

Μορφές των διαπειρών σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές του ιξώδους των υλικών, μία πειραματική προσέγγιση

Δ. ΤΟΥΡΝΑΣ¹, Δ. ΣΟΚΟΥΤΗΣ^{1*}, Σ. ΠΑΥΛΙΔΗΣ¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση του ιξώδους των υλικών στη μορφολογία των διάπειρων. Τα διάπειρα αποτελούν συγκεντρώσεις σημαντικών κοιτασμάτων αλατιού, ποτάσας, γύψου, θείου, μπορεί να φιλοξενούν φυσικό αέριο και πετρέλαιο, ενώ επίσης μπορούν να ερμηνεύουν άνοδο μάγματος στο γήινο φλοιό, διάπειρα ιλύος σε επιφανειακά ιζήματα κ.α. Για να μελετηθεί η ρεολογία των διάπειρων πραγματοποιήθηκε πείραμα που είχε σαν στόχο να απεικονίσει με εποπτικό τρόπο την εξέλιξη των δομών αυτών και να επαληθεύσει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές μεθόδους. Στο πείραμα απεικονίζονται διαδοχικά εξελικτικά στάδια απλών μορφών διαπειρών. Από την σύγκριση του πειραματικού μοντέλου με τα μοντέλα που στηρίζονται στις αριθμητικές μεθόδους διαπιστώνεται ότι υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση. Δίνεται επίσης η γραφική παράσταση χρόνου-βάθους για τρία διαφορετικά υλικά που συμμετείχαν στο πείραμα, η οποία αντικατοπτρίζει τις διαφορετικές ταχύτητες με τις οποίες εξελίσσεται το φαινόμενο (αντίστοιχος γεωλογικός χρόνος). Σαν κύριους παράγοντες για την διαμόρφωση των μορφών και σχημάτων των διάπειρων στο πείραμα μπορούμε να αναφέρουμε τους: Αρχικές μικρές ανωμαλίες στη γεωμετρία ή στις ιδιότητες των υλικών των αρχικών στρωμάτων, η σπειροειδής κυκλοφορία, η παράμετρος m , οι διαφορετικές τιμές των πυκνοτήτων και τέλος το πάχος του στρώματος επικάλυψης (SGM-36 ολικόνης) σε σχέση με το αρχικό στρώμα

ABSTRACT

In the framework of this paper the shape and the rheology of diapirs (plume type) have been studied experimentally, in relation to viscosity, density contrast and time. Viscosity plays an important role on the shape of a diapir. Our experiments have been carried out in a tank of 24 x 15,5 x 15,3 cm in size, filled with SGM-36 (a transparent polymer of the PDMS-polymer group), with viscosity $\mu = 5 \cdot 10^4$ Pa.s and density $\rho = 0,97$ grr/cm³ respectively. Three different fluids have been used in order to study the different geometrical shapes of experimental diapirs; that is honey ($\mu = 1,1 \cdot 10$ Pa.s and $\rho = 1,65$ gr/cm³), pink silicone known as Rhodorsil Gomme, produced from Rhone Poulenc France ($\mu = 3 \cdot 10^4$ Pa.s ; $\rho = 1,08$ gr/cm³) and black silicone ($\mu = 1,2 \cdot 10^3$ Pa.s ; $\rho = 1,1$ gr/cm³). The evolution of the simple shape stages of diapirs are presented. When the material representing the diapir has a viscosity greater than its surrounding, it rises as a finger, whereas it rises in a mushroom shape, with a distinct head and tail, when its viscosity is lower than its surrounding. The evolution and the shape of plume-diapirs have also compared with numerical models. Main factors which affect the shape of diapirs are; pre-existing geometrical anomalies, the surrounding material, its depth, density and parameter m (viscosity of surrounding material / viscosity of the plume material), cover silicone layer and internal circulation.

Shapes of diapirs in relation to viscosity contrast, an experimental approach.

Tournas, D., Sokoutis, D., Pavlides, S., Dept of Geology, AUTH, Thessaloniki, Greece.

¹ Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας Α.Π.Θ., 541 24 Θεσσαλονίκη

* now at Vrije University, Amsterdam, The Netherlands.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το φαινόμενο του διαπείριου. Ειδικότερα γίνεται μελέτη για τις μορφές που παίρνουν τα διάπείρα, ανάλογα με τις διαφορετικές τιμές του ιξώδους και της πυκνότητας που έχουν τα υλικά, από τα οποία απαρτίζονται. Οι διαδικασίες της παραμόρφωσης και της ροής είναι ευρέως διαδεδομένες στο εσωτερικό της Γης.

Στο πειραματικό μέρος αρχικά περιγράφεται η πειραματική διάταξη του πειράματος και αναφέρονται οι ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν σε αυτό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος με βάση τις φωτογραφίες που λαμβάνονταν κατά την διάρκεια του. Σε αυτό το τμήμα απλώς περιγράφονται οι μορφές που έχουν πάρει τα διάπείρα, χωρίς να γίνεται επιπλέον ανάλυση. Στην τελευταία ενότητα αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα και την μορφή που παίρνουν τα διάπείρα κατά την εξέλιξη του πειράματος.

Η κατανόηση της Ρεολογίας είναι προϋπόθεση για την ποσοτική ανάλυση των γεωλογικών και γεωφυσικών φαινομένων. Ρεολογία είναι ο κλάδος της Φυσικής που ασχολείται με την παραμόρφωση και ροή των υλικών (σχέσεις μεταξύ τάσης, παραμόρφωσης και χρόνου). Τα υλικά που συνιστούν την Γη μπορούν να διακριθούν με βάση την ατομική τους δομή σε: α) κρυσταλλικά στερεά, τα οποία παρουσιάζουν μία τάξη στη διάταξη των ατόμων στο χώρο και β) στα ρευστά στα οποία απουσιάζει η τάξη. Στα ρευστά εκτός από το νερό συμπεριλαμβάνεται ο εξωτερικός πυρήνας της Γης και τα μάγματα (Ranalli 1987). Ωστόσο η Γη περιλαμβάνει στο σύνολο της πολυκρυσταλλικά συσσωματώματα ποικίλης σύστασης και διαφορετικών ιδιοτήτων.

Από φυσική άποψη τα υλικά αυτά είναι συνεχή σώματα και υπόκεινται σε κινήσεις, όταν τα διαφορετικά τμήματα τους αλλάζουν τις σχετικές τους θέσεις. Τέτοιες σχετικές μεταβολές έχουν ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση και την ροή της ύλης.

Στη Ρεολογία ένα υλικό είναι ρευστό ανεξάρ-

τητα από την ατομική του δομή, όταν ρέει υπό την επίδραση σταθερής διατμητικής τάσης. Η Γη παρουσιάζει μία μεγάλη ποικιλία ρεολογικής συμπεριφοράς γιατί τα διάφορα υλικά συμπεριφέρονται διαφορετικά στην δύναμη που εξασκείται σε αυτά (τάση), αλλά και συγχρόνως γιατί η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται και από άλλους συντελεστές, όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η διάρκεια της φόρτισης και ο χρόνος (Ranalli 1987).

Στην μελέτη της Ρεολογίας υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις: α) Η Μηχανική των συνεχών μέσων όπου οι ρεολογικές ιδιότητες των υλικών περιγράφονται φαινομενικά, χωρίς τυπική αναφορά στις ατομικές διαδικασίες οι οποίες ελέγχουν την μακροσκοπική συμπεριφορά, β) η Φυσική της στερεάς κατάστασης όπου η προσοχή επικεντρώνεται στις ιδιότητες των ατόμων του υλικού και πως αυτές επηρεάζουν την φαινομενική συμπεριφορά.

Οι δυνάμεις που δρουν σε ένα πέτρωμα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: εξωτερικές και εσωτερικές δυνάμεις. Οι εξωτερικές δυνάμεις δρουν πάνω στο σώμα και ευνοούν την ανάπτυξη αντίθετων δυνάμεων, από το σώμα προς τα έξω που ονομάζονται εσωτερικές δυνάμεις. Έτσι δημιουργείται ένα πεδίο τάσεων μέσα στο σώμα που προκλήθηκε από την δράση των εξωτερικών δυνάμεων, με τελικό αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σώματος. Οι εξωτερικές δυνάμεις διακρίνονται σε επιφανειακές δυνάμεις και δυνάμεις μάζας. Οι επιφανειακές δρουν στην εξωτερική επιφάνεια του σώματος και οι δυνάμεις μάζας δρουν στη μάζα του σώματος και είναι ανάλογες αυτής, όπως η δύναμη της βαρύτητας.

Η τάση ορίζεται ως ο λόγος της δύναμης η οποία ασκείται πάνω σε μία επιφάνεια, προς την επιφάνεια αυτή. Συνέπεια των τάσεων που ασκούνται σε ένα σημείο του σώματος είναι η παραμόρφωση του υλικού του σώματος που βρίσκεται κοντά στο σημείο. Αυτή η παραμόρφωση μπορεί να οφείλεται σε: α) μεταβολή του όγκου του στοιχείου του σώματος που περιβάλλει το σημείο, β) σε μεταβολή του σχήματος του στοιχείου αυτού και γ) σε περιστροφή του στοιχείου.

Υπάρχουν τρεις ακραίες κατηγορίες παραμόρφωσης των πετρωμάτων όσο αφορά την ρεολογική τους συμπεριφορά, η ελαστική, η πλαστική και η ιξώδης. Ωστόσο υπάρχουν και ενδιάμεσοι τύποι παραμόρφωσης που είναι μάλιστα και οι πιο διαδεδομένοι στη φύση. Η ελαστικο-πλαστική, η ελαστικο-ιξώδης και η πλαστικο-ιξώδης παραμόρφωση.

Ελαστική συμπεριφορά παρουσιάζουν τα πετρώματα όταν επανακτούν το αρχικό τους σχήμα μετά την κατάργηση της τάσης, δηλαδή η παραμόρφωση που προκαλεί η τάση είναι προσωρινή. Αν θεωρήσουμε ότι το πέτρωμα είναι ομογενές και ισότροπο τότε ισχύει ο νόμος του Hooke σύμφωνα με τον οποίο η παραμόρφωση ϵ είναι ανάλογη της κάθετης τάσης σ_{\perp} που εφαρμόζεται στο πέτρωμα. Δηλαδή ισχύει:

$$\sigma_{\perp} = Y \epsilon \text{ όπου } Y \text{ το μέτρο του Young}$$

Για την διατμητική τάση τ ισχύει:

$\tau = G \gamma$ όπου G το μέτρο δυσκαμψίας του πετρώματος και γ η παραμόρφωση λόγω διάτμησης. Το Y και το G προσδιορίζονται πειραματικά.

Κατά την πλαστική συμπεριφορά τα πετρώματα δεν επανακτούν το αρχικό τους σχήμα μετά την κατάργηση της εφαρμοσμένης τάσης. Η πλαστική παραμόρφωση ακολουθεί την ελαστική και παρουσιάζεται στα πετρώματα που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη του φλοιού της Γης, όπου και επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Αντίθετα στα ανώτερα στρώματα του φλοιού τα πετρώματα παραμορφώνονται ελαστικά και θραύονται όταν η τιμή της εφαρμοσμένης τάσης υπερβεί το όριο αντοχής τους.

Ιξώδης ονομάζεται η συμπεριφορά που προσομοιάζει τις ιδιότητες των ρευστών. Τα ρευστά ανάλογα με την ιξώδη συμπεριφορά τους διακρίνονται σε Νευτώνια και μη-Νευτώνια. Τα ρευστά που παρουσιάζουν ιξώδη συμπεριφορά εκφράζονται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\dot{\gamma} = 2 \dot{\epsilon} = C \tau^n, \quad \eta = \frac{\tau}{2 \dot{\epsilon}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

όπου: $\dot{\gamma}$ ο μηχανικός ρυθμός παραμόρφωσης, $\dot{\epsilon}$ ο φυσικός ρυθμός παραμόρφωσης, τ η ιξώδης τάση, η το ενεργό ιξώδες και C σταθερά, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης, θερμοκρασί-

ας αλλά και από άλλους παράγοντες. Όταν ισχύει η συνθήκη: $\eta = 1$, τότε το ρευστό είναι Νευτώνιο. Πετρώματα και ορυκτά σε στερεή κατάσταση που παραμορφώθηκαν στο εργαστήριο, έδειξαν ότι οι τιμές του η κυμαίνονται μεταξύ 1-10 (Tullis 1979, Carier 1975, 1976, Kirby 1983).

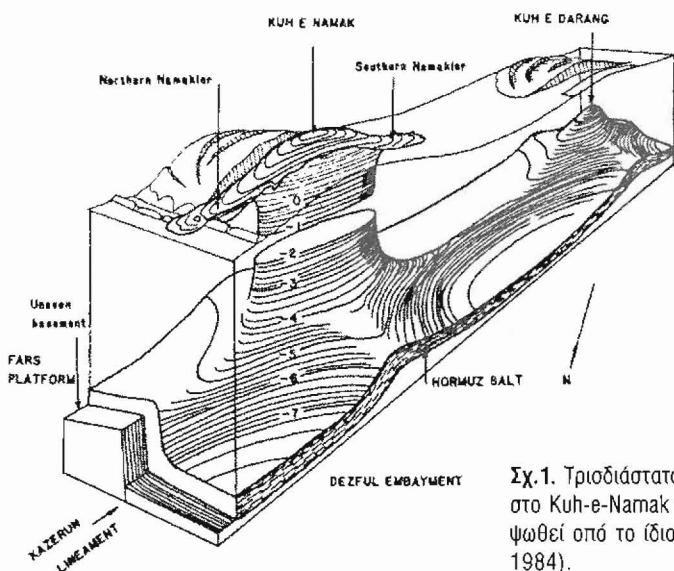
Ένα στερεό σώμα το οποίο παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από γραμμικές σχέσεις μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Πετρώματα και κρυσταλλικά στερεά παρουσιάζουν ελαστική παραμόρφωση σε χαμηλές θερμοκρασίες και μικρά βάθη στο φλοιό, για παραμορφώσεις μικρότερες από 1% όπως προκύπτει από μικρής χρονικής διάρκειας εργαστηριακά πειράματα.

Για το υλικό που έχει Νευτώνια συμπεριφορά ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Η σχέση που ισχύει είναι: $\sigma_s = \eta \dot{\epsilon}_s$. Το η ονομάζεται ιξώδες του ρευστού, προσδιορίζεται πειραματικά και εκφράζει την δυσκολία ροής του ρευστού. Η Νευτώνια συμπεριφορά είναι συνέπεια της παραμόρφωσης λόγω του ερπυσμού διάχυσης των ατόμων μέσα στο εσωτερικό των κρυσταλλικών κόκκων, όταν οι κόκκοι υπόκεινται σε τάση. Αυτή η συμπεριφορά ροής στα πετρώματα είναι συνήθης υπό συνθήκες χαμηλής τάσης και υψηλής θερμοκρασίας.

Για το υλικό που έχει μη Νευτώνια συμπεριφορά η σχέση τάσης με το ρυθμό παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική, αλλά ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξάνει πιο γρήγορα σε σχέση με την διατμητική τάση. Ισχύει η σχέση: $\dot{\epsilon}_s = A \sigma_s^n$

Ο συντελεστής A είναι συνάρτηση της πίεσης, θερμοκρασίας και άλλων συντελεστών.

Ο όρος *διάπειρο* (diapir) - που προέρχεται από το ελληνικό ρήμα διαπερνώ - έχει εισαχθεί από τον Mrazec (1915) για διεισδυτικό αλατούχα σώματα τα οποία αναπτύχθηκαν από στρώματα αλατιού μέσα στις κορυφές των αντικλίνων. Ο όρος χρησιμοποιήθηκε με γενικότερη έννοια για μάζες πετρωμάτων οποιασδήποτε κατηγορίας οι οποίες διαπερνούν μέσα από τα πετρώματα που τα επικαλύπτουν και σφηνώνονται μέσα σε αυτά. Η εξέλιξη της διεισδυσης αυτής των πετρωμάτων ονομάστηκε διαπειρισμός.

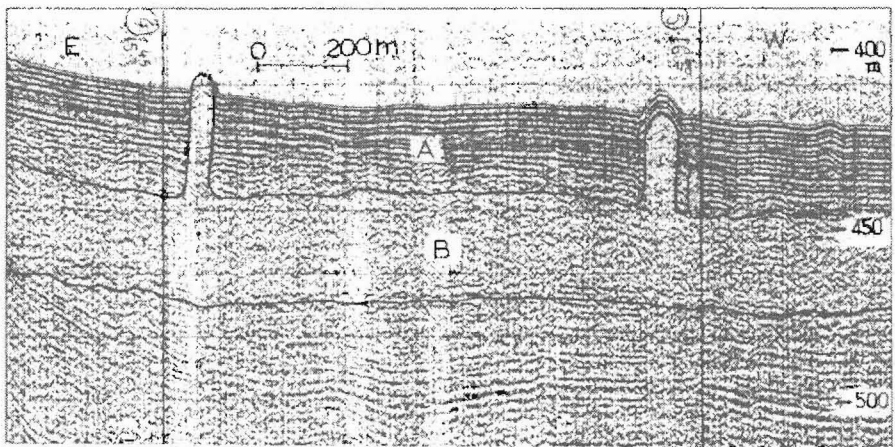


Σχ.1. Τριοδίαστατο σκίτσο των αλατούχων σωμώτων στο Kuh-e-Namak και Kuh-e-Darang που έχουν ανυψωθεί υπό το ίδιο στρώμα αλατιού (Talbot & Jarvis 1984).

Οι τύποι των πετρωμάτων που έχουν βρεθεί στα διάπαιρα είναι πολυάριθμοι και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων: αλάτι, γύψο, σερπεντίνη, αργιλικά και ανθρακικά πετρώματα καθώς επίσης και πετρώματα τα οποία κατά την διάρκεια της εξέλιξης του διαπαιρισμού βρίσκονταν μέσα σε μάγμα ή ήταν ήδη μεταμορφωμένα. Στα αλατούχα διάπαιρα της Βορειοδυτικής Ευρώπης, της Βόρειας Αμερικής και της Μέσης Ανατολής, έχει μελετηθεί η δομή τους αρκετά καλά εξαιτίας των σημαντικών οικονομικά κοιτασμάτων αλατιού, ποτάσας, γύψου, θείου, αερίου και πετρελαίου. Αντίστοιχα αλατούχα διάπαιρα που παρουσιάζονται στο Ιράν απεικονίζονται στο σχήμα 1. Τα διάπαιρα αυτά εκτός από την σημαντική οικονομική τους σημασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για περιβαλλοντικούς σκοπούς, αφού τα πυρηνικά απόβλητα είναι δυνατό να αποθηκευτούν σε αυτά. Οι δόμοι άλατος μπορούν να παγιδεύσουν τα παραπάνω προϊόντα στο ανώτατο μέρος τους, όταν βέβαια πάνω από αυτούς υπάρχει αδιαπέραστο κάλυμμα. Επίσης παγίδευση μπορεί να υπάρξει κατά μήκος των πλευρών του δόμου, κατά μήκος ρηγμάτων ακτινωτά διαταγμένων γύρω από αυτόν και σε ασυμφωνίες που δημιουργούνται κατά την ιζηματογένεση που

ακολουθεί μετά τον διαπαιρισμό. Στην Ελλάδα το φαινόμενο του διαπαιρισμού έχει εκδηλωθεί στο δυτικό τμήμα της όπου παρουσιάζονται κοιτάσματα εβαποριτών μεγάλου πάχους, που συχνά βρίσκονται και ενδιάμεσα στα νεώτερα στρώματα της Ιονίου ζώνης έχοντας ανέλθει διαπαιρικά με τις τεκτονικές κυρίως διεργασίες (Μουντράκης 1985; Νικολάου 1988; Karakitsos 1995; Velaj et al., 1999 κ.α.). Πρέπει να σημειωθεί τέλος ότι το πείραμα που έγινε μέσα στο πλαίσιο αυτής της εργασίας έχει περισσότερες ομοιότητες με την διαπαιρική άνοδο του μάγματος (βλέπε Condie 2001) και με άνοδο ιλύος σε πρόσφατα θαλάσσια ιζήματα (σχ. 2, Περισσράτης et al., 1998) παρά με αυτήν του ορυκτού άλατος.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία του διαπαιρισμού θα πρέπει να πληρούνται τρεις προϋποθέσεις. Αρχικά θα πρέπει να υπάρχει ένα στρώμα ή μία ζώνη μέσα στην οποία το υλικό να έχει μικρότερη πυκνότητα από αυτήν των πετρωμάτων που το επικαλύπτουν. Μία δεύτερη απαίτηση είναι ότι, θα πρέπει το υλικό με την χαμηλότερη πυκνότητα να έχει υψηλή πλαστικότητα δηλαδή να έχει την ικανότητα ροής. Τέλος είναι απαραίτητη μία διαταραχή της βαρυτικής αστάθειας για να προκαλέ-



Σχ.2. Φαινόμενα διαπειρισμού ιλύος σε πρόσφατα υποθαλάσσια ιζήματα (ανορθλώσεις τύπου A) ύψους 4 έως 18 m, νότια της Καλύμνου (Περισσράτης et al., 1998)

σει το ξεκίνημα της ροής. Η διαταραχή που μπορεί να είναι ένα τεκτονικό επεισόδιο ή μία άλλη διαδικασία όπως η διάβρωση, προξενεί διαφορές στην κατανομή της πίεσης των πετρωμάτων επικάλυψης. Έτσι ο διαπειρισμός θα “προτιμήσει” τις περιοχές όπου η πίεση του στρώματος επικάλυψης πάνω στο υλικό με την μικρότερη πυκνότητα είναι ελάχιστη. Η κινητήρια δύναμη του διαπειρισμού είναι η αντιστροφή της βαρύτητας. Επομένως ο διαπειρισμός είναι ένα είδος βαρυτικής τεκτονικής. Το ελαφρύτερο υλικό κινείται προς τα πάνω, ενώ το βαρύτερο γειτονικό κινείται προς τα κάτω.

ΑΡΧΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

Στην μελέτη των γεωλογικών δομών, έχουμε την δυνατότητα να παρατηρούμε και να εξετάζουμε μόνο την τελική δομή, χωρίς να έχουμε παράλληλα την ευκαιρία να μελετάμε την αρχική κατάσταση και να γνωρίζουμε την πραγματική εξέλιξη. Το γεγονός ότι η τελική εικόνα είναι αποσπασματική, λόγω της διάβρωσης που απομακρύνει σημαντικές αποδείξεις ή λόγω του βάθους που είναι θαμμένη η δομή, δεν μας διευκολύνει στη κατανόηση της εξέλιξης της. Η εξελικτική δομή του φλοιού (ενδιάμεσα στάδια) είναι ιδιαίτερα σημαντική και χρήσιμη, ενώ πολλές φορές δίνεται αυθαίρετα και με μεγάλες αβεβαιότητες. Αν θεωρη-

θούν τα πετρώματα σαν συνεχή μέσα κατά την μηχανική έννοια, τότε οι θεωρίες της δυναμικής των ρευστών και αντοχής των υλικών μπορούν να εφαρμοστούν στην προσπάθεια προσδιορισμού της εξέλιξης και παραμόρφωσης των πετρωμάτων. Η μηχανική τους συμπεριφορά δεν είναι καθόλου απλή και το γεγονός αυτό καθιστά την αυστηρή θεωρητική και δυναμική μεταχείριση, εξαιρετικά περίπλοκη για τις περισσότερες απλές δομές. Έτσι χρειάζεται πειραματισμός, με δυναμικά αναλογικά μοντέλα και εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων.

Για να είναι σωστά και ρεαλιστικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα πειράματα με αναλογικά μοντέλα, θα πρέπει τα μοντέλα να έχουν κλίμακα ανάλογη σε σχέση με τα φυσικά πρωτότυπα. Ένα δυναμικό αναλογικό μοντέλο υφίσταται όμοια εξελικτική ιστορία με το πρωτότυπο του, αν και σε μικρότερη κλίμακα και σε γρηγορότερο ρυθμό.

Τρεις είναι οι έννοιες της ομοιότητας για τα αναλογικά μοντέλα, η γεωμετρική, η κινηματική και τέλος η δυναμική (Hubbert 1937, Langhaar 1962, Ramberg 1967, 1981, Weijermars & Schmeling 1986).

Ένα μοντέλο είναι γεωμετρικά όμοιο με την αυθεντική δομή, όταν είναι ένα μειωμένο ή μεγεθυμένο γεωμετρικό αντίγραφο του πρωτότυπου. Ο λόγος μεταξύ των μηκών, μεταξύ δύο οποιονδήποτε

ποτε αντίστοιχων σημείων στο μοντέλο και στο πρωτότυπο είναι σταθερός. Ο λόγος αυτός καλείται λόγος του μήκους του μοντέλου και δίνεται από την σχέση:

$$\frac{l_m}{l_o} = l_r$$

Αντίστοιχα οι λόγοι του εμβαδού και του όγκου του μοντέλου δίνονται από τις σχέσεις:

$$\frac{A_m}{A_o} = l_r^2, \quad \frac{V_m}{V_o} = l_r^3$$

Ένα μοντέλο που προσομοιώνει τις κινήσεις που γίνονται μέσα στις αρχικές δομές είναι κινηματικό όμοιο με το αρχικό, αν τα αντίστοιχα μόρια βρίσκονται στα αντίστοιχα σημεία, σε αντίστοιχους χρόνους. Το μοντέλο παραμένει γεωμετρικά όμοιο με το αρχικό κατά την διάρκεια της εξέλιξης των δύο δομών, αρκεί τα εξελικτικά στάδια να είναι εφάμιλλα σε αντίστοιχους χρόνους. Ο λόγος μεταξύ της διάρκειας των χρόνων που χρειάζεται για την συμπλήρωση των αντίστοιχων κινήσεων στο μοντέλο και στο αρχικό, ονομάζεται λόγος του χρόνου του μοντέλου και δίνεται από την σχέση:

$\frac{t_m}{t_o} = t_r$ όπου t_o είναι ο χρόνος που χρειάζεται για ορισμένη κίνηση μέσα στο πρωτότυπο και t_m ο χρόνος που χρειάζεται για την αντίστοιχη κίνηση μέσα στο μοντέλο. Ο λόγος του χρόνου του μοντέλου είναι σταθερός για κινήσεις οποιαδήποτε μέσα στις δύο κινηματικά όμοιες δομές, διαφορετικά το μοντέλο παραμορφώνεται σε σχέση με το αρχικό και οι δύο δομές, παύουν να είναι γεωμετρικά όμοιες.

Γεωμετρικά και κινηματικά όμοιες δομές είναι δυναμικά όμοιες, αν ο λόγος μεταξύ των διαφόρων ειδών μηχανικών δυνάμεων (συγκρινόμενες είδος προς είδος) που ενεργούν σε οποιαδήποτε δύο αντίστοιχα μόρια στο αρχικό και στο μοντέλο, είναι σταθερός. Αν το σύμβολο F_r παριστάνει τον λόγο της δύναμης του μοντέλου, τότε θα ισχύει η σχέση:

$$F_r = \frac{F_{mg}}{F_{og}} = \frac{F_{m1}}{F_{o1}} = \frac{F_{mv}}{F_{ov}} = \frac{F_{me}}{F_{oe}} = \frac{F_{mf}}{F_{of}}$$

Όπου F είναι η δύναμη στα αντίστοιχα μόρια μέσα στο μοντέλο (m) και στο πρωτότυπο (o). Οι δείκτες g, l, v, e, f αναφέρονται στη βαρύτητα, στην αδράνεια, στο ιξώδες, στην ελαστικότητα και στην τριβή, αντίστοιχα.

Ένα μοντέλο το οποίο είναι γεωμετρικά όμοιο με το αρχικό στάδιο μιας φυσικής δομής αυθόρμητα εξελισσόμενης και επιπλέον ακολουθεί την παραπάνω σχέση, θα αναστυχθεί κατά ένα τρόπο ακριβώς όμοιο με αυτόν του αρχικού. Η μελέτη της εξέλιξης τέτοιων μοντέλων είναι πολύτιμη όπως η μελέτη της εξέλιξης της αρχικής δομής. Η παραπάνω κατάσταση ισχύει κάτω από την υπόθεση ότι μη-μηχανικές διεργασίες όπως χημικές αντιδράσεις, διάχυση, ροή θερμότητας και πυρηνικές διεργασίες δεν λαμβάνουν χώρα.

Επειδή ο λόγος της δύναμης του μοντέλου είναι σταθερός σε ένα δυναμικά όμοιο ζευγάρι μοντέλου-πρωτοτύπου, θα είναι σταθερός και ο λόγος της μάζας του μοντέλου για αντίστοιχο όγκο παντού μέσα στις δύο δομές. Είναι φανερό ότι ο λόγος της δύναμης αδράνειας ή της βαρύτητας ή άλλης δύναμης μάζας δεν θα είναι σταθερός παντού μέσα στις δύο δομές, εκτός αν ο λόγος της μάζας είναι σταθερός.

Η απαίτηση για σταθερό λόγο των μηχανικών δυνάμεων του μοντέλου, όταν συγκρίνονται είδος με είδος στο μοντέλο και στο πρωτότυπο, οδηγεί στην κατάσταση ότι ο λόγος μεταξύ δύο διαφορετικών δυνάμεων στο μοντέλο, πρέπει να είναι ίσος με τον λόγο μεταξύ των ίδιων δύο δυνάμεων στο πρωτότυπο.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Μια σειρά πειραμάτων για τη μελέτη της απλής κίνησης των διαπειρών πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Πειραματικής Τεκτονικής του τομέα Γεωλογίας - Φυσικής Γεωγραφίας του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Τα πειράματα αυτά έχουν σαν στόχο να απεικονίσουν με εποπτικό τρόπο την εξέλιξη των δομών αυτών και να επαληθεύσουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές μεθόδους. Για την όσο δυνατό καλύτερη προσομοίωση της φυσικής εξέλιξης του φαινομένου στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα υλικά

και εφαρμόστηκαν οι αρχές που πρέπει να πληρούν τα αναλογικά μοντέλα.

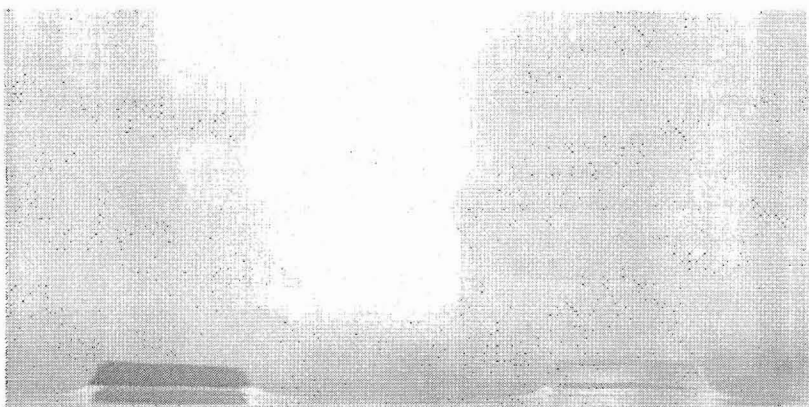
Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε διαφανές κουτί με διαστάσεις: 24 x 15,5 x 15,3 cm το οποίο πληρώθηκε με σιλικόνη. Η σιλικόνη αυτή είναι γνωστή με το όνομα PDMS (SGM-36), είναι διαφανής και οι τιμές της για το ιξώδες και την πυκνότητα είναι αντίστοιχα: 5 · 10⁴ Pa.s και 0,97 gr/cm³. Αυτή κατασκευάστηκε από την Dow Corning της Μεγάλης Βρετανίας (Weijermars 1986b). Στην ελεύθερη επιφάνεια της σιλικόνης αυτής δημιουργήθηκαν τρεις χώροι σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις: 5,5 x 1,3 x 1 cm. Οι δύο από αυτούς πληρώθηκαν με δύο διαφορετικές σιλικόνες, ενώ ο τρίτος χώρος με μέλι. Η σιλικόνη που κατείχε την μία θέση ονομάζεται Rhodorsil Gomme (RG) έχει ροζ χρώμα και το ιξώδες και η πυκνότητα της έχουν τιμή αντίστοιχα: 3 · 10⁴ Pa.s και 1,08 gr/cm³. Κατασκευάστηκε από το Rhone-

Roulenc στο Παρίσι (Weijermars 1986b, Treagus & Sokoutis 1991). Ενώ η άλλη σιλικόνη έχει μαύρο χρώμα και τιμές για τα παραπάνω μεγέθη: 1,2 · 10³ Pa.s και 1,1 gr/cm³ (Brun et al). Τέλος οι τιμές του ιξώδους και της πυκνότητας του μελιού που μετρήθηκαν στο εργαστήριο, ήταν αντίστοιχα: 1,1 · 10 Pa.s και 1,65 gr/cm³. Όλες οι τιμές του ιξώδους και της πυκνότητας των παραπάνω υλικών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 1.

Πίσω από το κουτί τοποθετήθηκε μιλιμετρέ χαρτί κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά την διάρκεια αλλά και μετά το πέρας του πειράματος να είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας με την οποία λαμβάνει χώρα η εξέλιξη του φαινομένου. Είναι γνωστό ότι η κύρια κινητήρια δύναμη κατά το φαινόμενο του διαπειρισμού είναι η άνωση, που βοηθάει την κίνηση προς τα πάνω των σωμάτων που έχουν χαμηλή πυκνότητα και περιβάλλονται από άλλα με μεγαλύτερη πυκνότητα. Στο πείραμα

Πίνακας 1. Τιμές της πυκνότητας και του ιξώδους των υλικών που συμμετείχαν στο πείραμα.

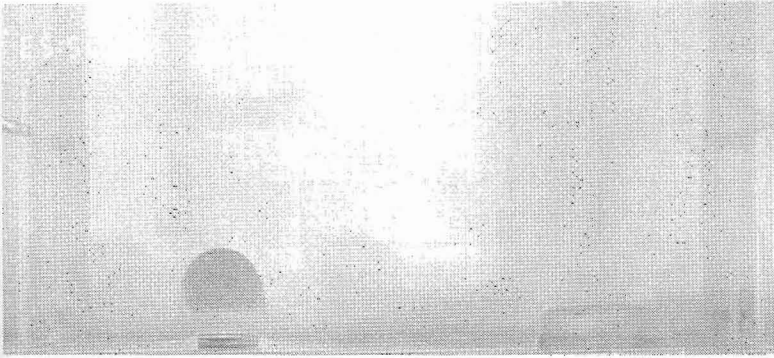
ΥΛΙΚΑ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (gr/cm ³)	ΙΞΩΔΕΣ (Pa.s)
Διαφανής σιλικόνη [PDMS (SGM-36)]	0,97	5·10 ⁴
Ροζ σιλικόνη [Rhodorsil Gomme (RG)]	1,08	3·10 ⁴
Μαύρη σιλικόνη	1,1	1,2·10 ³
Μέλι	1,65	1,1·10



Φωτογραφία 1 (22 14:20)

Μέλι: Το πείραμα μόλις έχει ξεκινήσει. Το μέλι έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, δηλαδή το αρχικό σχήμο που του δόθηκε για τις ανάγκες του πειράματος.

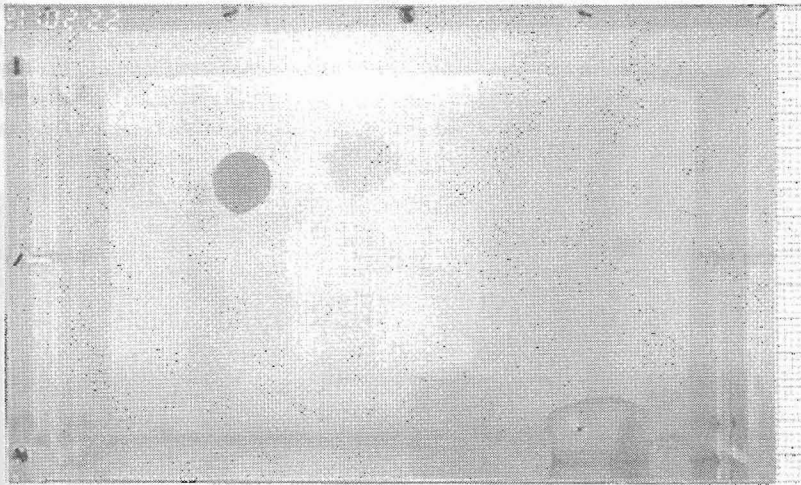
Ροζ Σιλικόνη: Το ίδιο ισχύει και για την ροζ σιλικόνη, η οποία δεν έχει υποστεί ακόμα παραμόρφωση.



Φωτογραφία 2 (22 15:53)

Μέλι: Έχει σχεδόν αποκολληθεί από την βόση του με την οποία συνδέεται με μία λεπτή ουρά, η οποία δεν φαίνεται στην φωτογραφία. Τα μπροστινό τμήμα του αρχίζει και παίρνει κυκλική μορφή.

Ροζ Σιλικόνη: Βυθίζεται λόγω βαρύτητας μέσω στην πιο αραή διαφανή σιλικόνη SGM-36, χωρίς ωστόσο να μεταβληθεί έντονα το σχήμα της.



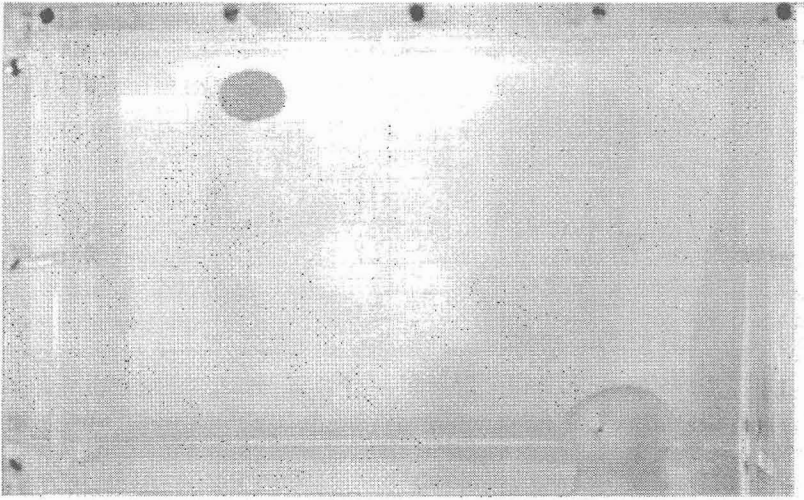
Φωτογραφία 3 (22 20:12)

Μέλι: Το σχήμα του μαιάζει αρκετά πλέον με την σφαίρα.

Ροζ Σιλικόνη: Το μπροστινό τμήμα της σιλικόνης έχει πάρει μια έντονο καμπύλο σχήμο.

για λόγους πρακτικούς και ευκολίας τοποθετήθηκαν τα υλικά με τέτοια διάταξη, ώστε τα υλικά με τη μεγαλύτερη πυκνότητα να κινούνται προς τα κάτω λόγω βαρύτητας σε σχέση με τα λιγότερο πυκνή διαφανής σιλικόνη (SGM-36). Πρέπει να σημειωθεί ότι με αυτή τη συγκεκριμένη διάταξη δεν αλλάζει τίποτα και δεν δημιουργείται σφάλμα σε

σχέση με την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου. Κατά την διάρκεια του πειράματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνονταν φωτογραφίες για να αποτυπώσουν τις μορφές των διαπειρών και την εξέλιξη αυτών και για να βοηθήσουν στον υπολογισμό της εκάστοτε ταχύτητας για τα διάφορα υλικά κατά την εξέλιξη του φαινομένου. Οι αποστά-



Φωτογραφία 4 (22 22:13)

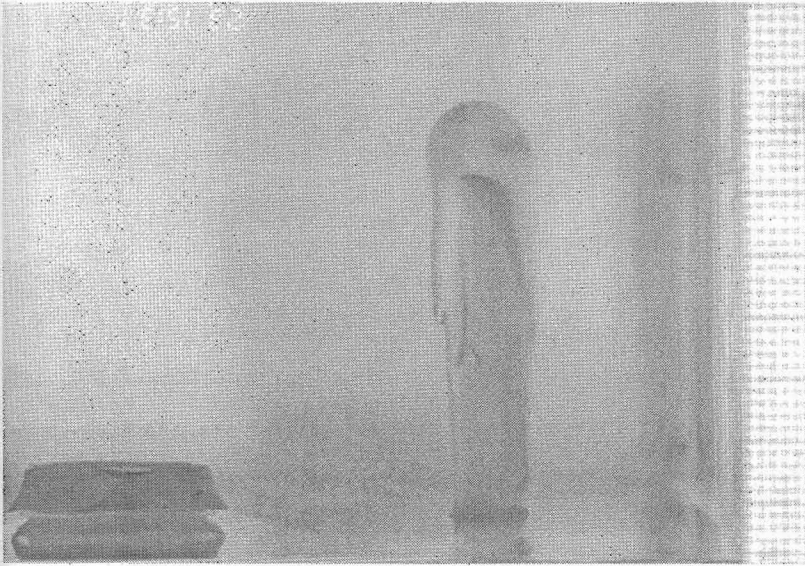
Μέλι: Το μέλι αλλάζει μορφή και από το σχήμα της αφαίρας τείνει να μετατραπεί σε έλλειψη.
Ροζ Σιλκόνη: Το μπροστινό μέρος της είναι καμπύλο και τείνει προς την μορφή του μανιταριού.



Φωτογραφία 5 (23 10:27)

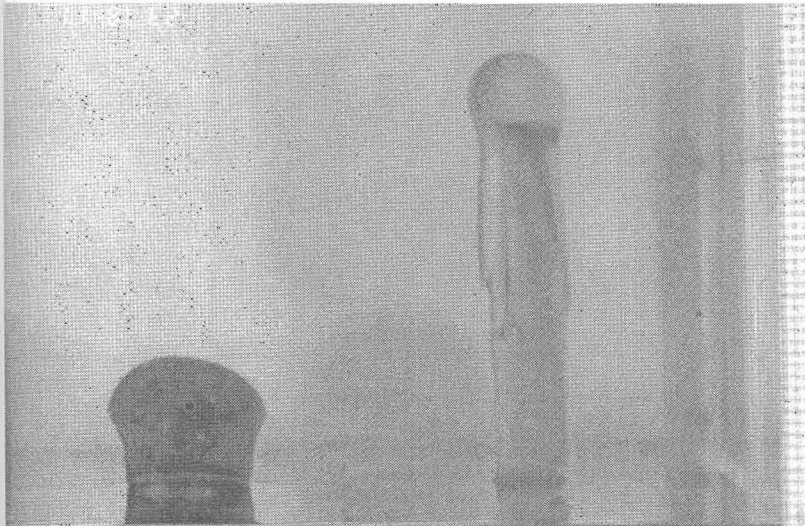
Μέλι: Τα πείραμα για τα μέλι έχει τελειώσει. Παρουσιάζει ένα τελειώς συμμετρικό σχήμα, με το μπροστινό και πίσω μέρος του να είναι επίπεδα.

Ροζ Σιλκόνη: Ριζική αλλαγή του σχήματος και της μορφής σε σχέση με τη φωτογραφία 4. Η βύθιση της έχειπραχωρήσει αρκετά, ενώ το μπροστινό μέρος της έχει πάρει κυκλική μορφή που μαιάζει με καπέλο. Το μήκος της βάσης της έχει μειωθεί σημαντικά και έχει δημιουργηθεί μία επιμηκής ουρά που σε αντίθεση με το μέλι είναι εμφανώς ορατή. Το πάχος του μπροστινού μέρους είναι μεγαλύτερο από αυτά του πίσω μέρους.



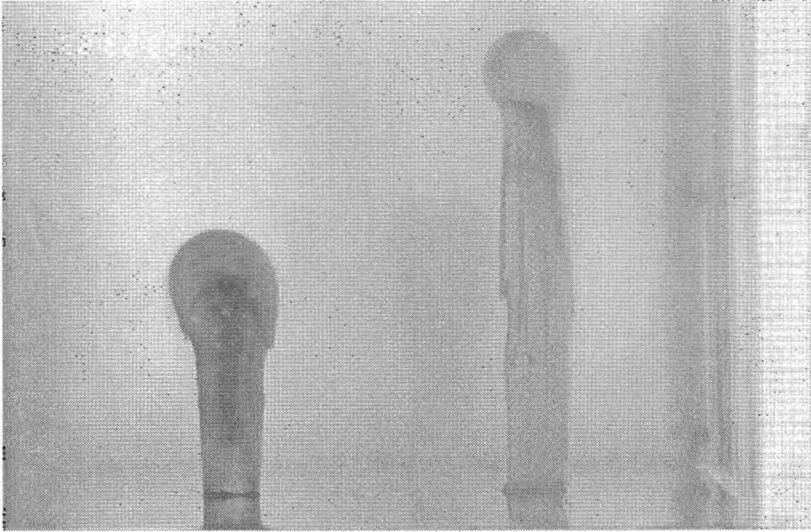
Φωτογραφία 6 (23 15:31)

Ροζ Σιλίκονη: Η ουρά της έχει μεγαλώσει ενώ το πάχος του μπροστινού της μέρους έχει ελαφρά μειωθεί.
Μαύρη Σιλίκονη: Αρχή του πειράματος για την μαύρη οιλίκονη. Έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και δεν έχει παρομορφωθεί το σχήμα της ακόμα.



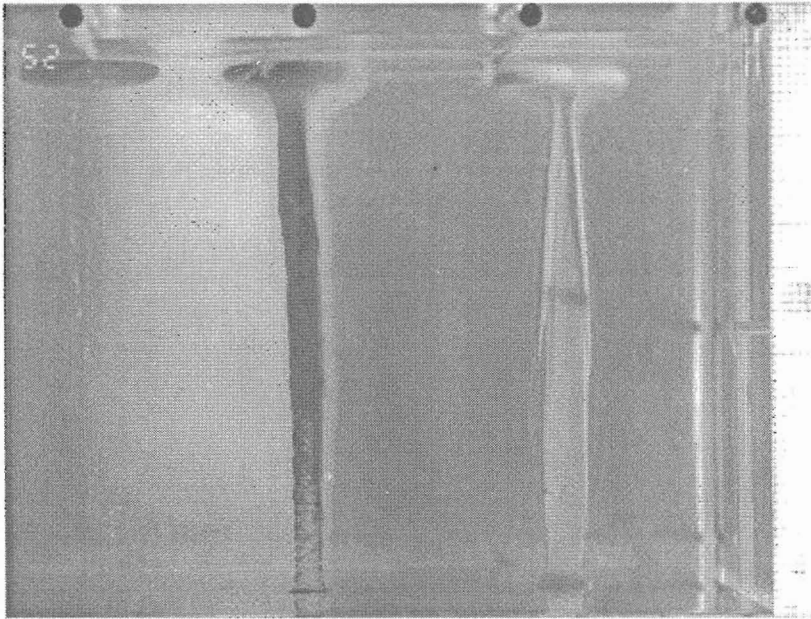
Φωτογραφία 7 (23 18:17)

Ροζ Σιλίκονη: Μία ελαφρά αύξηση του ύψους της ουράς της. Δεν υπάρχουν οσημαντικές διαφοροποιήσεις λόγω της πολύ χαμηλής ταχύτητας με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο.
Μαύρη Σιλίκονη: Το μπρασιινό καμπύλο σχήμα τείνει προς το σχήμα του μανιταριού και έχει μεγαλύτερο πάχος από την βάση της.



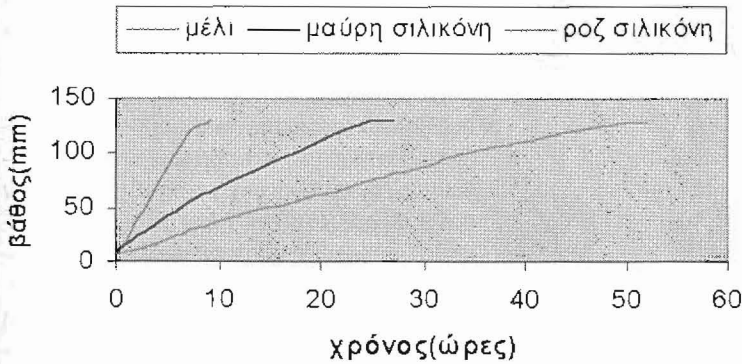
Φωτογραφία 8 (23 23:23)

Ροζ Σιλίκονη: Η ουρά της έχει μεγαλώσει αλλά το πάχος του μπροστινού τμήματος της έχει μειωθεί.
Μαύρη Σιλίκονη: Επιπλέον μείωση του μήκους της βάσης της, λέπτυνση και επι-μήκυνση της ουράς της και μείωση του πάχους του μπροστινού τμήματος



Φωτογραφία 9 (25 9:43)

Ροζ Σιλίκονη: Το πείραμα πλέον έχει τελειώσει. Το μπροστά και το πίσω μέρος του «καπέλου» έχουν μετατραπεί σε επίπεδα, ενώ η ουρά της έχει το μέγιστο μήκος.
Μαύρη Σιλίκονη: Ίδιες διαφοροποιήσεις πραγματοποιούνται και στη μαύρη αιλίκονη.



Σχ.3. Γραφική παράσταση χρόνου - βάθους για τα υλικά που συμμετείχαν στο πείραμα. Ο λόγος μεταξύ του ιξώδους της SGM-36 ουλικόνης και του ιξώδους των άλλων υλικών είναι αντίστοιχα, για το μέλι $m_1=4545,4$ για την μαύρη σιλικόνη $m_2=41,6$ και για την ροζ σιλικόνη $m_3=1,6$.

σεις μεταξύ των υλικών που κινήθηκαν προς τα κάτω, ήταν τέτοιες ώστε τα διάπειρα που σχηματίστηκαν να μην επηρεάζονταν μεταξύ τους.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα μικρό μέρος του συνόλου των φωτογραφιών που λαμβάνονταν κατά την διάρκεια του πειράματος. Αυτές περιγράφονται μόνο χωρίς να γίνει παραπάνω ανάλυση, κάτι που θα γίνει στο τελευταίο μέρος της εργασίας. Επίσης οι φωτογραφίες έχουν αντιστραφεί για την καλύτερη απεικόνιση του φαινομένου. Στο τέλος παρατίθεται γραφική παράσταση χρόνου - βάθους για τα υλικά που συμμετείχαν στο πείραμα και η οποία έγινε με βάση τα στοιχεία που προκύπτουν από τις φωτογραφίες. Οι τιμές χρόνου - βάθους που χρησιμοποιούνται στην γραφική παράσταση είναι οι πραγματικές αφού προηγουμένως έχουν διορθωθεί λόγω του σφάλματος που προκύπτει στις μετρήσεις τους, εξαιτίας της τρισδιάστατης διάταξης του πειράματος.

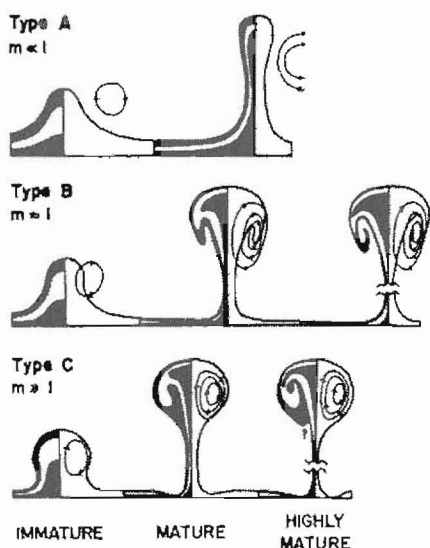
Στο σχήμα 3 απεικονίζεται η γραφική παράσταση χρόνου - βάθους για τα υλικά που συμμετείχαν στο πείραμα. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η σχέση μεταξύ χρόνου και βάθους είναι σχεδόν γραμμική. Η γραφική παράσταση αυτή αντικατοπτρίζει τις διαφορετικές ταχύτητες, με τις οποίες εξελίσσεται το φαινόμενο για τα τρία διαφορετικά υλικά. Έτσι ο χρόνος που χρειά-

στηκε για να λάβει τέλος το πείραμα ήταν αντίστοιχα, για το μέλι λιγότερο από 10 ώρες, για την μαύρη σιλικόνη λιγότερο από 30 ώρες και τέλος για την ροζ σιλικόνη περισσότερο από 50 ώρες.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε ένα μέρος του συνόλου των φωτογραφιών που λαμβάνονταν κατά την διάρκεια του πειράματος. Στο τμήμα αυτό περιγράφηκαν οι μορφές και τα σχήματα των διάπειρων καθώς και οι σταδιακές μεταβολές τους. Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μεγαλύτερη ανάλυση για τις μορφές αυτές και πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στις λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα για να δημιουργηθεί το φαινόμενο καθώς και στους παράγοντες που επηρεάζουν την μορφολογία των διάπειρων.

Η μορφή των διάπειρων που δημιουργούνται με πειράματα εξαρτάται τόσο από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών όσο και από την αρχική δομή του συστήματος μέσα στο οποίο αναπτύσσονται τα διάπειρα. Σε σύστημα που περιέχουν μόνο Νευτώνια ρευστά αρχικά διαμορφωμένα σε ίσου πάχους στρώματα και παράλληλα στις ισοδυναμικές επιφάνειες, τα διάπειρα αναπτύσσονται σαν κανονικά συμμετρικά σώματα, συχνά σαν κανονικά ανοιχτές ράχεις ("αντίκλινα") συμμετρικές ως προς το αξονικό επίπεδο. Αν το στρώμα επικάλυψης είναι παχύ το διάπειρα τότε συχνά γίνονται αρκετά σφαιρικά στο σχήμα, πριν φτάσουν στην



Σχ.4. Ποικίλες μορφές διάπειρων που οφείλονται στις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου m , βασισμένα σε φυσικά και αριθμητικά μοντέλα (Berner et al. 1972, Whitehead & Luther 1975, Heye 1978, 1979 and Woidt 1978, 1980). Τα ανώριμα διάπειρα έχουν μικρές αλλά αναγνωρίσιμες διαφορές, οι οποίες μεγαλώνουν με την ωριμότητα.

επιφάνεια και συνδέονται με το πηγαίο στρώμα με ένα στενό στέλεχος, το οποίο τελικά θα αποκοπεί. Όταν προσεγγίσει την επιφάνεια το κορυφαίο τμήμα των διάπειρων, απλώνεται και μπορεί να μετατραπεί σε συνεχές επίπεδο στρώμα.

Αν το πηγαίο στρώμα και το στρώμα επικάλυψης είναι ομοιόμορφα στο πάχος, στην σύσταση, στη δομή και επιπλέον η στρώση είναι παράλληλη στις ισοδυναμικές επιφάνειες, τότε τα διάπειρα θεωρητικά πρέπει να μην ξεκινήσουν να αναπτύσσονται από το αρχικό μετασταθής στρώμα. Στην θεωρία, μία μικρή ανωμαλία στην γεωμετρία ή σε ιδιότητα του υλικού είναι απαραίτητη για να δημιουργήσει τα διάπειρα. Ωστόσο αν ούτε το αρχικό στρώμα αλλά ούτε και το στρώμα επικάλυψης έχουν ένα περιορισμένο όριο αντοχής, οι απαιτούμενες ανωμαλίες γίνονται απείρως μικρές και ο διαπειρισμός ξεκινάει στο μετασταθής σύστημα ακόμα και χωρίς να ανακαλυφθούν ανωμαλίες.

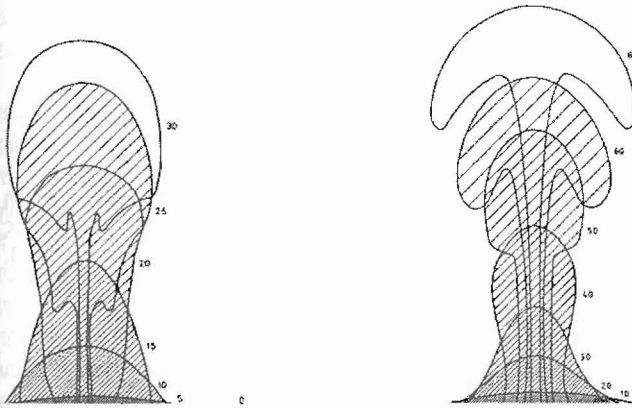
Κατά την διάρκεια του διαπειρισμού η προς τα

κάτω κίνηση του καλύμματος που περιβάλλει το διάπειρο και η προς τα πάνω κίνηση του πυρήνα του διαπείρου, δείχνει ότι το υλικό κοντά στην περιφέρεια του διαπείρου ανέρχεται πιο αργά από ότι ο πυρήνας. Αυτό προκαλεί την ιξώδη σπειροειδή κυκλοφορία της οποίας οι επιφάνειες ροής είναι συγκεντρωμένες στον πυρήνα του «βολβού» (bulb) και είναι συγκεντρικές ως προς τον οριζόντιο κυκλικό άξονα. Λόγω αυτής της ισοθερμικής κυκλοφορίας η κορυφή του διαπείρου διευρύνεται και διαμορφώνει το σχήμα του βολβού. Όταν το διάπειρο βρίσκεται σε ώριμο στάδιο η ραή αυτή καταγράφεται από τις εσωτερικές πιτυχές μέσα στον βολβό.

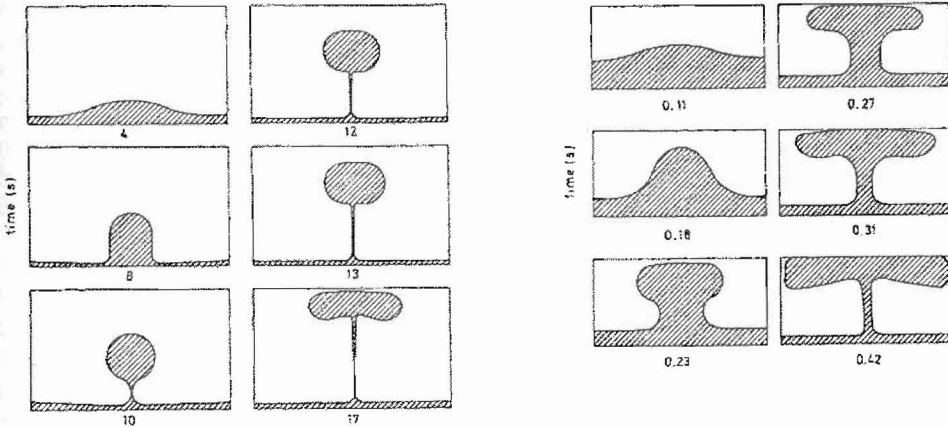
Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες δείχνουν ότι το σχήμα του βολβού εξαρτάται κατά πολύ από την παράμετρο m , δηλαδή τον λόγο μεταξύ του ιξώδους του στρώματος επικάλυψης και του ιξώδους του αρχικού στρώματος (Berner et al. 1972, Whitehead & Luther 1975, Heye 1978, 1979, Woidt 1978, 1980). Το σχήμα του διαπείρου και η σχετική ανάμιξη του υλικού του διαπείρου και του καλύμματος του σχετίζεται με το m ως προς το πόσο μακριά ανέβηκε το διάπειρο και ως προς την προσέγγιση των γειτονικών του διαπείρων (Schmeling et al. 1988).

Το σχήμα 4 απεικονίζει την τάση της σπειροειδούς κυκλοφορίας να μετακινηθεί προσοδοτικά προς τα μέσα όσο το m αυξάνεται. Διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι βολβών. Όταν $m < 1$ τα σχετικά μεγάλα εύρους ανοίγματος διάπειρα τύπου A διογκώνονται σε μορφές που μοιάζουν με ταν αντίχειρα και η σπειροειδής κυκλοφορία λαμβάνει χώρα κυρίως μέσα στο κάλυμμα επειδή είναι μαλακότερο από ότι το αρχικό στρώμα (σχ.4).

Αντίθετα όταν $1 < m$, οι στενοί ανοίγματος σφαιρικοί βολβοί τύπου C, δημιουργούνται λόγω ότι η κυκλοφορία λαμβάνει χώρα κυρίως μέσα στο μαλακότερο διάπειρο (σχ.4). Οι βολβοί που μοιάζουν με μπαλόνια ανέρχονται πιο γρήγορα από τους κορμούς των διαπείρων, οι οποίοι γίνονται σαν λεπτές ίνες και ανέρχονται από το αρχικό στρώμα. Η σπειροειδής κυκλοφορία μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερες από μία ανατροπές της διαπειρικής σειράς μέσα στους βολβούς που ανεβαίνουν σε σημαντικές αποστάσεις, δημιουργώντας



Σχ.5. Αριθμητικά μοντέλα που απεικονίζουν την διαπειρική ανάπτυξη. Οι αριθμοί δείχνουν το σχετικό χρόνο της εξέλιξης του φαινομένου (Berner et al., 1972).



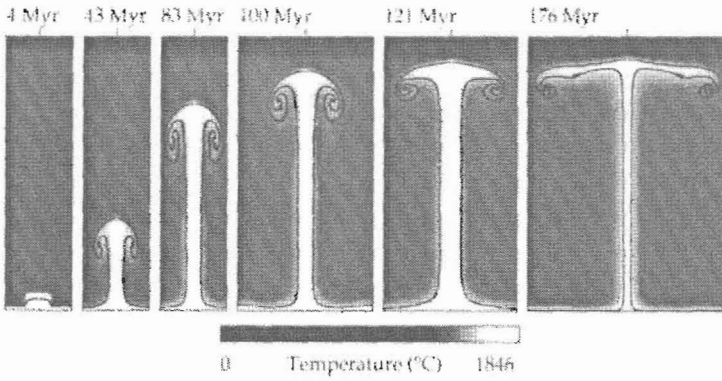
Σχ.6. Αριθμητικά μοντέλα που απεικονίζουν την διαπειρική εξέλιξη σε διαφορετικά στάδια. Η παράμετρος m έχει τιμή για το αριστερά και το δεξιά σχήμα αντίστοιχα: 100 και 1 (Woidt 1978, Condie 2001)

ένα στροβίλισμα κυρίως στα τελευταία στάδια ωρίμανσης. Εάν ο βολβός αποσπάζεται στα εβαποριτικά διάπειρα είναι άγνωστο, αλλά ο βολβός που αποκόπτεται στα μοντέλα είναι σφαιρικός, εάν το ρευστό που τον περιβάλλει ακολουθεί την Νευτώνια συμπεριφορά.

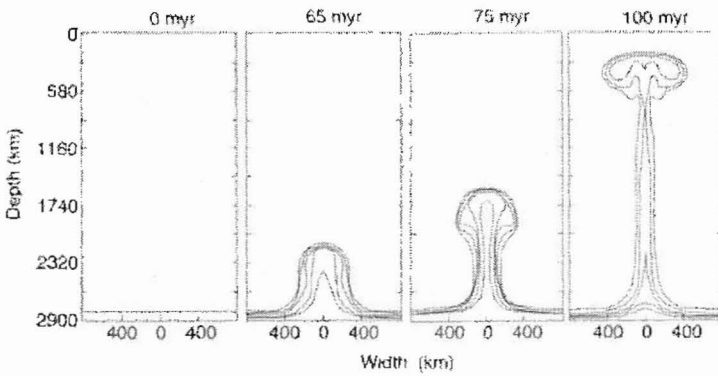
Όταν η τιμή του m είναι της τάξης μεγέθους του 1, τότε κάλυμμα και αρχικό στρώμα πραγματοποιούν σπειροειδή κυκλοφορία δημιουργώντας βολβό (τύπου B) που μοιάζει με το σχήμα του μαπιταριού (σχ.4). Οι παρυφές του βολβού δεν βυθίζονται σε σχέση με το αρχικό στρώμα, αλλά απλώς μόνο ανέρχονται πιο αργά από ότι ο πυρήνας του

διάπειρου. Τα αριθμητικά και φυσικά μοντέλα δείχνουν ότι ο τύπος αυτός των βολβών δημιουργείται κυρίως σε γεμάτα διάπειρα τα οποία ενσωματώνουν στενού ανοίγματος αρχικές ανωμαλίες και ανέρχονται μέσα από παχύ κάλυμμα.

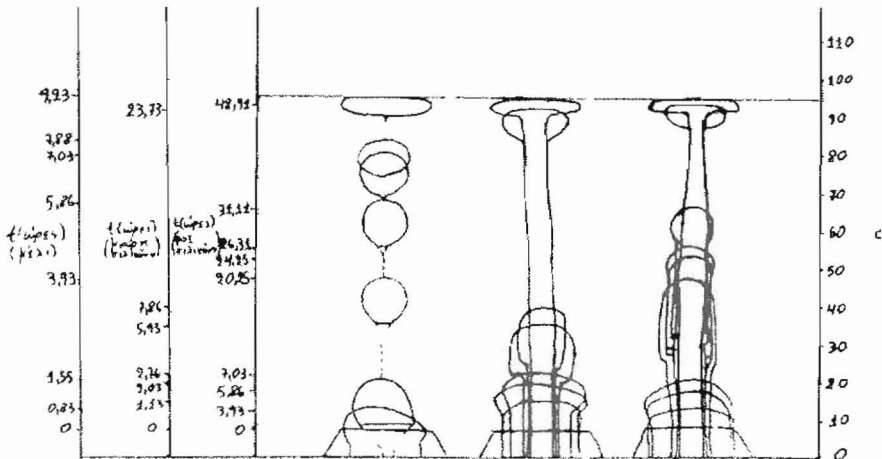
Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω γίνεται πλέον εύκολη η κατανόηση της δημιουργίας των συγκεκριμένων μορφών των διάπειρων, στο πείραμα. Για να υπάρξει αντιστοιχία με αυτά που προαναφέρθηκαν, πρέπει να σημειωθεί ότι στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν Νευτώνια υλικά. Επιπλέον τα αρχικά στρώματα των διάπειρων είχαν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και βρίσκονταν



Σχ.7. Αριθμητικό μοντέλο που δείχνει την ανάπτυξη ενός «mantle plume». Το χρώδες είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας (Davies, 1999, Condie2001).



Σχ.8. Ανάπτυξη ενός «mantle plume» που ξεκινάει στην βαθμίδα θερμοκρασίας των 800 °C και αντιστοιχεί σε διαφορά πυκνότητας 5 % (Farnetani, 1997; Condie2001).



Σχ.9. Αποτελέσματα πειραματικού μοντέλου της πορούσης εργασίας, που αναπαριστά την εξέλιξη του διαπερισμού για υλικά διαφορετικού χρώδους. Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται: το μέλι, η μαύρη σιλικόνη και η ροζ σιλικόνη. Έχουν σχεδιαστεί τρεις άξονες για το χρόνο που αντιστοιχούν σε κάθε υλικό. Η ουρά στα μέλι έχει σχεδιαστεί προσεγγιστικά, αφού αυτή δεν αποτυπώνεται με ευκρίνεια στις φωτογραφίες.

σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους για να μην επηρεάζονται.

Ο λόγος μεταξύ του ιξώδους του στρώματος επικάλυψης και του ιξώδους του αρχικού στρώματος είναι για τα τρία υλικά αντίστοιχα: Για το μέλι $m_1 = 4545,4$ για την μαύρη ολικόνη $m_2 = 41,6$ και για την ροζ σιλικόνη $m_3 = 1,6$. Σύμφωνα με το σχήμα 4 αλλά και με τα προηγούμενα το μέλι κατατάσσεται στον τύπο C, ενώ οι δύο ολικόνες ανήκουν στον τύπο B. Αυτό γίνεται φανερό και από τις εικόνες που είναι αποτυπωμένες στις φωτογραφίες που λαμβάνονταν κατά την διάρκεια του πειράματος. Σαν κύριους παράγοντες λοιπόν, για την διαμόρφωση των μορφών και σχημάτων των διάπειρων στο πείραμα μπορούμε να αναφέρουμε τους: Αρχικές μικρές ανωμαλίες στη γεωμετρία ή στις ιδιότητες των υλικών των αρχικών στρωμάτων, η σπειροειδής κυκλοφορία, η παράμετρος m , οι διαφορετικές τιμές των πυκνοτήτων και τέλος το πάχος του στρώματος επικάλυψης (δηλαδή της SGM-36 ολικόνης) σε σχέση με το αρχικό στρώμα.

Το μέλι που ήταν το πιο πυκνό υλικό βυθίστηκε πιο γρήγορα από όλα τα άλλα υλικά, ενώ αντίθετα η ροζ σιλικόνη ως πιο αραιή βυθίστηκε πιο αργά. Όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες το μπροστινό τμήμα των διάπειρων λίγο πριν φτάσει στο τέλος της διαδρομής του «προετοιμάζεται» για την πρόοκρουση και από το αρχικό κυκλικό σχήμα που είχε, μετατρέπεται σε πεπλατυμένο σχήμα ελλειψοειδής μορφής. Η οριακή αυτή απόσταση όπου αρχίζει η μετατροπή του σχήματος ισοδυναμεί με την διάμετρο της αρχικής κυκλικής μορφής του κορυφαίου τμήματος του διάπειρου. Το διάπειρα που σχηματίστηκε από το μέλι έχει οημαντικές διαφορές από τα διάπειρα που δημιουργήθηκαν με τις δύο ολικόνες, ενώ οι μορφές των διάπειρων των ολικόνων δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, κάτι που είναι λογικό αφού ανήκουν στην ίδια κατηγορία (τύπος B).

Για να ολοκληρωθεί από κάθε πλευρά της η μελέτη θα πρέπει εκτός από τα πειραματικά μοντέλα, να ληφθούν υπόψη και οι αριθμητικοί μέθοδοι. Έτσι οι μέθοδοι αυτοί θα πρέπει να συμφωνούν με τα αποτελέσματα που δίνουν τα πειρα-

ματικά μοντέλα. Τα σχήματα 5, 6, 7, 8 απεικονίζουν τα διαδοχικά εξελικτικά στάδια που παρουσιάζουν τα διάπειρα κατά την ανάπτυξη τους και στηρίζονται στις αριθμητικές μεθόδους. Το σχήμα 9 αναπαριστά την εξέλιξη του διαπειρισμού για τα τρία υλικά που συμμετέχουν στο πείραμα. Από την σύγκριση των παραπάνω σχημάτων που στηρίζονται σε αριθμητικές μεθόδους και σε πειραματικές (σχ. 9) διαπιστώνεται ότι υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών μοντέλων.

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή αποτελεί τμήμα της διπλωματικής εργασίας του Δ. Τουρνά, (2001) και πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος ΓΓΕΤ 97ΕΛ-92 "Πειραματική Τεκτονική Μοντελοποίηση σε συνδυασμό με ερμηνεία γεωλογικών δεδομένων υπαίθρου"

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brun, J.P., Sokoutis, D. & Driessche, J.V.D. 1994. Analogue modeling of detachment fault systems and core complexes. *Geology*, 22, 319-322.
- Condie, K.C. 2001. Mantle plumes and their record in Earth history. *Cambridge University Press* 2001, pp. 306.
- Γεωργακόπουλος, Α. 1997. Στοιχεία κοιτασματολογίας πετρελαίου. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 171 σ.
- De Waard, D. 1987. Diapirism. The encyclopedia of Structural Geology and Plate Tectonics. Encyclopedia of Earth sciences, volume 10. Edited by Carl K. Seyfert, editor: Rhodes W. Fairbridge, 202-203.
- Dixon, J.M. 1987. Mantled gneiss domes. The encyclopedia of Structural Geology and Plate Tectonics. Encyclopedia of Earth sciences, volume 10. Edited by Carl K. Seyfert, editor: Rhodes W. Fairbridge, 398-412.
- Jackson, M.P.A. & Cornelius, R.R. 1987. Stepwise centrifuge modeling of the effects of differential sedimentary loading on the formation of salt structures. In: *Dynamical Geology of Salt and Related Structures* (edited by Lerche, I. & O'Brien, J.J.). *Academic Press*, Orlando, 163-259.
- Jackson, M.P.A., Talbot, C.J. & Cornelius, R.R.

1988. Centrifuge modeling of the effects of Aggradation and Progradation on Syndepositional Salt Structures. *University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigation No.173.*
- Jackson, M.P.A. & Talbot, C.J. 1989. Anatomy of mushroom-shaped diapirs. *Journal of Structural Geology*, Vol. 11, No. 1/2, pp 211 to 230.
- Jackson, M.P.A. & Talbot, C.J. 1991. A glossary of salt tectonics. *University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Geological Circular* 91-4.
- Jaeger, J.C. 1969. Elasticity, Fracture and Flow with engineering and geological applications. *Methuen, London.* 268 pp.
- Jaeger, J.C. & Cook, N.G.W. 1971. Fundamentals of rock mechanics. *Chapman and Hall Ltd and Science Paperbacks, London.* 513 pp.
- Jenyon, M.K. 1987. The development by salt diapirs of superficial overhang features and effects on associated sediments. In: *Dynamical Geology of Salt and Related Structures (edited by Lerche, I. & O'Brien, J.J.). Academic Press, Orlando,* 679-709.
- Karakitsios, V. 1995. The influence of preexisting structure and the halokinesis on organic matter preservation and the thrust system evolution in the Ionian basin, Northwest Greece. *AAPG Bulletin*, V. 79, No. 7, pp. 960-980.
- Κουκουβέλας, Ι. 1998. Τεκτονική Γεωλογία. *Leader books, Αθήνα.* 303 σ.
- Koyi, H. 1997. Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique - a historical outline. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 20(2), pp. 223-238.
- Koyi, H. 1998. The shaping of salt diapirs. *Journal of Structural Geology*, Vol. 20, No 4, pp. 321 to 338.
- Lerche, I. & O'Brien, J.J. 1987. Modelling of buoyant salt diapirism. In: *Dynamical Geology of Salt and Related Structures (edited by Lerche, I. & O'Brien, J.J.). Academic Press, Orlando,* 129-162.
- Means, W.D. 1976. Stress and Strain. Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists. *Springer - Verlag, New York.* 339 pp.
- Μουντράκης, Δ. 1985. Γεωλογία της Ελλάδας. *University studio press, Θεσσαλο-νίκη,* 207 σ.
- Νικολόου, Κ. 1988. Νεοδιωπειρικές κινήσεις των Τριαδικών εβαποριτών στη Ζάκυνθο και Στροφάδες. *Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ. Τομ. XX,* σελ. 83-89.
- Περισσορότης, Κ., Ποπαδόπουλος, Γ. & Ζημιονίτης, Ε. 1998. Φαινόμενα διαπειρισμού ιλύος στην θολόσσιο περιοχή μετοξύ Κω και Κολύμνου, ΝΑ Αιγαίο: προκοτορκτικό αποτέλεσμα. *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας,* τομ. XXXII/2, σελ. 217-222.
- Ramberg, H. 1981. Gravity, deformation and the Earth's crust. In theory, experiments and geological application. *Academic Press, London,* 2nd ed. 452 pp.
- Ramsay, J. 1988. Emplacement kinematics of a granite diapir: the Chindamora batholith, Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, Vol. 11, No. 1/2, pp. 191 to 209.
- Ranalli, G. 1987. Rheology of the Earth. Deformation and flow processes in Geophysics and Geodynamics. *Allen & Unwin, Boston.* 336 pp.
- Talbot, C.J. & Jarvis, R.J. 1984. Age, budget and dynamics of an active salt extrusion in Iran. *Journal of Structural Geology*, Vol. 6, No 5, pp. 521 to 533.
- Trusheim, F. 1987. Halokinesis. The encyclopedia of Structural Geology and Plate Tectonics. *Encyclopedia of Earth sciences*, vol. 10. Edited by Carl K. Seyfert, editor: Rhodes W. Fairbridge, 324-332.
- Velaj, T., Davison, I., Serjani, A. & Alsop, I. 1999. Thrust tectonics and the role of evaporites in the Ionian zone of the Albanides. *AAPG Bulletin*, V. 83, No. 9, pp. 1408-1425.
- Weijermars, R. 1986a. Flow behaviour and physical chemistry of Bouncing Putties and related polymers in view of tectonic laboratory applications. *Tectonophysics*, 124, 325-358.
- Weijermars, R. 1986b. Finite strain of laminar flows can be visualised in SGM36-polymer. *Naturwissenschaften*, 73, 33-34.
- Weijermars, R. & Schmeling, H. 1986. Scaling of newtonian and non-newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity). *Phys. Earth Planet. Interiors*, 43, 316-330.