



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

Μάθημα:

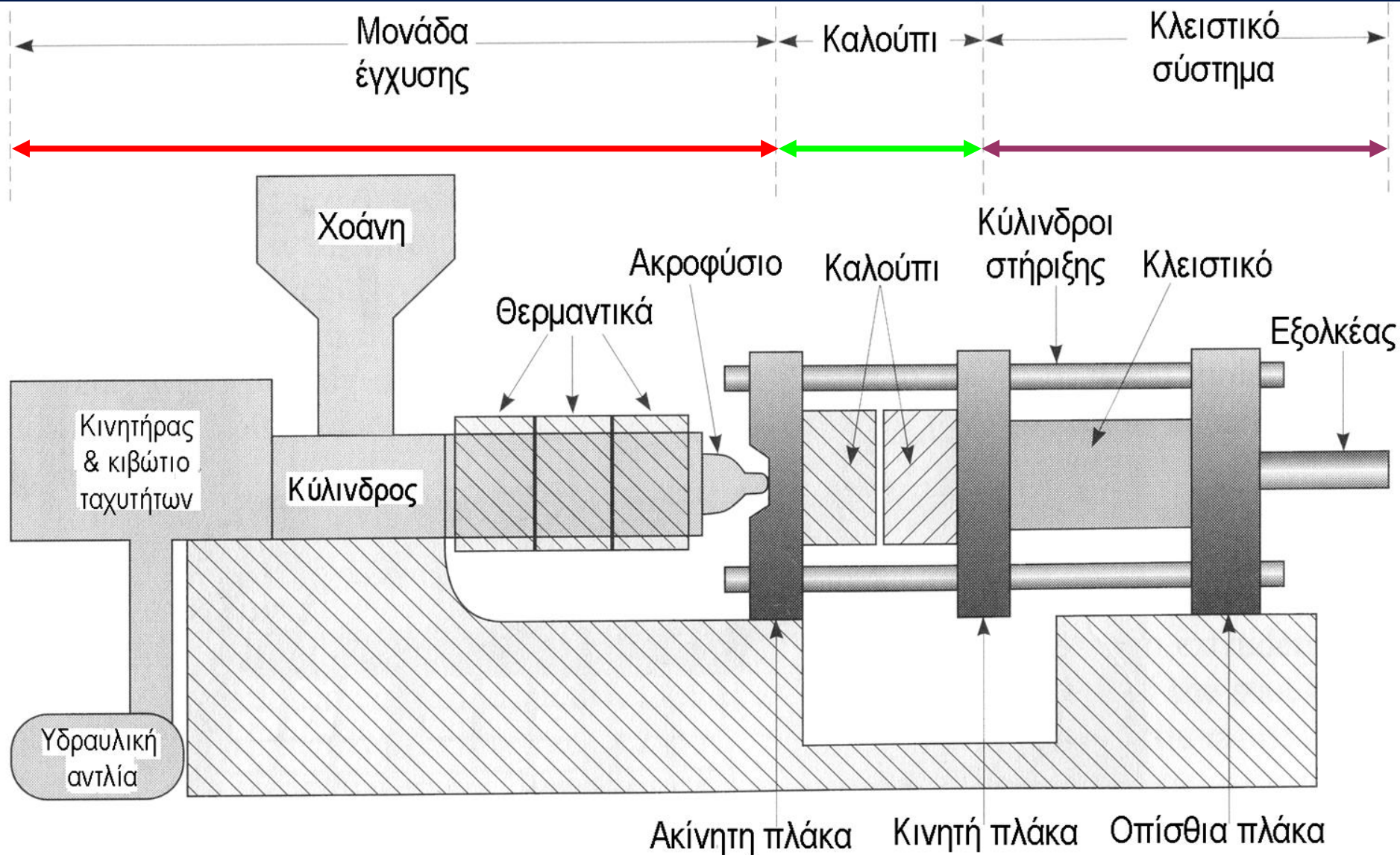
**“ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ -
ΡΕΟΛΟΓΙΑ”**

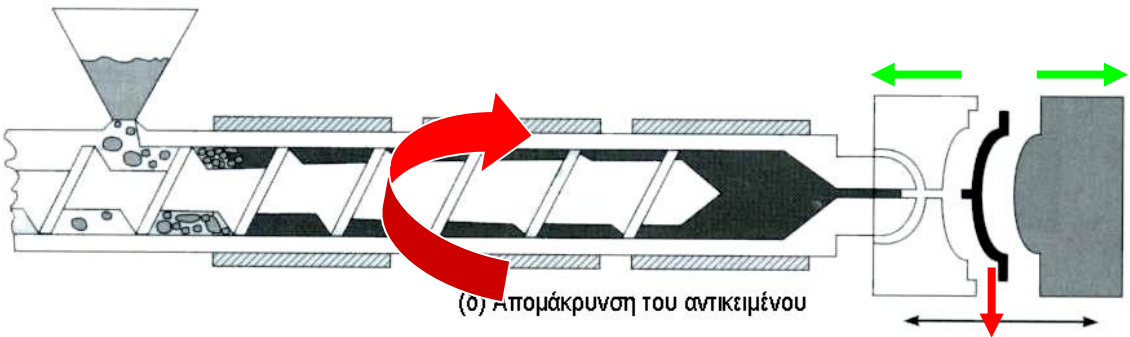
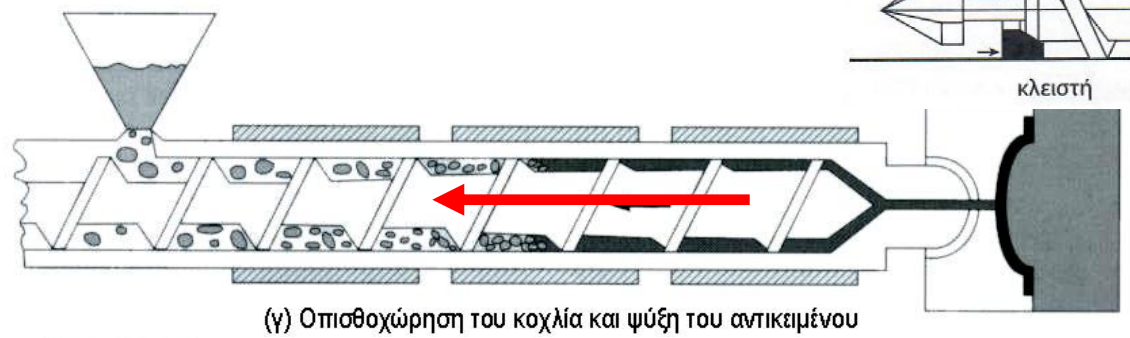
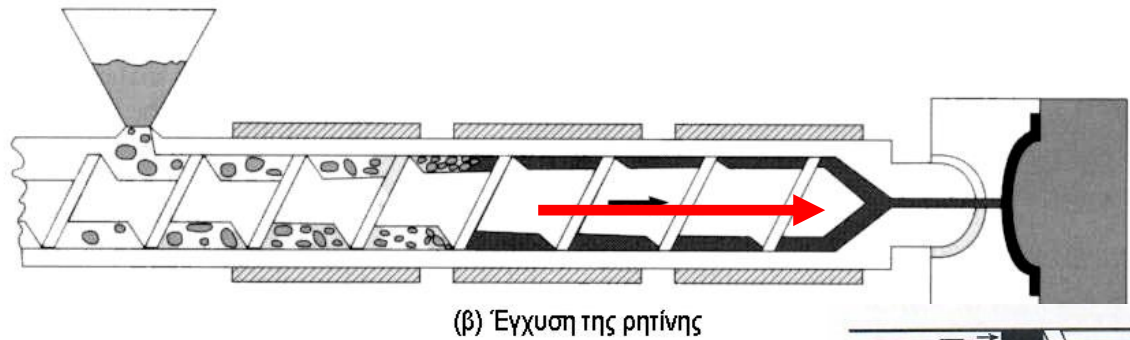
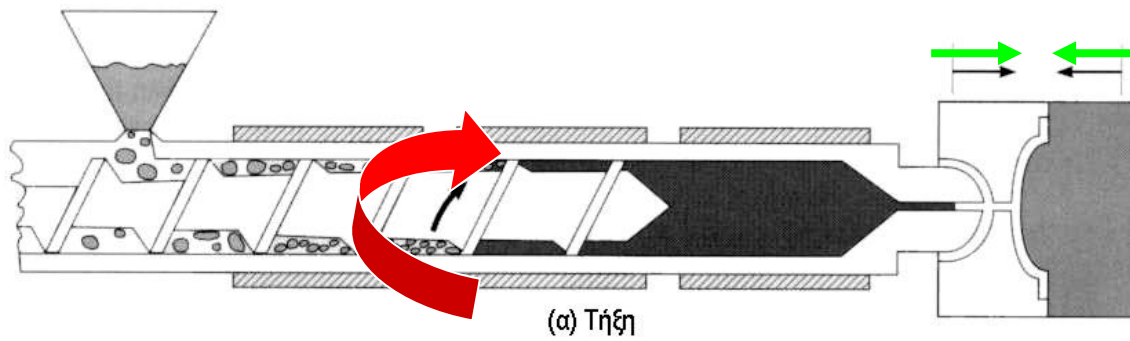
3_ΕΓΧΥΣΗ

Ακαδημαϊκό έτος 2023-2024

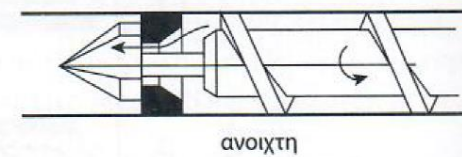
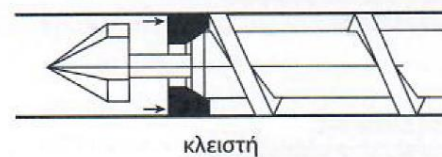


Μορφοποίηση με έγχυση (injection)

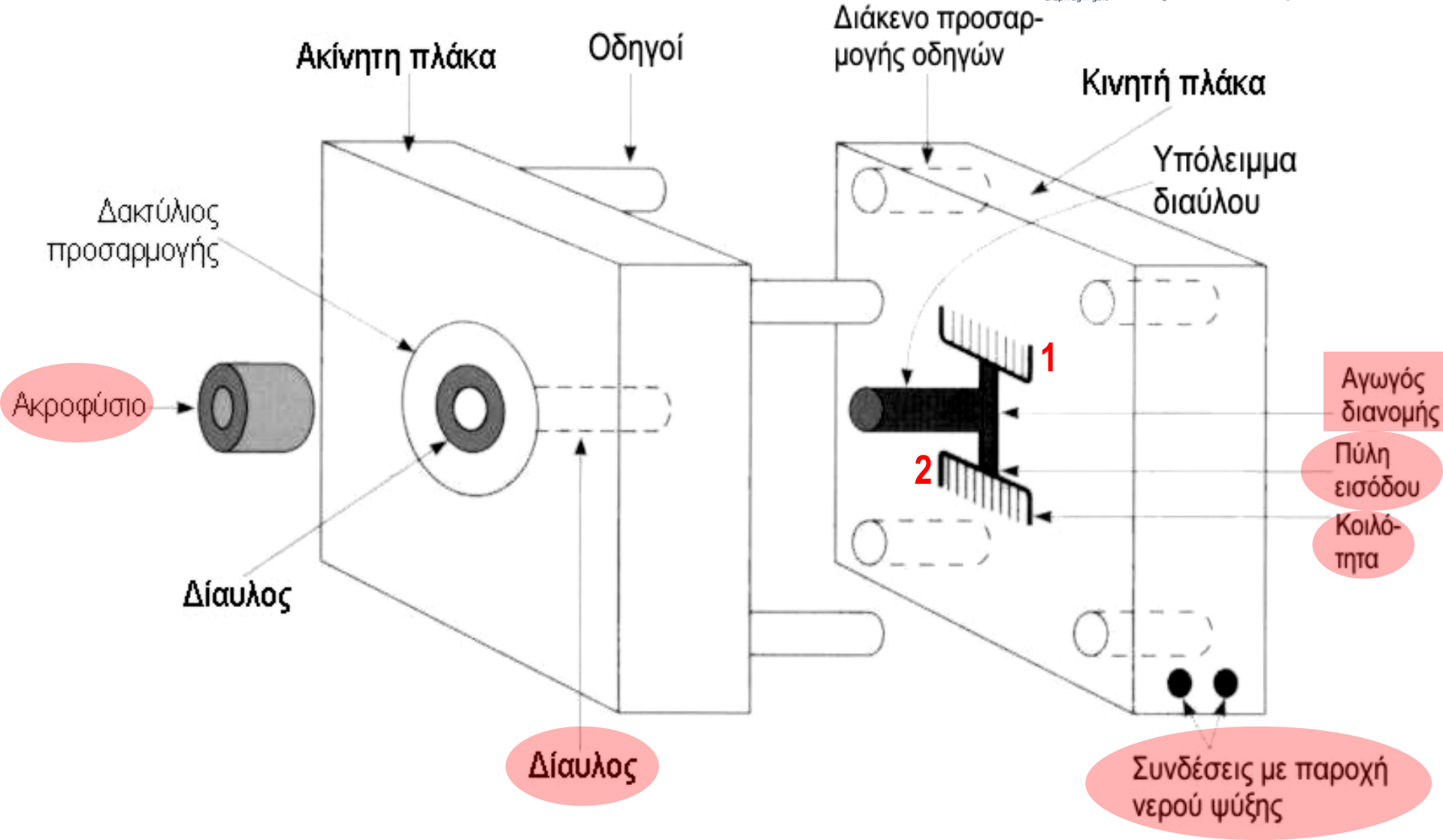
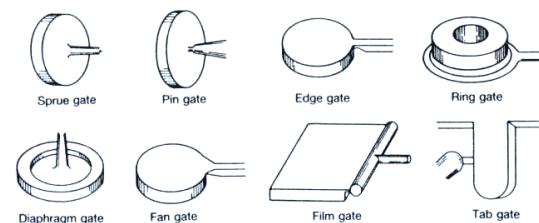




Ποσότητα έγχυσης
(shot size): 20gr – 20
Kgr



Καλούπι έγχυσης



Αγωγοί διανομής (runners)

Ο σχεδιασμός των αγωγών διανομής εξαρτάται:

- Από τα χαρακτηριστικά ροής του τήγματος (ιξώδες) - Θερμοκρασία τήγματος
- Την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων κατά τη ροή του τήγματος μέσα από τους αγωγούς.
- Τον όγκο, το μέγεθος και το πάχος του αντικειμένου μορφοποίησης

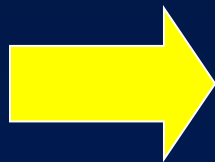
Χαρακτηριστικά μεγέθη: μήκος και η διατομή

Αγωγοί διανομής με μικρή διατομή και μεγάλο μήκος

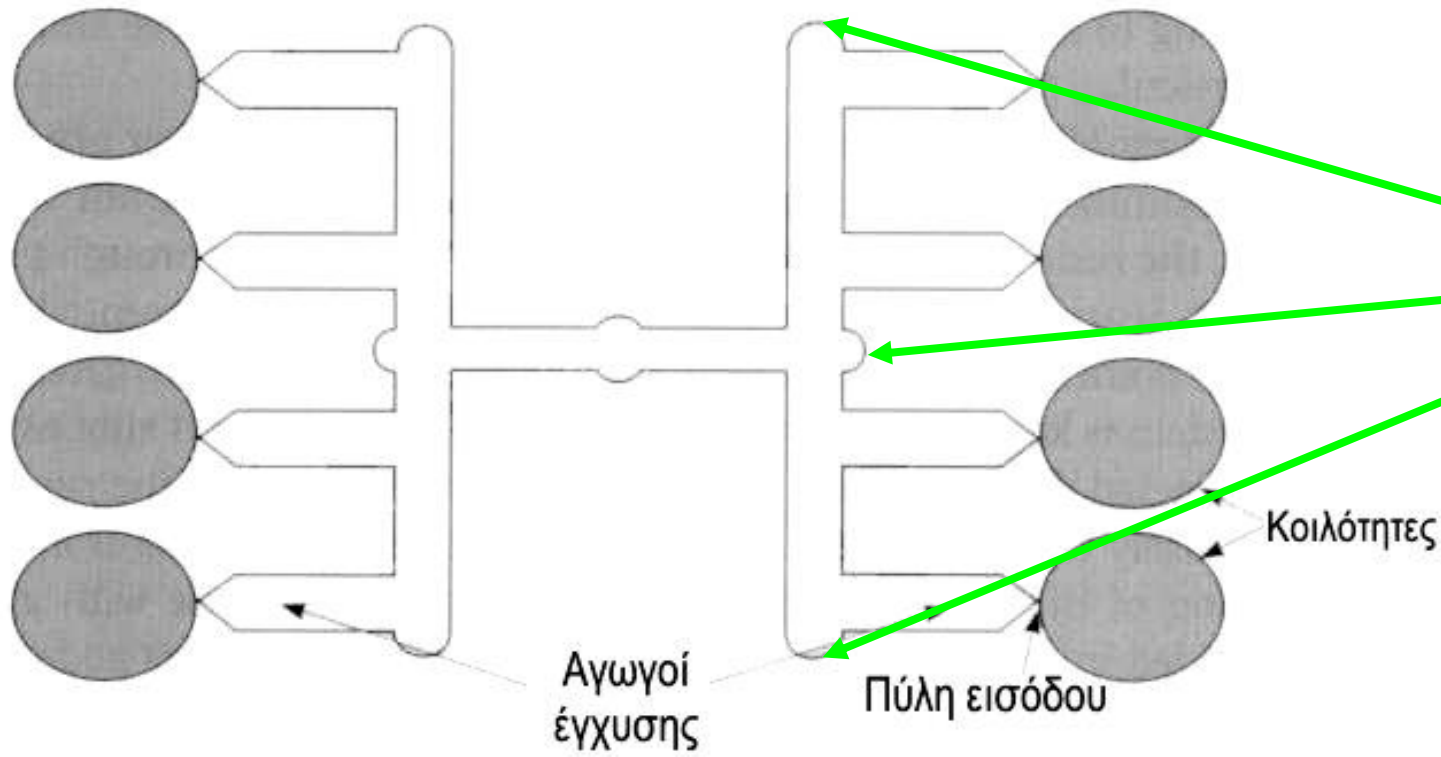
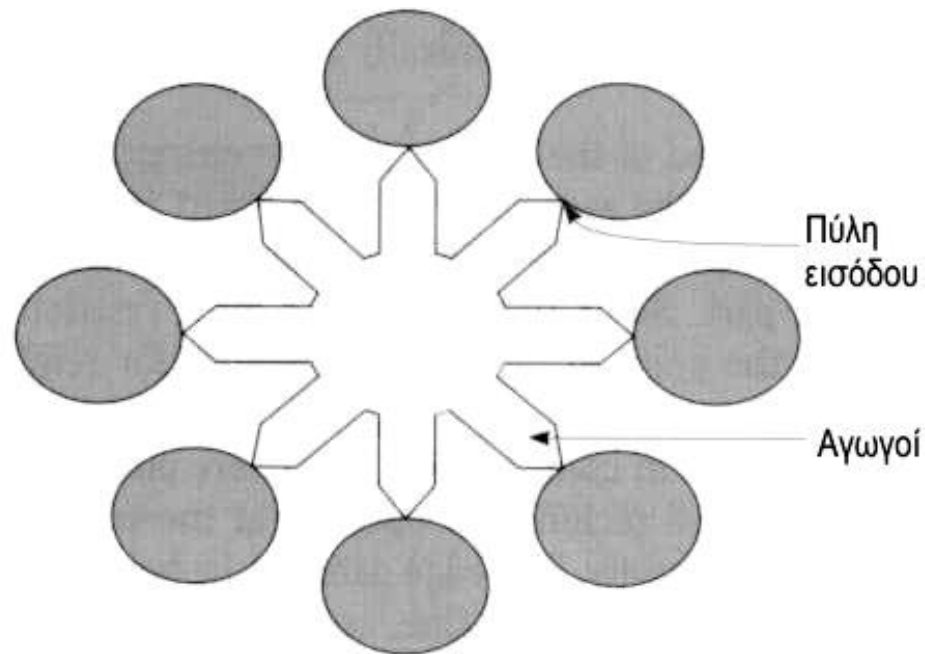


Πιθανά η ρητίνη να ψυχθεί μέχρι να φθάσει στο καλούπι

Συμμετρικό σύστημα
αγωγών διανομής



Μη-συμμετρικό σύστημα
αγωγών διανομής



Επεκτάσεις

Θερμαινόμενοι αγωγοί διανομής

- ☞ Αποφεύγεται η κοπή του αντικειμένου από το δίαυλο έγχυσης, και γίνεται στο άνοιγμα της μήτρας
- ☞ Αυξημένη παραγωγικότητα
- ☞ Λιγότερες απώλειες υλικού
- ☞ Συντομότερος χρόνος έγχυσης
- ☞ Προτείνεται για μορφοποίηση μικρών αντικειμένων (?)
- ☞ Αυξημένο κόστος κατασκευής καλουπιού (30%)

Κλειστικό σύστημα (Clamping unit)

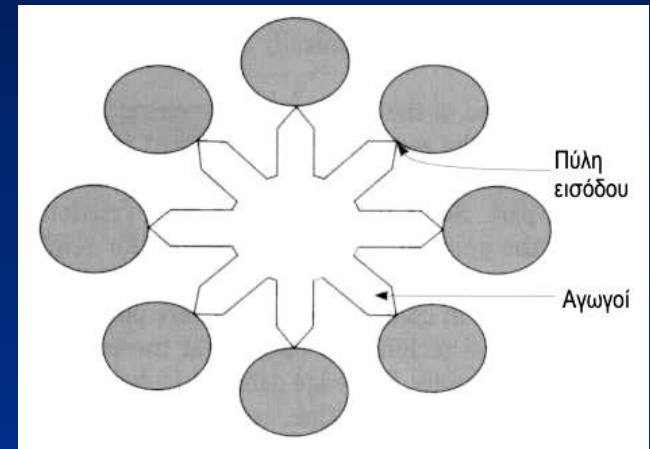
Υδραυλικό ή μηχανικό σύστημα με σκοπό να επιβάλλει αρκετά μεγάλη δύναμη σύσφιξης ώστε να κρατήσει το καλούπι κλειστό και ικανό να αντέξει στις μεγάλες πιέσεις έγχυσης.

$$F = P \times A$$

F: η δύναμη του κλειστικού

A: η συνολική εγκάρσια επιφάνεια των αντικειμένων

P: η πίεση έγχυσης



Συρρίκνωση

Διαστάσεις του τελικού αντικειμένου $\neq$

Διαστάσεις του καλουπιού (λόγω θερμικής συστολής)

Σε υψηλές θερμοκρασίες και για σταθερή πίεση, η πυκνότητα του πολυμερούς είναι χαμηλότερη από την πυκνότητα σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Η πλήρωση της μήτρας γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως κατά την ψύξη, το μορφοποιημένο αντικείμενο συρρικνώνεται (?).

Σε σταθερή θερμοκρασία η πυκνότητα αυξάνει με την αύξηση της πίεσης.



Διατηρώντας για αρκετό διάστημα υψηλή την πίεση έγχυσης, εισέρχεται στην κοιλότητα μεγαλύτερη ποσότητα υλικού μειώνοντας έτσι τη συρρίκνωση.

Συμπύεση (Packing)

Εφαρμόζεται αυξημένη πίεση στο καλούπι κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης:



d ?

Αυξάνει η πυκνότητα του ψυχόμενου πολυμερούς, μείωση όγκου, περισσότερο τήγμα ρέει μέσα στην κοιλότητα για να κρατήσει σταθερό τον όγκο.

Προσθήκη επιπλέον ποσότητας ρητίνης στην κοιλότητα για να περιορισθούν οι μεταβολές στις διαστάσεις (συρρίκνωση) και στο σχήμα (σκέβρωση).

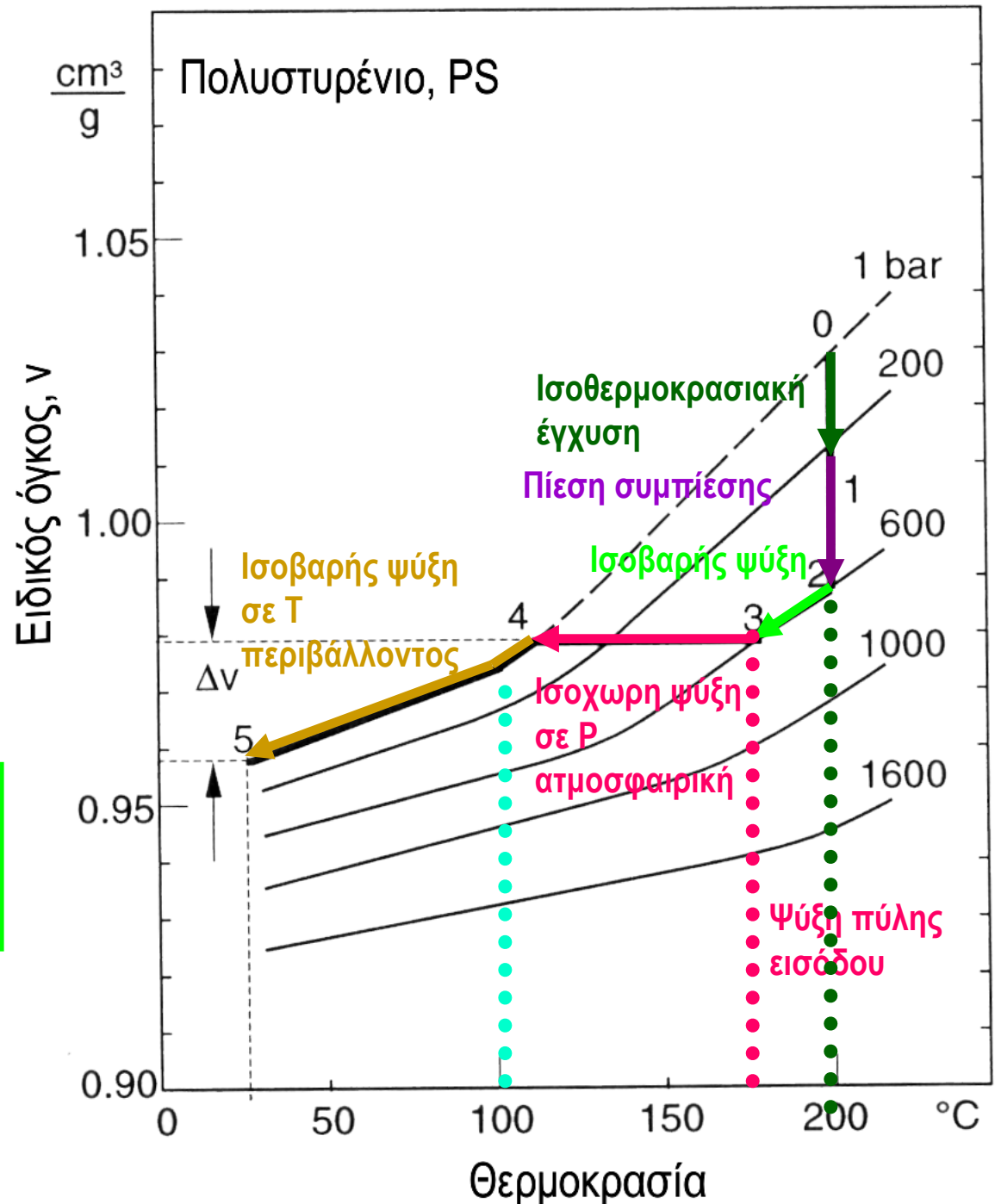
$$V^* = mv$$

V^* όγκος κοιλότητας

$$V = mv_0$$

Υ όγκος
μορφοποιημένου
αντικειμένου σε συνθήκες
αναφοράς

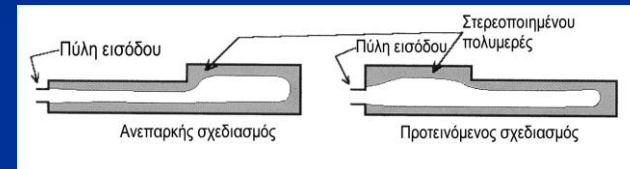
$$(P + \pi)(v - b) = \frac{RT}{M}$$



Η συρρίκνωση εξαρτάται:

- Θερμοκρασία της ρητίνης
- Τύπος πολυμερούς (μοριακή μικροδομή, κρυσταλλικότητα)
- Χρήση προσθέτων στη ρητίνη
- Τη ροή της ρητίνης στην κοιλότητα του καλουπιού
- Παράμετροι λειτουργίας (πίεση έγχυσης, χρόνος άσκησης πίεσης). Η συρρίκνωση ελαχιστοποιείται όταν εφαρμόζονται:
 - Μεγάλοι χρόνοι στους κύκλους έγχυσης
 - Μεγάλες πιέσεις έγχυσης
 - Αύξηση στις διαστάσεις του ανοίγματος της μήτρας/πύλης εισόδου

☞ Η κρυσταλλικότητα αυξάνει τη συρρίκνωση (η αυξημένη σύνδεση και τάξη των μορίων συγκρατεί τα μόρια του πολυμερούς και επιφέρει μεγαλύτερη συρρίκνωση)



Παράμετροι μορφοποίησης με έγχυση

- ☞ Θερμοκρασία τήγματος
- ☞ Θερμοκρασία καλουπιού
- ☞ Πίεση έγχυσης
- ☞ Πίεση συμπίεσης
- ☞ Χρονική διάρκεια διαφόρων φάσεων κατά τον κύκλο μορφοποίησης

Παράμετροι που επηρεάζουν το σύστημα των θερμοκρασιών (τήγμα-καλούπι):

- ☞ Η ποσότητα έγχυσης
- ☞ Ο ρυθμός έγχυσης
- ☞ Το μέγεθος αγωγών έγχυσης (?)
- ☞ Το πάχος του προς μορφοποίηση αντικειμένου

Θερμοκρασία τήγματος

Χαμηλότερη θερμοκρασία τήγματος



Υψηλότερες τιμές ιξώδους τήγματος



Αύξηση των διατμητικών τάσεων



Αύξηση του προσανατολισμού στην κατεύθυνση ροής



Υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό



Θερμοκρασία καλουπιού

Χαμηλή θερμοκρασία



Συντομότερος χρόνος μορφοποίησης

Κρίσιμο σημείο: το άνοιγμα της πύλης εισόδου στην κοιλότητα

Μέγεθος ανοίγματος τέτοιο που να επιτρέπει την καλύτερη ροή στην κοιλότητα στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία.

Πίεση έγχυσης και πίεση Συμπύεσης

- Η χαμηλότερη δυνατή πίεση που δεν οδηγεί σε *ελλιπή πλήρωση* του καλουπιού
- Αρκετά υψηλή για να περιορισθεί η *συρρίκνωση* του αντικειμένου
- Αυξημένη πίεση βοηθά την προσέγγιση των μοριακών αλυσίδων και την πιθανότητα για ανάπτυξη *κρυσταλλικής δομής*.

Περιορισμοί:

- i. Η δυναμικότητα της μονάδας έγχυσης και του κλειστικού συστήματος της μηχανής
- ii. Η κατασκευή του καλουπιού

Χρόνος & ρυθμός έγχυσης

Ο χρόνος που το τήγμα γεμίζει το καλούπι εξαρτάται από:

- ☞ τη γεωμετρία του αντικειμένου
- ☞ το μέγεθος του ανοίγματος της μήτρας
- ☞ το ιξώδες του τήγματος

Χρόνος συμπίεσης

Ο χρόνος που εφαρμόζεται πίεση στο καλούπι μετά από την πλήρωσή του.

Χρόνος ψύξης

Ο χρόνος από τη στιγμή που δεν εξασκείται καμία πίεση μέχρι το άνοιγμα του καλουπιού.

Εξαρτάται από το πάχος του αντικειμένου. Διαρκούν από 10-100s.

- Σύντομος χρόνος ψύξης
Αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας



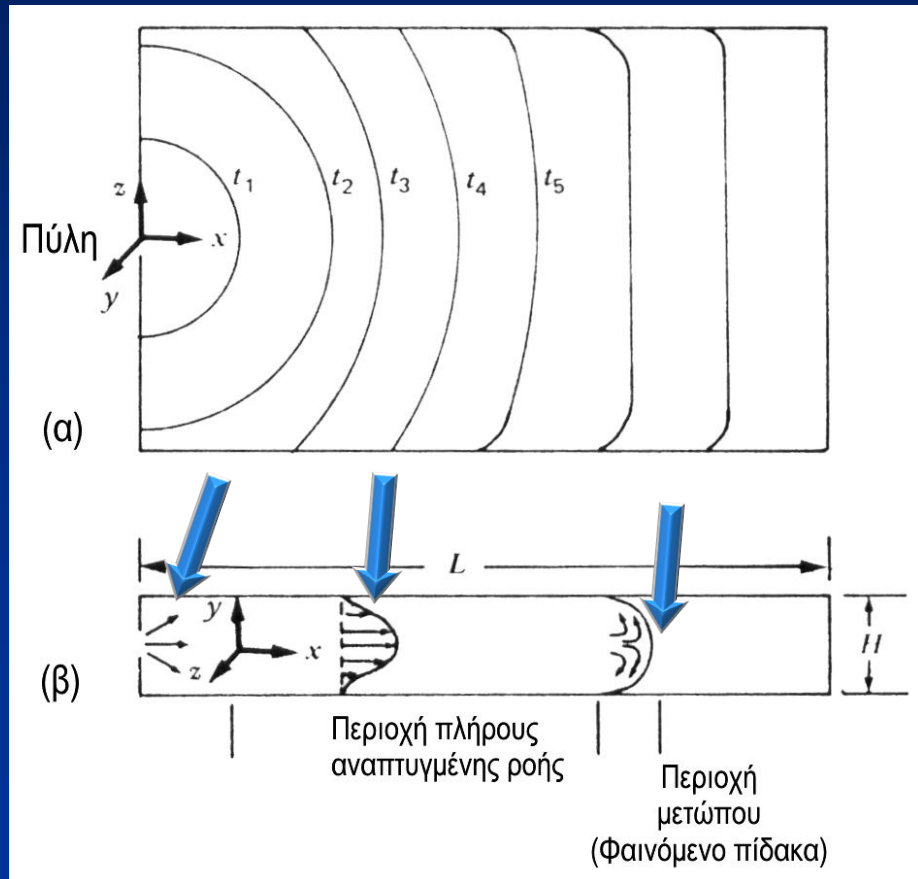
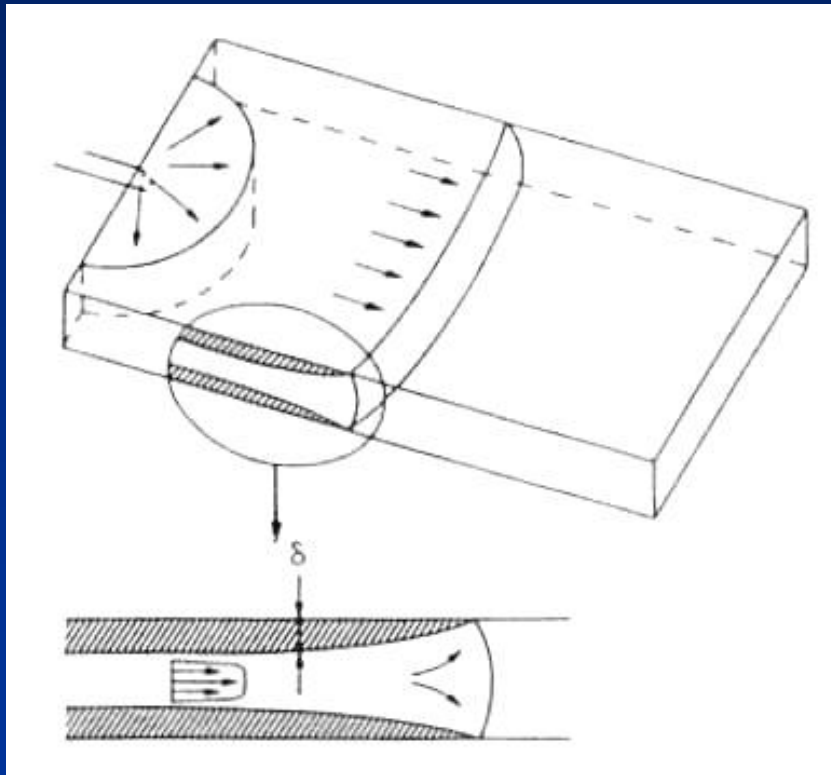
Μικρότερο ποσοστό κρυσταλλικότητας

Χρόνος εξώλκευσης

Φαινόμενο πίδακα (Fountain effect)

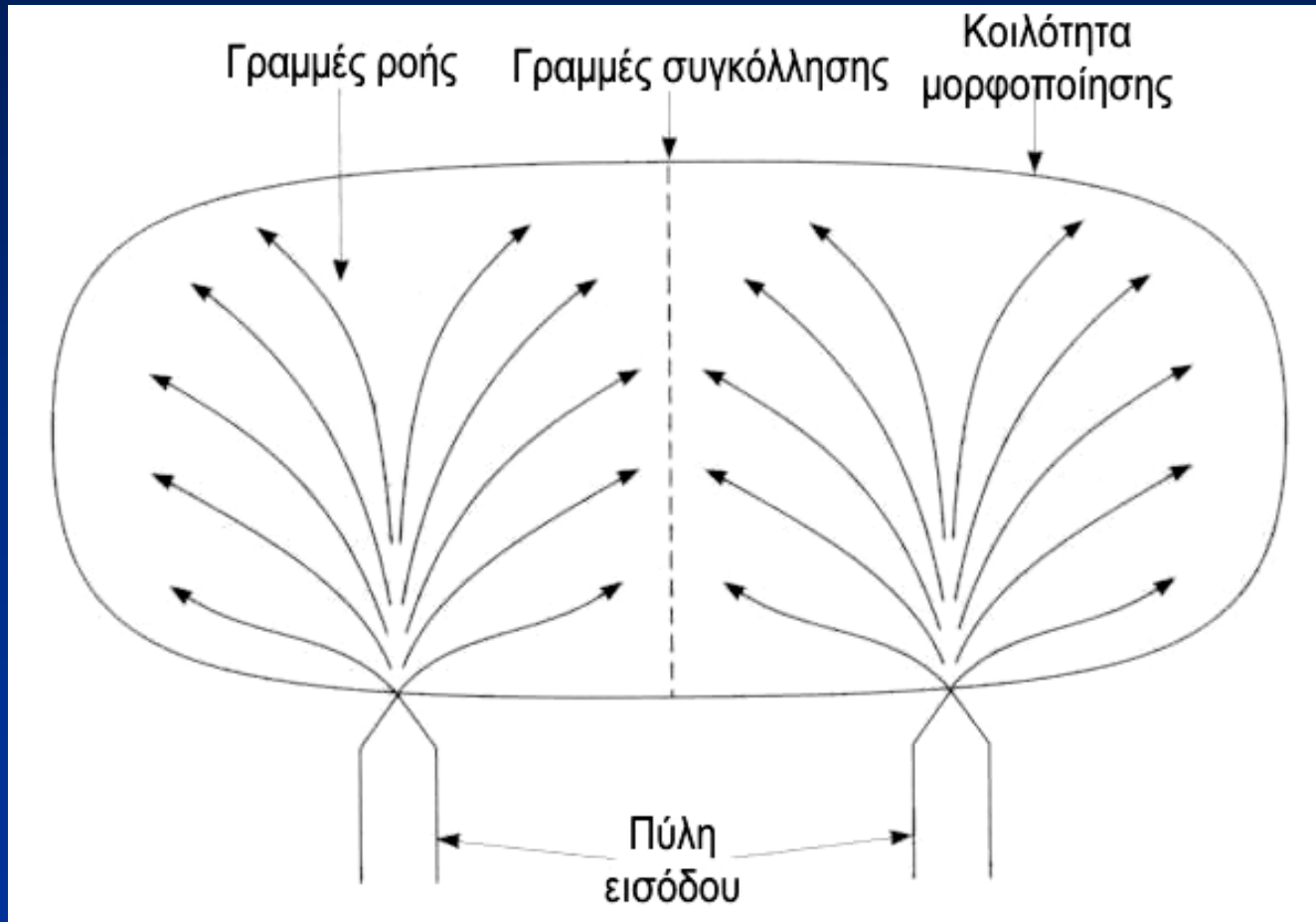
Στην ορθογώνια κοιλότητα το πολυμερικό τήγμα εγχύεται από την πύλη εισόδου, εισέρχεται στην κοιλότητα υπό πίεση και τη γεμίζει με την πάροδο του χρόνου προχωρώντας μετωπικά.

Το μέτωπο είναι μια ελεύθερη επιφάνεια με χαρακτηριστικά *πίδακα*.



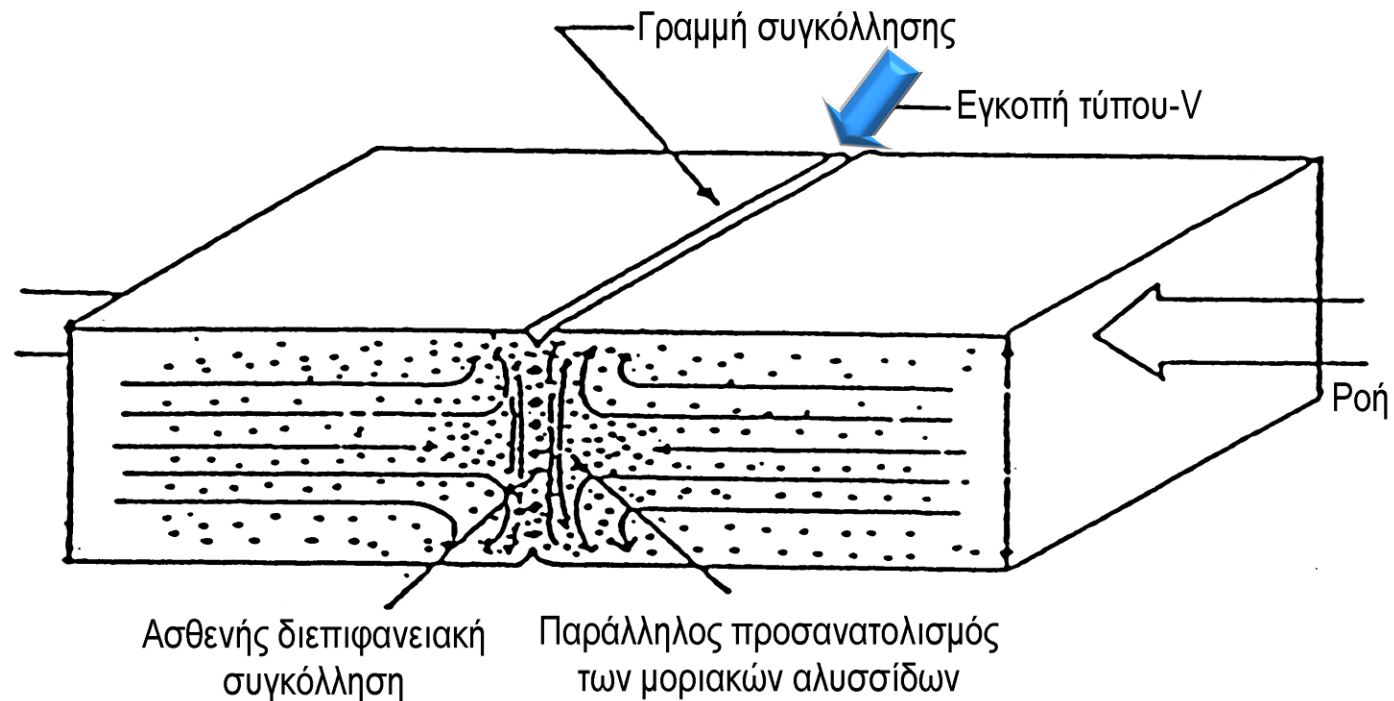
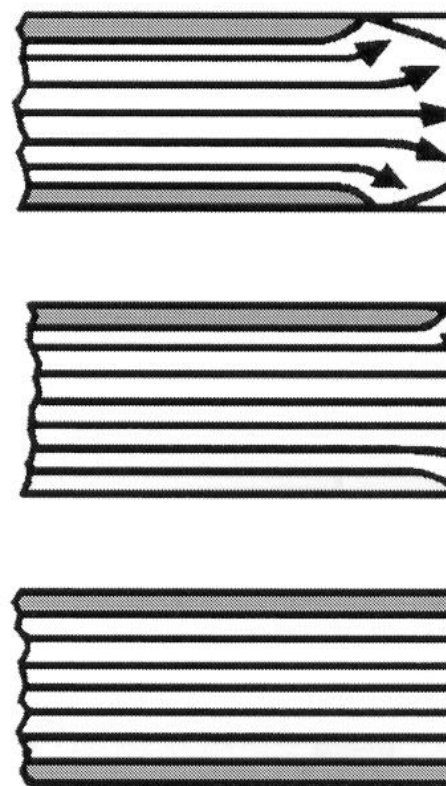
Γραμμές συγκόλλησης (weld lines)

Το σημείο που συναντούνται τα διαφορετικά πεδία ροής δημιουργείται η γραμμή συγκόλλησης με πιθανή εμφάνιση υποδεέστερων μηχανικών ιδιοτήτων.

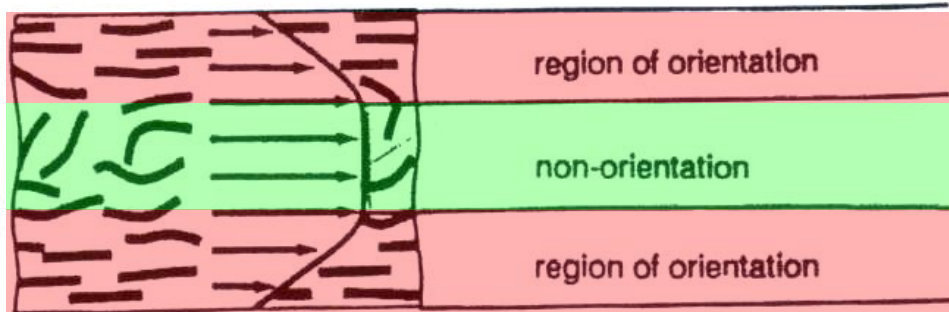


Οι γραμμές συγκόλλησης είναι γραμμές αδυναμίας λόγω:

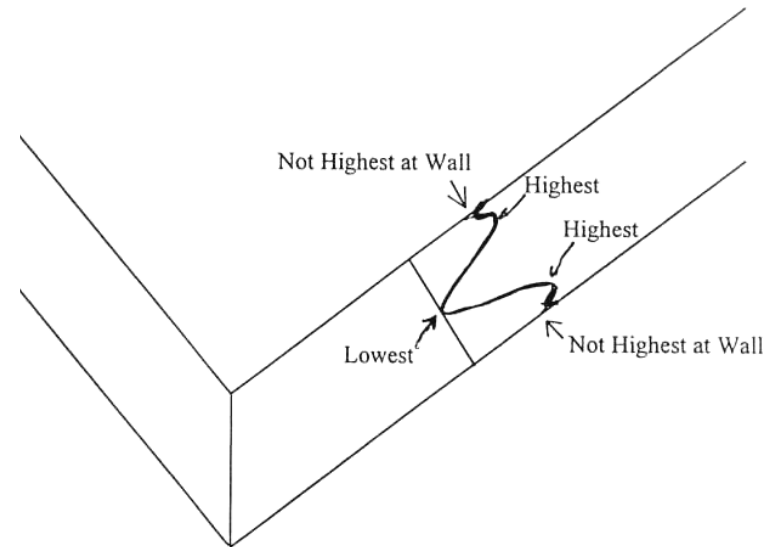
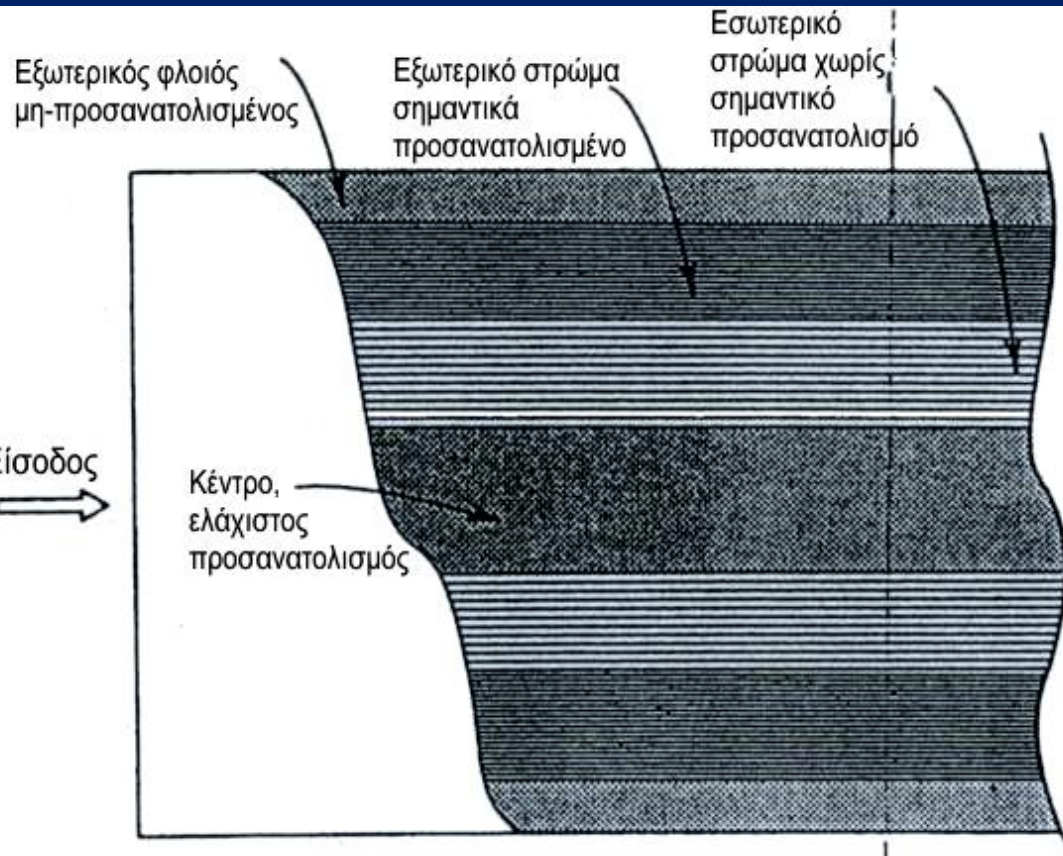
- i. Ατελών ή ανεπαρκών διεπιφανειακών συνδέσεων
- ii. Εγκλωβισμού παράλληλα στη ροή προσανατολισμού των μορίων λόγω ψύξης
- iii. Επιφανειακών ατελειών που σχηματίζουν μορφές τύπου "V" κοντά στην τριεπιφάνεια μεταξύ των δύο μετώπων

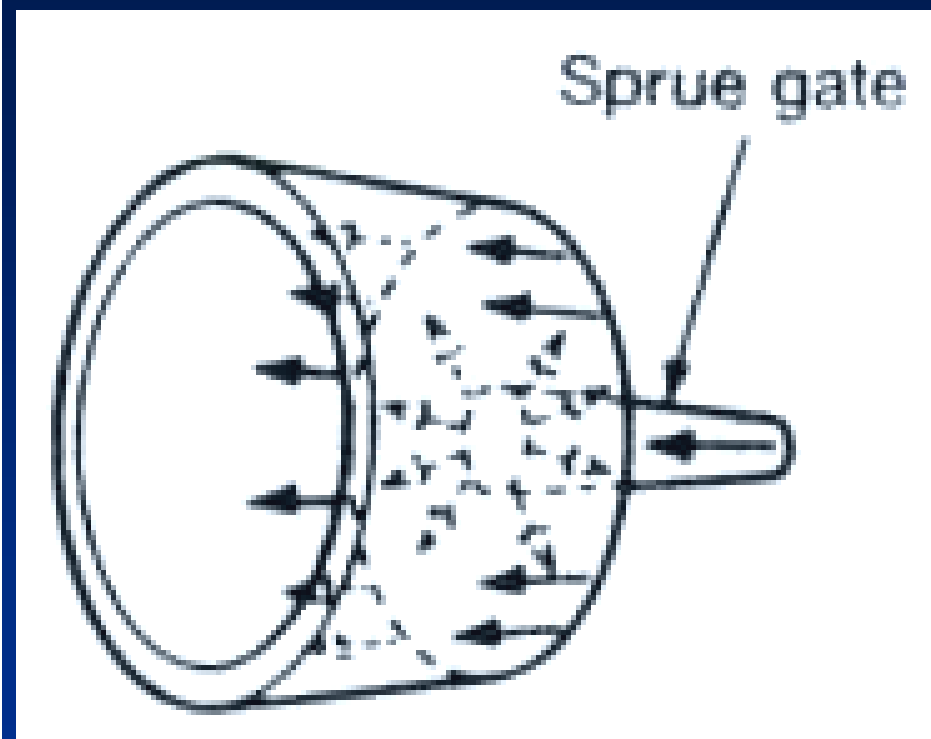
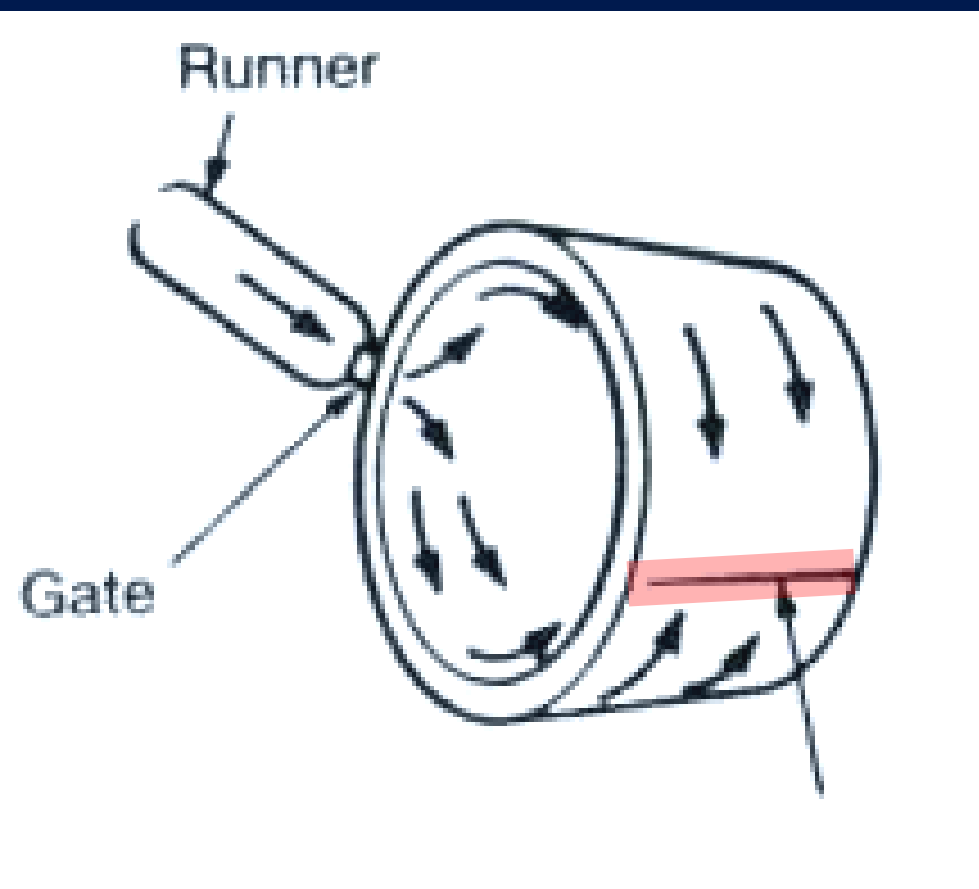


FLOW ORIENTATION

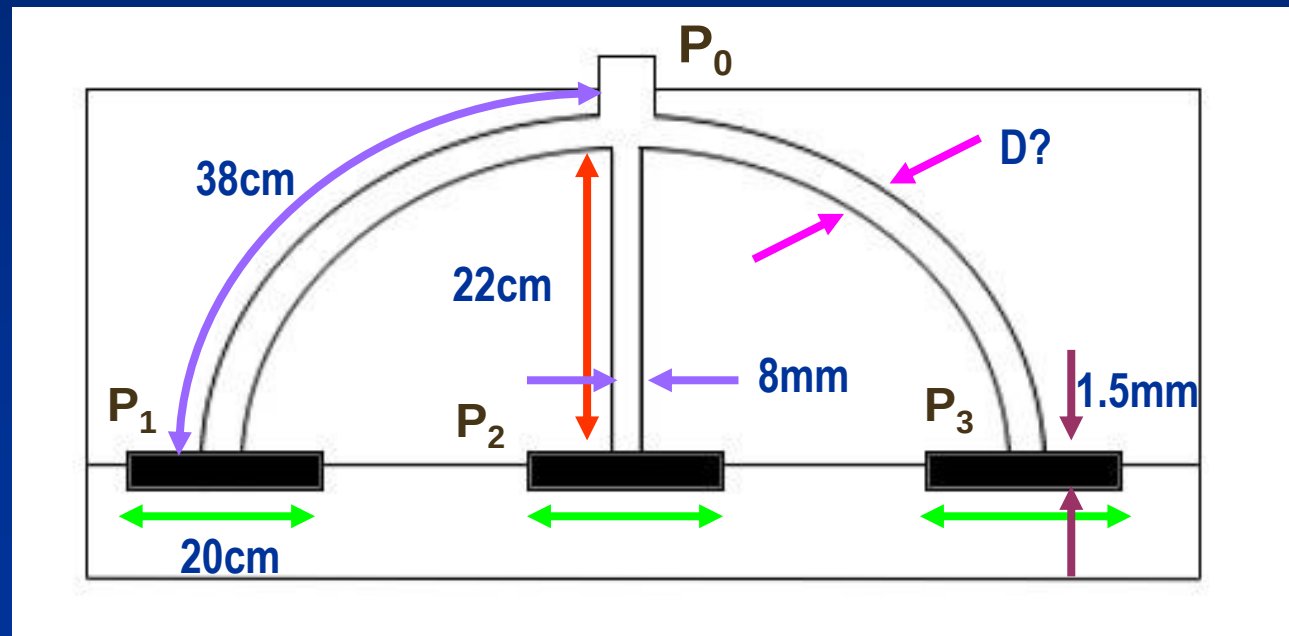


Μορφολογία skin-core



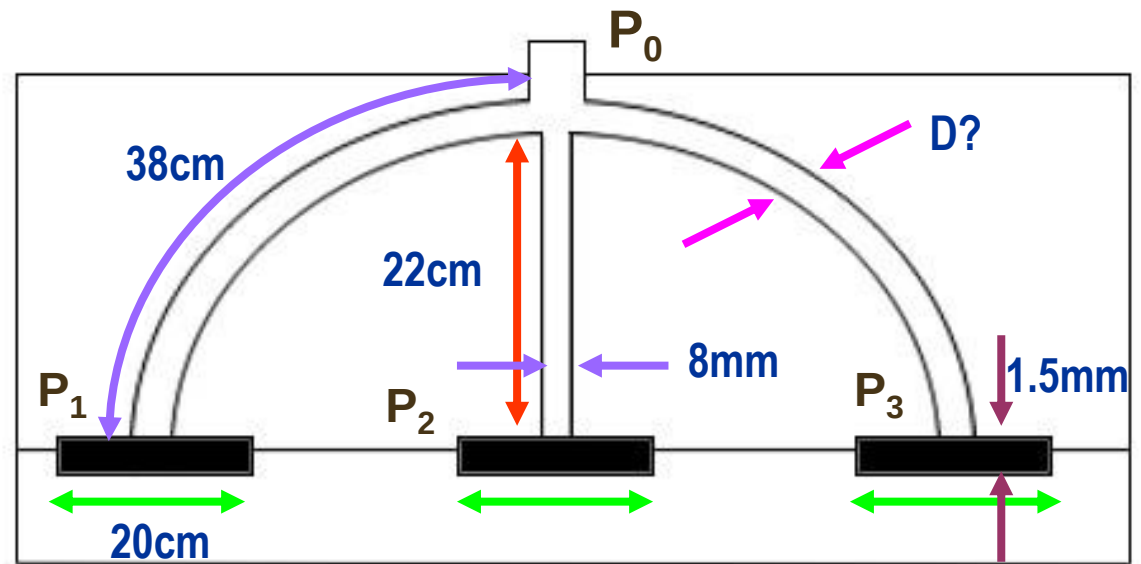


Πρόκειται να σχεδιασθεί καλούπι τριών κοιλοτήτων για την ταυτόχρονη παραγωγή τριών ίδιων αντικειμένων με σχήμα δίσκου με την τεχνική της έγχυσης. Οι δίσκοι έχουν διάμετρο 20 cm και πάχος 1.5 mm. Οι αγωγοί διανομής πρέπει να έχουν τη διάταξη που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Ο κεντρικός αγωγός έχει διάμετρο 8 mm και μήκος 22 cm. Οι πλευρικοί αγωγοί έχουν το ίδιο μήκος 38 cm και πρέπει να είναι ισοζυγισμένοι με τον κεντρικό αγωγό διανομής, ώστε να παράγονται αντικείμενα με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Η πλήρωση των κοιλοτήτων μορφοποίησης πρέπει να ολοκληρώνεται σε 1.2 s. Το ιξώδες του πολυμερικού τήγματος να θεωρηθεί σταθερό με τιμή 31.05 Pa·s.



$$\mu = 31.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$t = 1.2 \text{ s}$$



$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{\Delta P}{L}$$

$$\Delta P = \frac{8Q\mu L}{\pi R^4}$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_3$$

$$Q = \frac{V_{(\text{κοιλότητα})}}{\text{χρόνος πλήρωσης}} = \frac{\pi R_{\kappa}^2 \cdot \text{πάχος}}{t} =$$

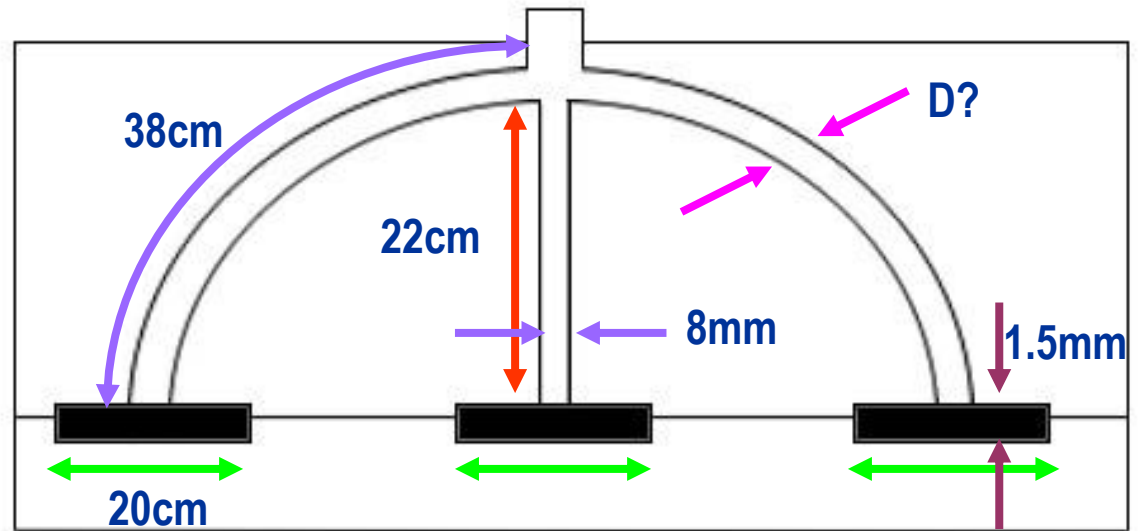
$$\frac{\pi(0.1)^2 \cdot 1.5 \times 10^{-3}}{1.2} \Rightarrow Q = 3.927 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\Delta P = \frac{8Q\mu L}{\pi R^4}$$

$$L = 0.22\text{m}$$

$$R = 4 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$\mu = 31.05 \text{Pa} \cdot \text{s}$$



$$\Delta P = \frac{8 \cdot 3.927 \times 10^{-5} \cdot 31.05 \cdot 0.22}{\pi (4 \times 10^{-3})^4} \Rightarrow \Delta P = 2.7 \text{MPa}$$

$$R^4 = \frac{8Q\mu L}{\pi \Delta P} = \frac{8 \cdot 3.927 \times 10^{-5} \cdot 31.05 \cdot 0.38}{\pi \cdot 2.67 \times 10^6} \Rightarrow R = 4.58 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$D = 9.2 \times 10^{-3} \text{m}$$