλλευση ταμειτηρών πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού συνοδεύεται από σχετικά περιορισμένης κλίμακας καθιζήσεις του εδάφους. Τα φαινόμενα αυτά δεν έχουν κατανοηθεί επαρκώς, φαίνεται όμως ότι σχετίζονται με τη φύση των πετρωμάτων και το πορώδες του ταμειτήρα.

Σχετικά με τα γεωθερμικά πεδία έχει συζητηθεί αρκετά στη βιβλιογραφία [3, 6, 20] η περίπτωση του πεδίου στο Wairakei της Ν. Ζηλανδίας όπου έχει παρατηρηθεί κατακόρυφη υποχώρηση εδαφών τα τελευταία τριάντα χρόνια κατά περίπου 6 μέτρα. Σε άλλα όμως σημεία του πλανήτη, που γίνεται μάλιστα εντατικότερη εκμετάλλευση όπως στα Geysers, Cerro Prieto, και Ιταλία (Monte Amiata, Larderello), οι καθιζήσεις είναι πολύ περιορισμένες έως ασήμαντες [6].

Ο Swanberg [20] τονίζει σχετικά ότι θα πρέπει να γίνεται προσεκτική εκτίμηση της "φυσικής" υποχώρησης εδαφών, η οποία πολλές φορές παρατηρείται ανεξάρτητα από γεωθερμική εκμετάλλευση, όπως στο Imperial Valley στη Ν. Καλιφόρνια. Γενικά φαίνεται ότι τα χαρακτηριστικά του ταμειτήρα (πορώδες, συμπίεστικότητα κ.λ.π.) είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση καθιζήσεων. Το πρόβλημα δεν παρατηρείται σε ταμειτήρες που κυριαρχούν ασβεστολιθικά πετρώματα και ψαμμίτες. Πέραν αυτού, η επανέγχυση των ρευστών προτείνεται ως ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος για να διατηρηθούν υψηλές πιέσεις στον ταμειτήρα και να μειωθούν οι πιθανότητες "υποχώρησης".

Τα ελληνικά γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας (Μήλου, Νισύρου) βρίσκονται πάνω στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (Κυκλάδων). Οι ταμειτήρες θεωρείται [11, 21] ότι έχουν διαμορφωθεί από ρηγματωμένα (fractured) ηφαιστειογενή πετρώματα και δεν φαίνεται να διαθέτουν πορώδες και συμπίεστικότητα ικανή για να προκαλέσει



Πίνακας 7. Σύσταση άλμης των γεωθερμικών πεδίων της Μήλου [13] και της Νισύρου [8]

Ανιόντα	Μήλος (ppm)	Νίσυρος (ppm)	Κατιόντα	Μήλος (ppm)	Νίσυρος (ppm)
Na <sup>+</sup>	31500	22000-28000	Cl <sup>-</sup>	64500	49000-63000
K <sup>+</sup>	9500	2200-2800	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	20	27- 29
Ca <sup>2+</sup>	4380	7000-10000	S <sup>2-</sup>	2.4	-
Mg <sup>2+</sup>	4	67-82	F <sup>-</sup>	3.9	1- 2
Fe <sup>2+</sup>	19.1	15			
Mn <sup>2+</sup>	29.5	128-162	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	25	-
Zn <sup>2+</sup>	3.3	1.5	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	280	-
Li <sup>+</sup>	81.2	-			
Sr <sup>2+</sup>	70.1	115-146			
Ba <sup>2+</sup>	37.2	29	χωρίς	Μήλος	Νίσυρος
Pb <sup>2+</sup>	1.8	-	φορτίο	(ppm)	(ppm)
Ni <sup>2+</sup>	1.1	<0.5	As	1.3	
Co <sup>2+</sup>	1.7	2.1	Sb	3.6	-
Cu <sup>2+</sup>	0.2	<0.2	B	125	47-56
Cr <sup>3+</sup>	0.1	-	SiO <sub>2</sub>	1000	820
Cd <sup>2+</sup>	0.2	0.3	CO <sub>2</sub>	280	-
Ag <sup>+</sup>	0.2	-			

αξιόλογη μετατόπιση εδάφους σε περίπτωση εκμετάλλευσης. Η προβλεπόμενη σ' αυτή την περίπτωση επανέγχυση των υγρών τείνει να εξαλείψει οποιαδήποτε τέτοια πιθανότητα.

Η πιθανότητα διέγερσης σεισμικότητας από γεωθερμικές εκμεταλλεύσεις έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία [6, 14, 20]. Σε κανένα όμως απ' τα λειτουργούντα γεωθερμικά πεδία δεν έχει παρατηρηθεί αύξηση της σεισμικότητας ή συσχετισμός της με την εντατική εκμετάλλευση. Η πιθανότητα διέγερσης σεισμικότητας ειδικά από την επαναδιοχέτευση υγρών έχει επίσης συζητηθεί [20]. Τονίζεται όμως ότι αφενός δεν έχει κάτι τέτοιο παρατηρηθεί σε γεωθερμικές εκμεταλλεύσεις [6] και αφετέρου η πρακτική της διοχέτευσης υγρών σε ταμιευτήρες εφαρμόζεται επί δεκαετίες σε χιλιάδες περιπτώσεις χωρίς να υπάρχει αξία λόγου, από στατιστική άποψη, σεισμική διέγερση.

#### 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΜΕΛΕΤΩΝ

Η μοντέρνα αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων πρέπει να έχει χαρακτήρα προληπτικό και όχι επανορθωτικό. Επομένως η μελέτη (αποφυγής) περιβαλλοντικών επιπτώσεων πρέπει να αποτελεί μέρος των μελετών αξιοποίησης ενός πεδίου. Ειδικά για γεωθερμικές εγκαταστάσεις προτείνεται η ακόλουθη μεθοδολογία, η οποία με μικρές παραλλαγές μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο για υψηλής όσο και για χαμηλής ενθαλπίας πεδία.

Η μελέτη του ταμιευτήρα προηγείται, για την οποία είναι απαραίτητες διερευνητικές γεωτρήσεις. Γεωλόγοι και άλλοι ειδικοί στους ταμιευτήρες απασχολούνται στην καθοριστική αυτή φάση, ώστε με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό γεωτρήσεων να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Εφόσον έχει

ολοκληρωθεί αυτή η φάση και υπάρχουν διαθέσιμες μία ή περισσότερες γεωτρήσεις που θα έχουν παραγωγικό χαρακτήρα μπορεί να προχωρήσει η επόμενη φάση.

(α) Μελέτη για πλήρη χαρακτηρισμό των ρευστών. Με συστηματικό πρόγραμμα δειγματοληψιών (σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας της γεώτρησης) και με λεπτομερείς αναλύσεις και επί τόπου μετρήσεις (P, T, παροχές) προσδιορίζονται η σύσταση της υγρής και αέριας φάσης καθώς και οι αντίστοιχες παροχές. Μέρος της μελέτης αυτής είναι και η αξιόπιστη εκτίμηση της δυναμικότητας του πεδίου. Η μεγάλη σημασία της φάσης αυτής είναι περιττό να τονισθεί.

(β) Τεχνικο-οικονομική μελέτη αξιοποίησης ρευστών. Η μελέτη αυτή είναι δυνατόν να υποδιαιρεθεί σε διαδοχικές φάσεις με αυξανόμενο βαθμό ακρίβειας, όπως συνήθως γίνεται σε μελέτες που πραγματοποιούνται εναλλακτικές λύσεις για την αξιοποίηση φυσικών πόρων. Η μελέτη πρέπει να είναι πλήρης και να περιλαμβάνει τα συστήματα δέσμευσης ρύπων καθώς και πρόβλεψη διάθεσης όλων των αποβλήτων, περιλαμβανομένης και της επανέγχυσης. Ως γνωστόν πρέπει να υπάρχει λεπτομερής οικονομική αξιολόγηση για κάθε προτεινόμενη λύση ή σενάριο.

(γ) Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στη μελέτη αυτή πρέπει να γίνεται σύνθεση δεδομένων και αποτελεσμάτων από τις δύο προηγούμενες μελέτες με δεδομένα της περιοχής του γεωθερμικού πεδίου όπου θα γίνει και η εκμετάλλευση. Δεδομένα για το οικοσύστημα, τις κλιματολογικές συνθήκες, τις οικονομικές και βιομηχανικές δραστηριότητες (μεταξύ άλλων) θα χρειασθούν για να αξιολογηθούν οι πιθανές επιπτώσεις απ' τις μελετώμενες νέες δραστηριότητες. Στη μελέτη θα πρέπει να περιληφθούν μέτρα για αποφυγή υποβάθμισης του περιβάλλοντος αλλά και προτάσεις για αναβάθμιση της περιοχής σχετιζόμενες με τη γεωθερμική εκμετάλλευση (π.χ. αξιοθέατα, εγκαταστάσεις ψυχαγωγίας επισκεπτών κλπ). Τέτοιες εγκαταστάσεις ιδιαίτερα φιλικές προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον γενικά λειτουργούν στα περισσότερα γεωθερμικά πεδία, όπως της Ισλανδίας, Ιταλίας (Larderello, Travale, κλπ), ΗΠΑ (Geysers), Ν. Ζηλανδίας και αλλού.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι για την εκμετάλλευση της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας σε ευρεία κλίμακα δεν υπάρχει κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα από περιβαλλοντική άποψη. Για τη γεωθερμία υψηλής ενθαλπίας υπάρχει διαθέσιμη ήδη (και στην Ελλάδα) σημαντική εμπειρία ώστε να εκπονούνται αξιόπιστες μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Υπάρχουν επίσης τεχνολογικές μέθοδοι κατάλληλες ώστε οι αντίστοιχες εγκαταστάσεις να λειτουργούν μέσα σε ασφαλή και αποδεκτά όρια.

## 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Allen, G.W. and McCluer, H.K., 1975, "Abatement of H<sub>2</sub>S Emissions from The Geysers Geothermal Power Plant", Proceedings of 2nd Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Fransisco, pp. 1313-1315.
2. Ανώνυμος, 1985, "Chemistry, Scale and Performance of the Hawaii Geothermal Project-A Plant", EPRI Final Report, EPRI AP-4342, December 1985.
3. Axtmann, R.C., 1975, "Environmental Impact of a Geothermal Power Plant", *Science*, 187, pp. 795-803.
4. Boisdet, A., Cautru, J.P. Czernichowski-Lauriol, I., Foucher, J.C., Fouillac, C., Honegger, J.L. and Martin, J.C., 1989, "Experiments on Reinjection of Geothermal Brines in the Deep Triassic Sandstones", *European Geothermal Update* (Ed's K. Louwrier, E. Staroste, J.D. Garnish and V. Karkoulias), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 419-428.
5. Corsi, R., 1989, "Geothermal Energy and the Environment - International Practice", Πρακτικά, Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογών Γεωθερμίας, υπό την αιγίδα της ΕΟΚ (DG XVII) και ΥΒΕΤ, Θεσ/νίκη, Οκτώβριος 1989, σελ. 375-386.

6. Crittenden, M.D., 1981, "Environmental Aspects of Geothermal Development", in *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*, (Ed's L. Rybach and L.J.P. Muffler), John Wiley & Sons Ltd, N. York, pp. 199-217.
7. Culivicchi, G., Palmerini, C.G. and Scolari, V., 1985, "Behaviour of Materials in Geothermal Environments", *Geothermics*, 14 (1), pp. 73-90.
8. ΔΕΗ, Τομέας Γεωθερμίας/ΔΕΜΕ, 1992, Δεδομένα προς Α.Ι.Καράμπελα.
9. Einarsson, S.S., Vides, A. and Cuellar, G., 1975, "Disposal of Geothermal Waste Water by Reinjection", *Proceedings of 2nd Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, pp. 1349-1363.
10. Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J., 1977, "Chemistry and Geothermal Systems", Academic Press, N. York.
11. Fytikas, M. and Marinelli, G., 1976, "Volcanology and petrology of volcanic products from the island of Milos and neighbouring islets", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 28, pp. 297-317.
12. Gudmundsson, J.S. and Palmason, G., 1981, "World Survey of Low-Temperature Geothermal Energy Utilization", Orkustofnun, National Energy Authority of Iceland (Geothermal Division), Reykjavik, Report OS 81005/JH D02.
13. Karabelas, A.J., Andritsos, N., Mouza, A., Mitrakas, M., Vrouzi, F. and Christanis, K., 1989, "Characteristics of Scales from the Milos Geothermal Plant", *Geothermics*, 18, No 1/2, pp. 169-174.
14. Katz, G., 1981, "Environmental Control Technology Development for Geothermal Energy", *Journal W.P.C.F.*, 53 (10), pp. 1447-1451.
15. Mercado, S.M., Bermejo, F.J. and Fernandez, H., 1987, "Development of Geothermal Energy in Mexico - Part Fourteen. Environmental Aspects of Geothermal Systems", *Heat Resources Systems & C.H.P.*, 2 (4), pp. 365-374.
16. Μητράκας, Μ. και συνεργάτες, 1989, "Αναλύσεις Ιαματικών Πηγών", Σύνδεσμος Δήμων και Κοινοτήτων Ιαματικών Πηγών και Λουτροπόλεων Ελλάδας, Θεσσαλονίκη.
17. Μποντόζογλου, Β. και Καράμπελας, Α.Ι., 1991, "Εκλεκτική απορρόφηση από μίγμα όξινων αερίων", *Πρακτικά*, 2ο Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος (Λέσβος), Σεπτέμβριος 1991.
18. Μποντόζογλου, Β., Βουδούρης, Β. και Καράμπελας, Α.Ι., 1992, "Καθαρισμός Γεωθερμικού Ατμού από H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub> με συμπυκνωτή άμεσης επαφής", *Πρακτικά*, 4ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Ξάνθη, Οκτώβριος 1992.
19. Νομοθεσία. Αποφάσεις Ε.Ο.Κ. 75/440, 76/161, 78/659. Φ.Ε.Κ. 53/β, 20.2.86, 197/β 11.11.87, 196/β 6.4.88, 135/α 28.7.87, 92/α 18.3.88. Υπουργική απόφαση 46329/1352 27.2.86. Διεύθυνση Υπουργείου Χωροταξίας, Οικισμού και Περιβάλλοντος, Ν. Θεσ/νίκης.
20. Swanberg, C.A., 1975, "Physical Aspects of Pollution Related to Geothermal Energy Development", *Proceedings of 2nd Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, pp. 1435-1443.
21. Wohlenberg, J., 1989, "Testing Geophysical Exploration Techniques on the Island of Milos, Greece", *European Geothermal Update* (Ed's K. Louwrier, E. Staroste, J.D. Garnish and V. Karkoulis), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 452-463.