



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. ΕΚΒΟΛΗ

Πετρούλα Ταραντίλη

Καθηγήτρια ΕΜΠ, taran@chemeng.ntua.gr

Ακαδημαϊκό έτος 2025-2026

Τεχνικές Επεξεργασίας-Μορφοποίησης θερμοπλαστικών πολυμερών



- Εκβολή (Extrusion)



- Έγχυση (Injection)



- Προσθετική κατασκευή (3-D printing)



- Μόρφωση με φύσημα (blow molding)



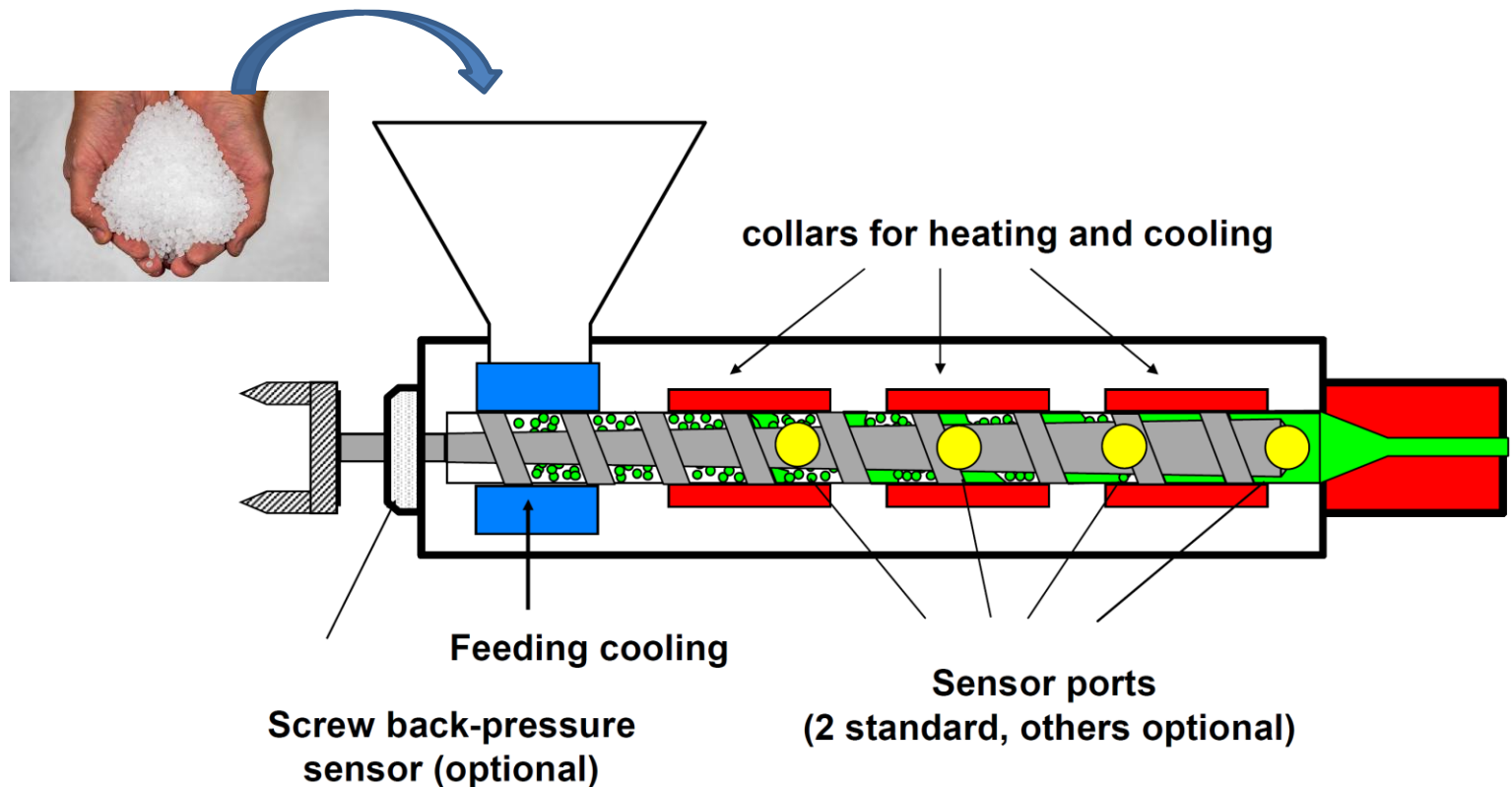
- Περιστροφική μόρφωση (rotational molding)



- Θερμομόρφωση (thermoforming)

Τι είναι εκβολή (extrusion)?

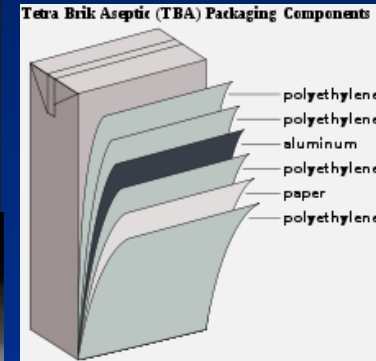
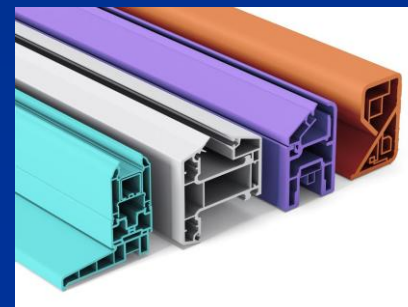
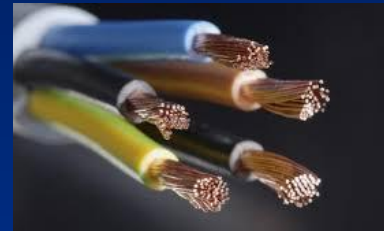
- Συνεχής διεργασία με μεγάλη ευελιξία όσον αφορά στο τελικό προϊόν
- Τηγμένο υλικό συμπιέζεται συνεχώς μέσω μιας μήτρας (die) συγκεκριμένου μεγέθους και σχήματος → συνεχής παραγωγή προϊόντων με ομοιόμορφη διατομή



Εκβολή (extrusion)

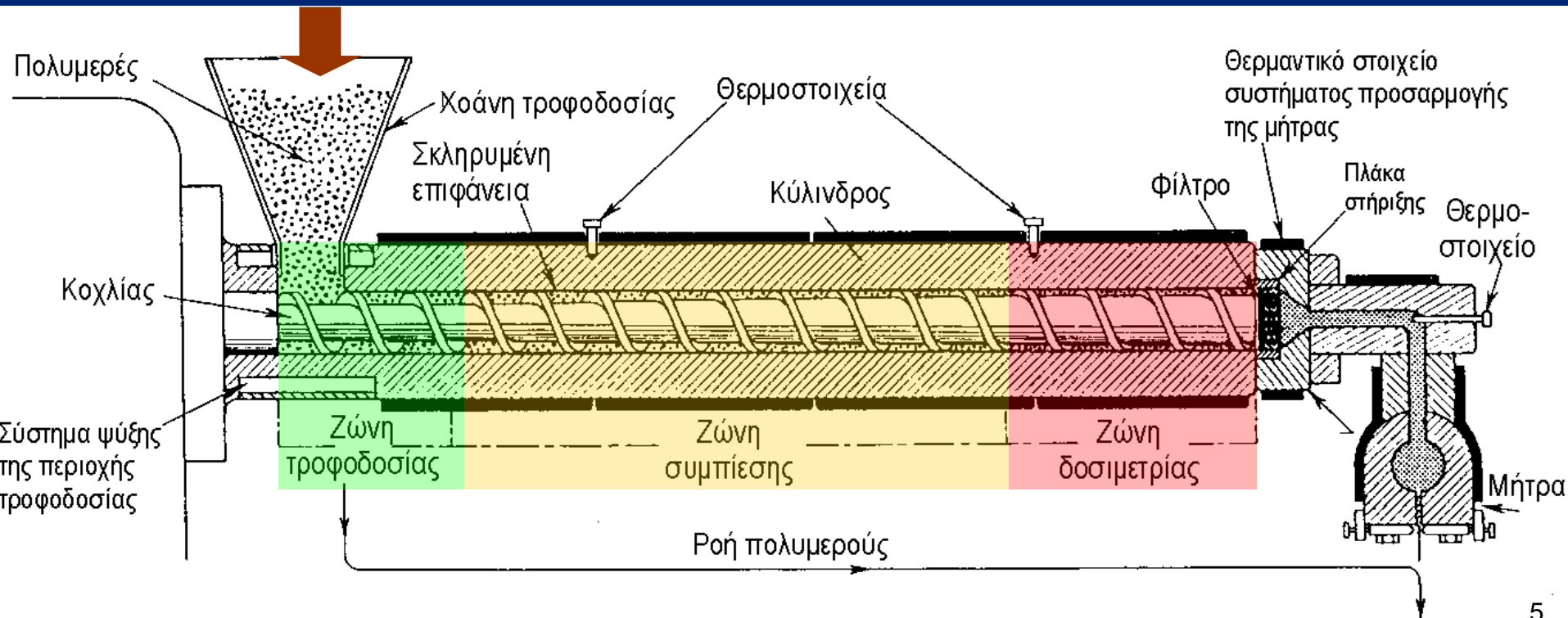
Εφαρμογές:

1. Παραγωγή ινών
2. Παραγωγή σωλήνων
3. Επικάλυψη καλωδίων
4. Παραγωγή φιλμ με εκβολή και φύσημα
5. Παραγωγή φιλμ με εκβολή από μήτρα επίπεδης σχισμής
6. Παραγωγή προφίλ
7. Compounding (μίγματα προσθέτων για τροποποίηση πολυμερών)



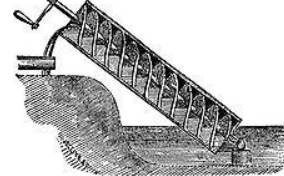
ΕΚΒΟΛΗ (EXTRUSION)

- Τεχνική ανάμειξης πολυμερών
- Τεχνική ανάμειξης πολυμερούς + προσθέτων (compounding)
- Τεχνική μορφοποίησης: αντικειμένων με ομοιόμορφη διατομή
→ με αλλαγή της μήτρας μπορούν να μορφοποιηθούν προϊόντα με διαφορετικές γεωμετρίες
- Χρησιμοποιείται επίσης στη **μηχανική ανακύκλωση των θερμοπλαστικών** → ανάτξη πλαστικών απορριμμάτων





Τι είναι εκβολή (extrusion)?



- Αρχή μεταφοράς/ροής υλικού: **Κοχλίας του Αρχιμήδη (Archimides screw)**.
- Η τριβή μεταξύ της επιφάνειας του κοχλία και του εσωτερικού τοιχώματος του κυλίνδρου προκαλεί διάτμηση του υγρού και τη ροή του



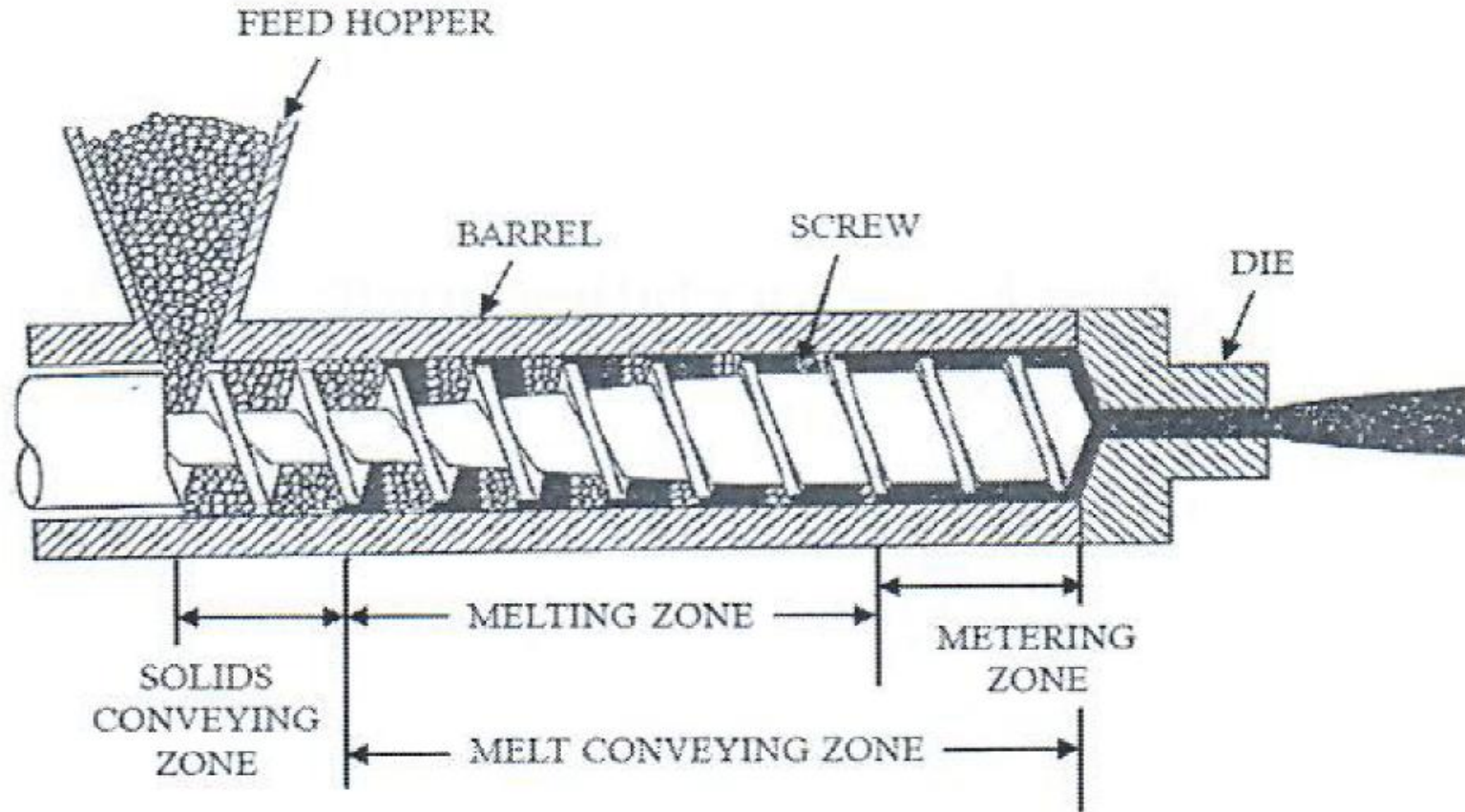
Εκβολή - video

https://www.youtube.com/watch?v=qn16JtE_vLc

<https://www.youtube.com/watch?v=Tp2Rdx69SSo>

https://www.youtube.com/watch?v=WaB-dsB1Kfk&list=PLpL9tJRpo7WV7LkIJGLo6Q_vpaRfENGt-&index=4

Κύριο σώμα εκβολέα: κύλινδρος + κοχλίας

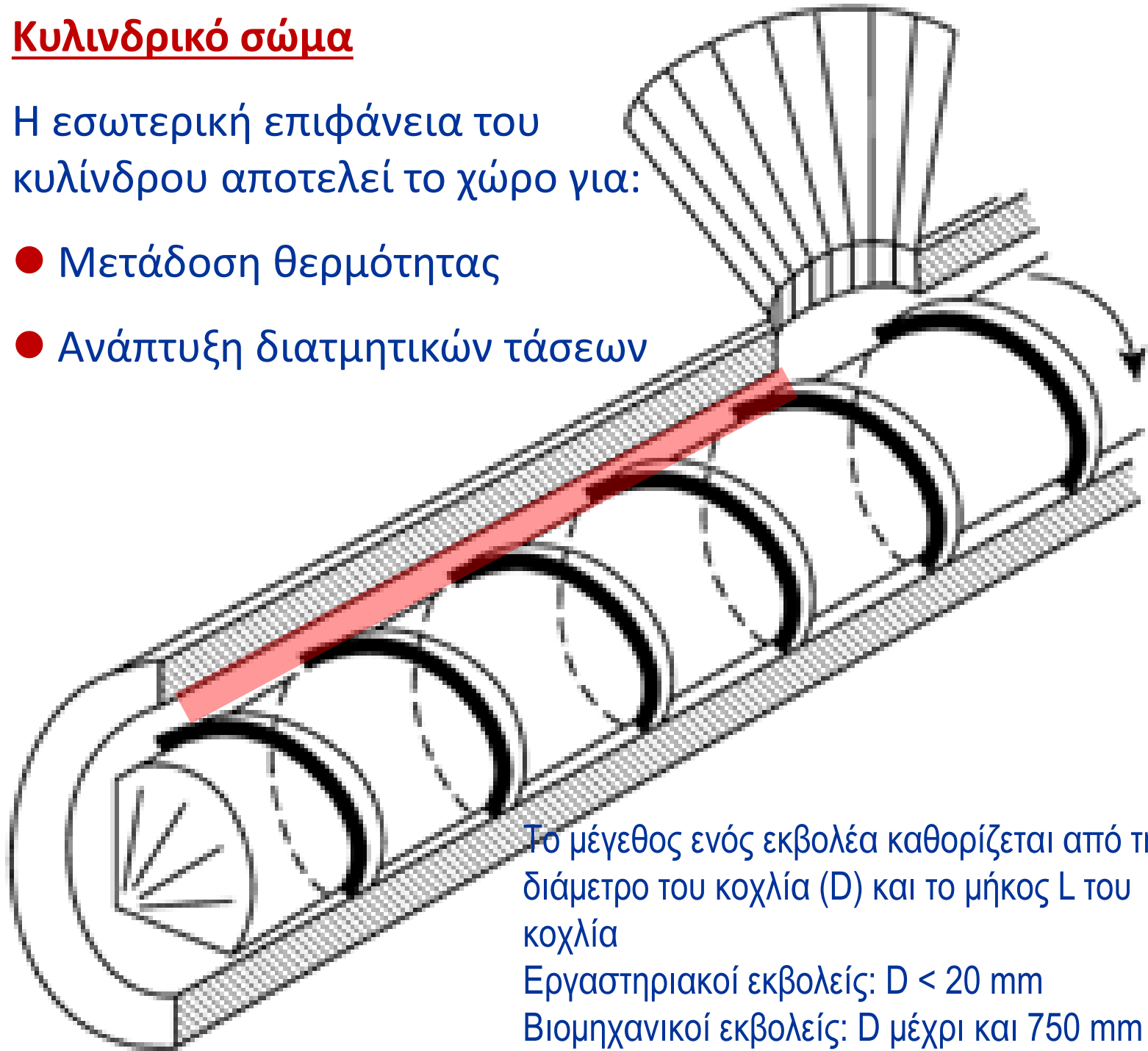


Σύστημα μεταφοράς θερμότητας και ελέγχου θερμοκρασίας, που αποτελείται από θερμαντικά στοιχεία ηλεκτρικής αντίστασης, σύστημα ψύξης στην τροφοδοσία και έναν αριθμό θερμοστοιχείων, τα οποία είναι συνδεδεμένα με κατάλληλους ρυθμιστές ώστε να γίνεται η θέρμανση του κυλίνδρου ανά ζώνες.

Κυλινδρικό σώμα

Η εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου αποτελεί το χώρο για:

- Μετάδοση θερμότητας
- Ανάπτυξη διατμητικών τάσεων



Το μέγεθος ενός εκβολέα καθορίζεται από τη διάμετρο του κοχλία (D) και το μήκος L του κοχλία

Εργαστηριακοί εκβολείς: $D < 20 \text{ mm}$

Βιομηχανικοί εκβολείς: D μέχρι και 750 mm

Μονοκόχλιος εκβολέας Εργαστ. “Τεχνολογίας Πολυμερών”

Brabender Plasti-Corder PLE 330

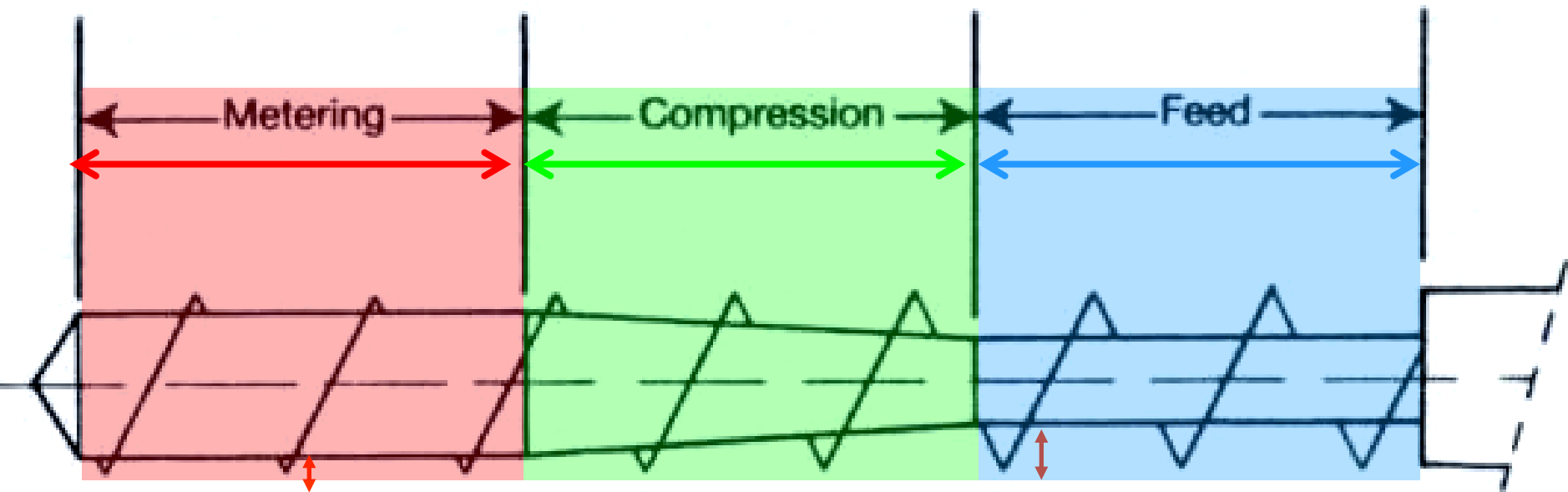


$L/D = 25:1$ ($L=500$ mm, $D=20$ mm)

- 3 ζώνες θέρμανσης και 1 ζώνη για τη μήτρα
- Μήτρα με κυκλική σχισμή (διάκενο δακτυλίου) → παραγωγή φιλμ με εκβολή και φύσημα



- Μήτρα κυκλικής διατομής διαμέτρου: 2 mm



Χαρακτηριστικά μεγέθη:

➤ **L/D**

16/1 μέχρι 32/1 για θερμοπλαστικά

4/1 μέχρι 7/1 για ελαστομερή

Λόγος συμπίεσης =
$$\frac{\text{Βάθος αύλακας στη ζώνη τροφοδοσίας}}{\text{Βάθος αύλακος στη ζώνη δοσιμετρίας}}$$

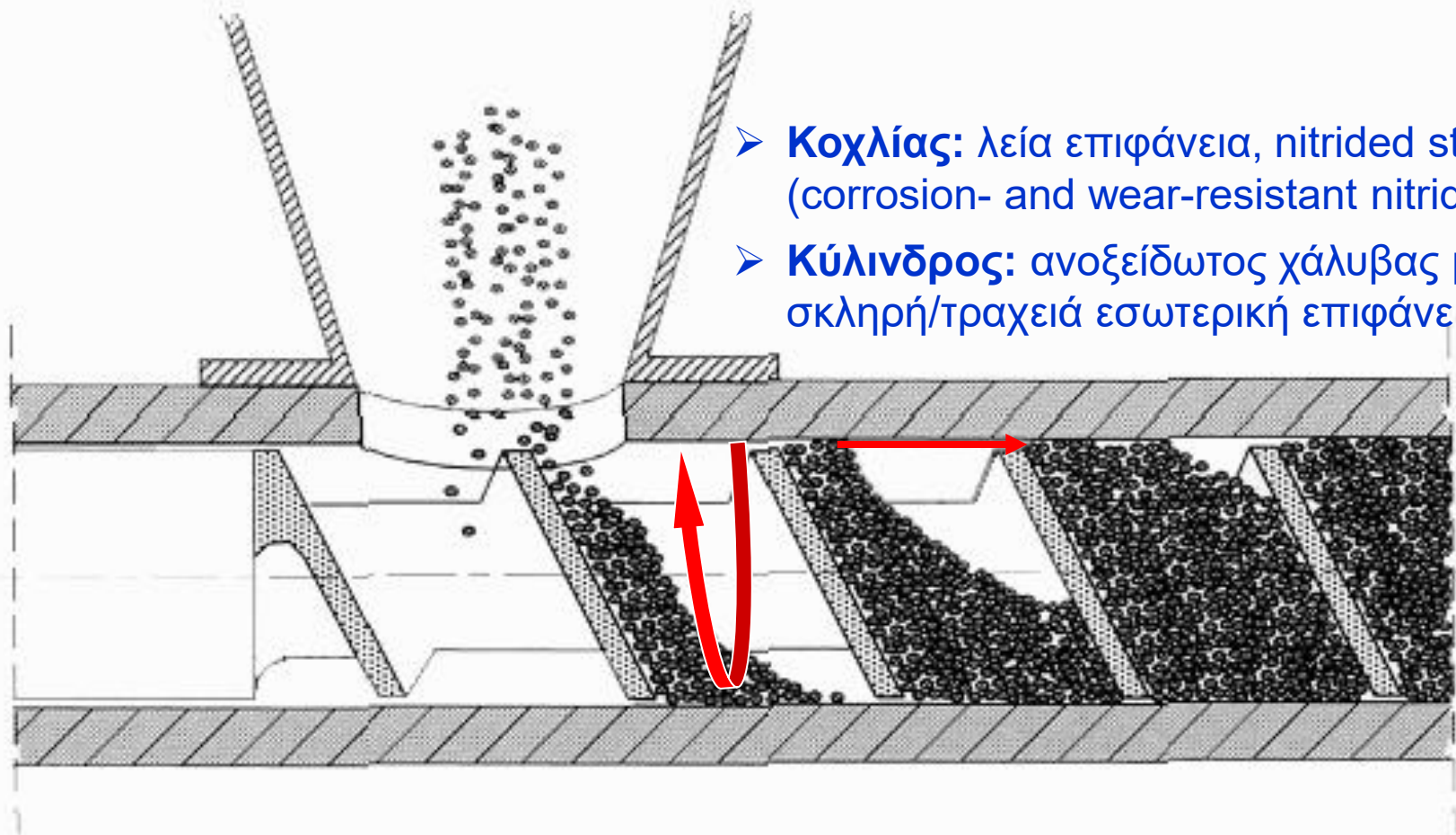
1.1:1 μέχρι 5:1, τυπική τιμή 2.25:1

- Απομάκρυνση αέρα από άνοιγμα τροφοδοσίας
- Βελτίωση μεταφοράς θερμότητας (→ μείωση πάχους υλικού)

Ζώνη τροφοδοσίας (feed section)

Ταχύτερη μεταφορά κόκκων προς την έξοδο:

- Μικρότερη τριβή μεταξύ κοχλίας και κόκκων
- Μεγαλύτερη τριβή μεταξύ κόκκων και κυλίνδρου



- **Κοχλίας:** λεία επιφάνεια, nitrided steel (corrosion- and wear-resistant nitride layer)
- **Κύλινδρος:** ανοξείδωτος χάλυβας με σκληρή/τραχειά εσωτερική επιφάνεια

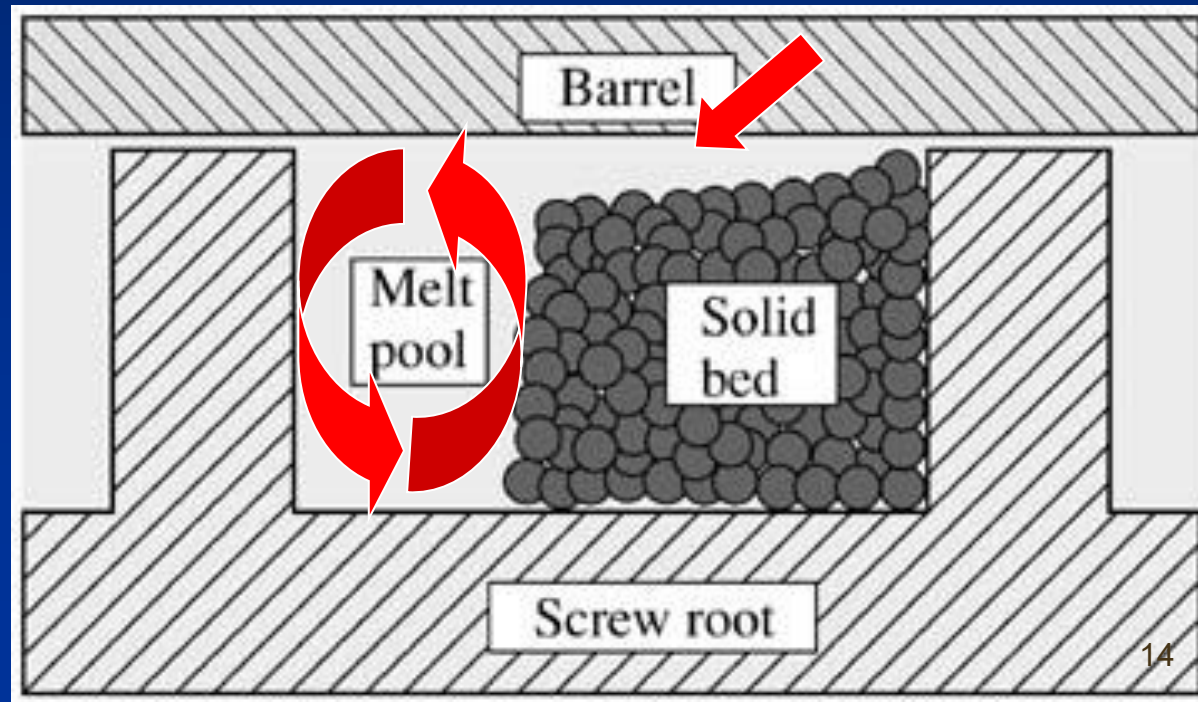
Ζώνη τήξης ή συμπίεσης (melting, compression section)

Μηχανισμός τήξης κατά την εκβολή

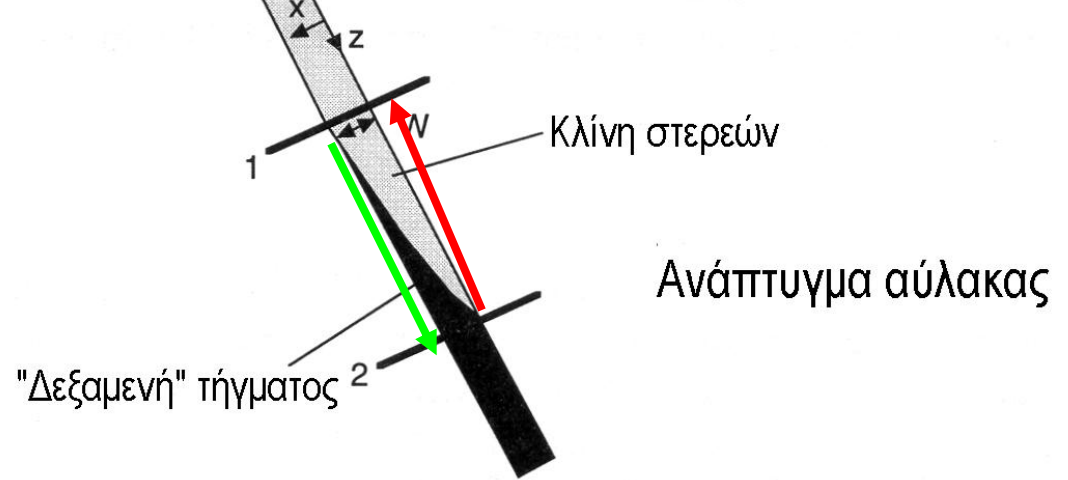
I. Θεωρητικό μοντέλο τήξης κλίνης στερεών σωματιδίων

- ❖ Σχηματισμός λεπτού υμένα από τήγμα στην επιφάνεια του κυλίνδρου.
- ❖ Ο κοχλίας «σκουπίζει» το υμένιο προς τον άξονα του κοχλία και ξανά προς τον κύλινδρο.
- ❖ Με την περιστροφή του κοχλία συμπαρασύρεται και νέο τήγμα

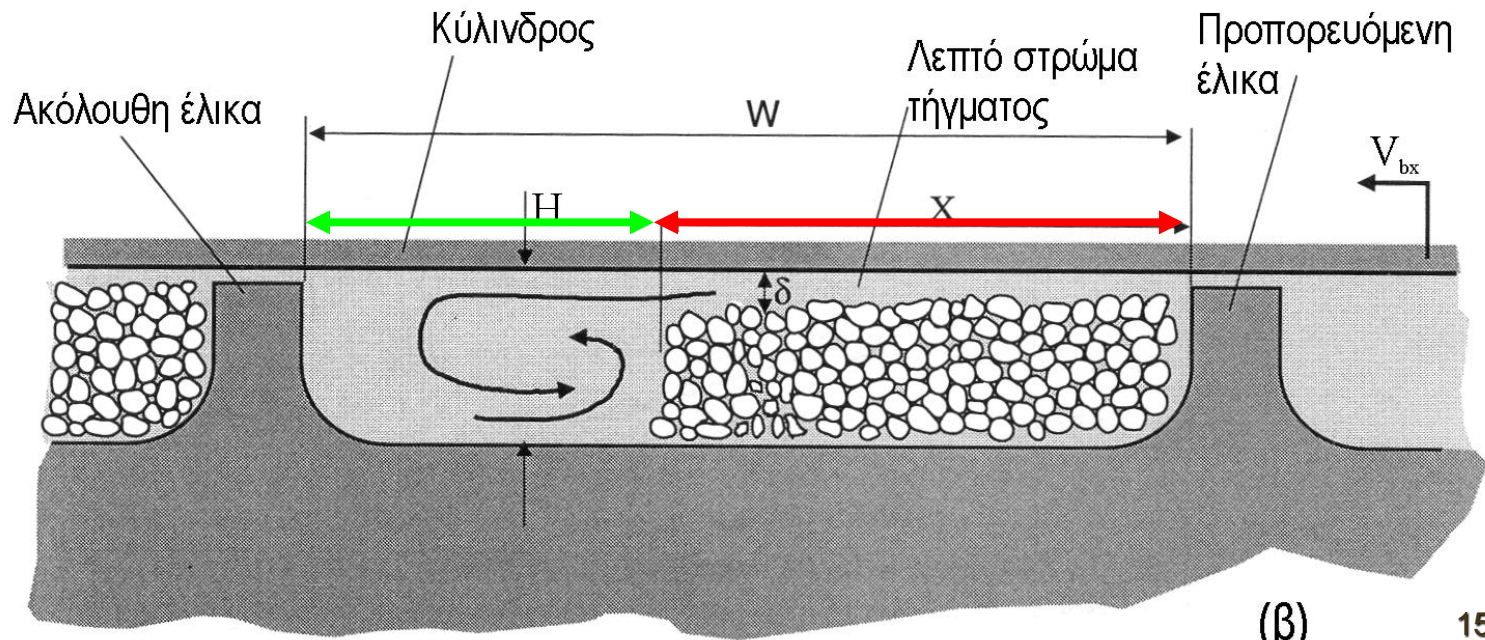
Δημιουργείται δεξαμενή τήγματος μέσα στην οποία συμπαρασύρονται και στερεοί κόκκοι.



Ζώνη τήξης ή συμπίεσης (melting, compression section)

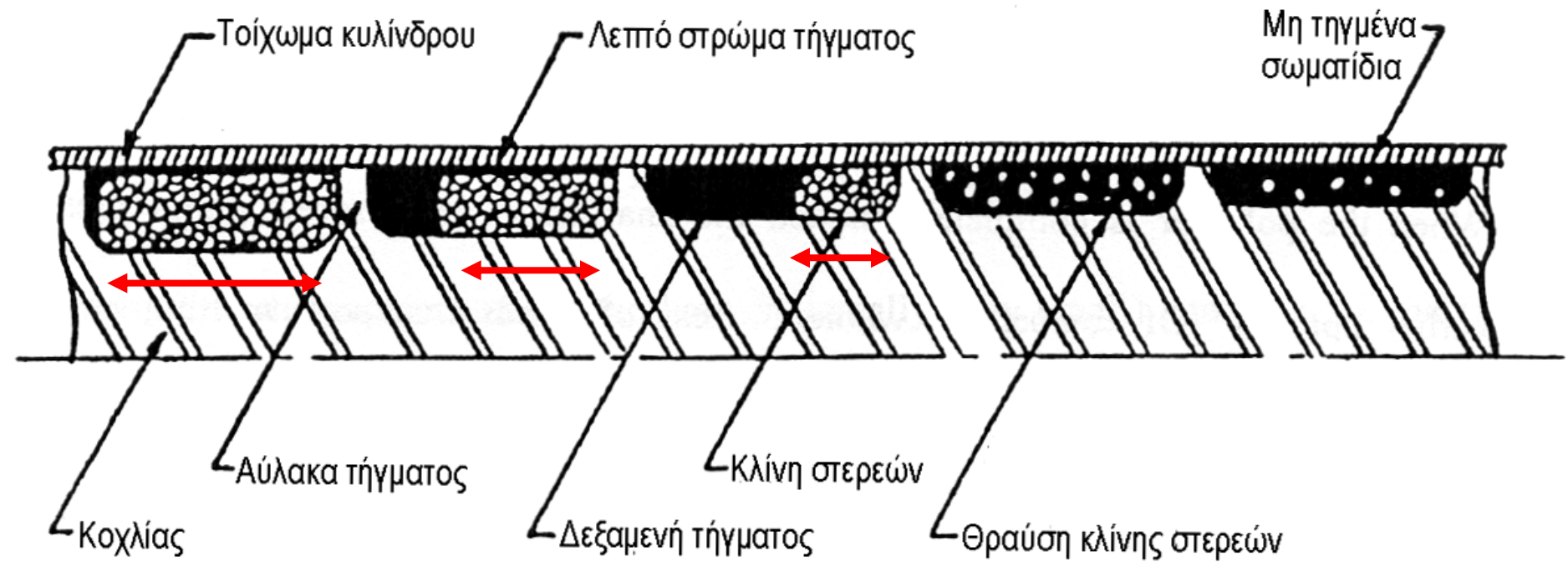


(α)

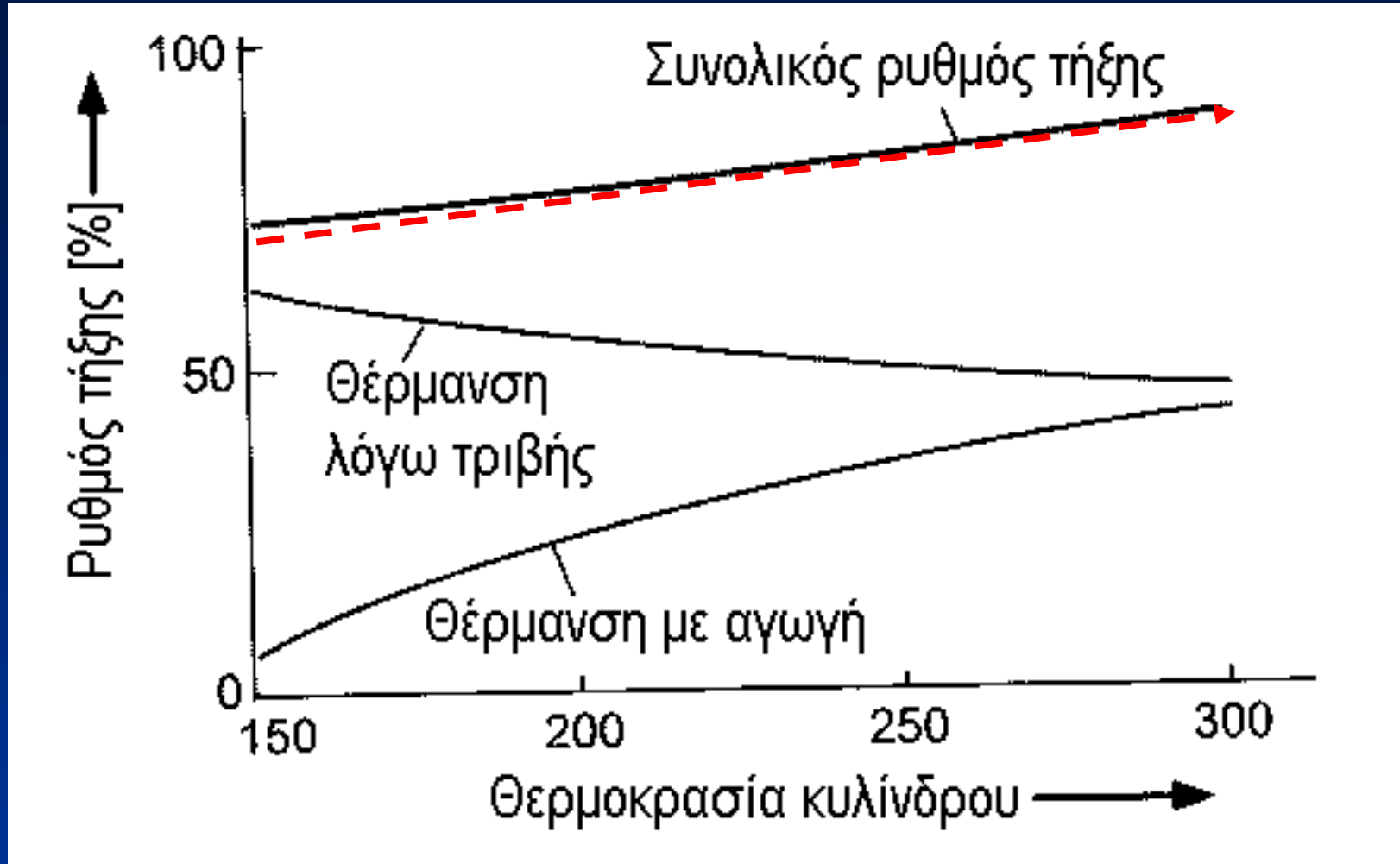


(β)

Ζώνη τήξης ή συμπίεσης (melting, compression section)



Ρύθμιση θερμοκρασιών κατά μήκος του κυλίνδρου του εκβολέα

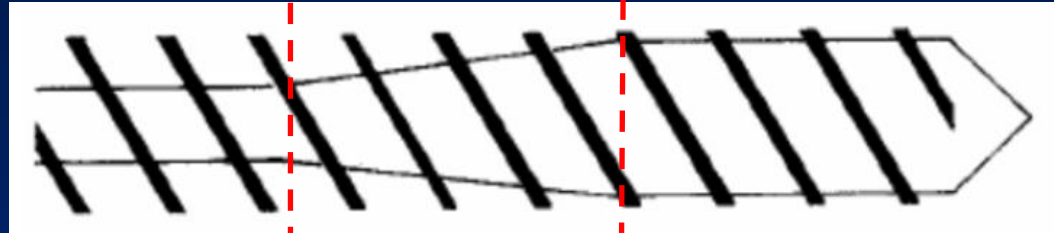


➤ Προφίλ θερμοκρασιών: αύξηση T από τροφοδοσία προς ζώνη δοσιμετρίας ή και το ανάποδο σε περίπτωση που έχουμε έντονη αύξηση της θερμοκρασίας από την ιξώδη θερμότητα

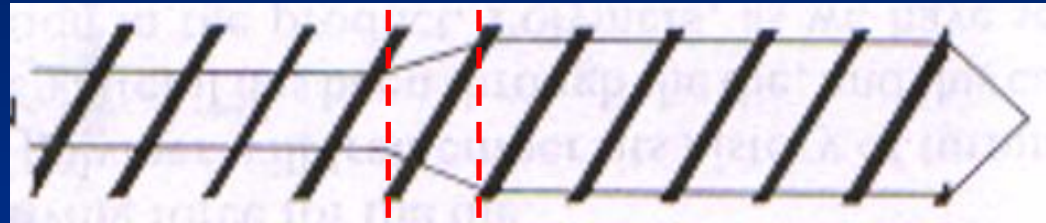
Μήκος ζωνών του κοχλία

➤ Το μήκος των ζωνών του κοχλία εξαρτάται από το υλικό

- LDPE λιώνει σταδιακά → το συνολικό μήκος του κοχλία μπορεί να ισοχωριστεί στις τρεις ζώνες



- Πολυαμίδιο (nylon) λιώνει απότομα → μικρή ζώνη συμπίεσης (ένα μόνο βήμα της έλικας του κοχλία)



- PVC είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο θερμικά → μια ζώνη συμπίεσης που καλύπτει σχεδόν όλο το μήκος του κοχλία



Rheomex Application

Extruders are generally used to:

- transport material
- plasticize
- compress
- homogenize
- compound
- vent
- chemical reaction
- building up pressure

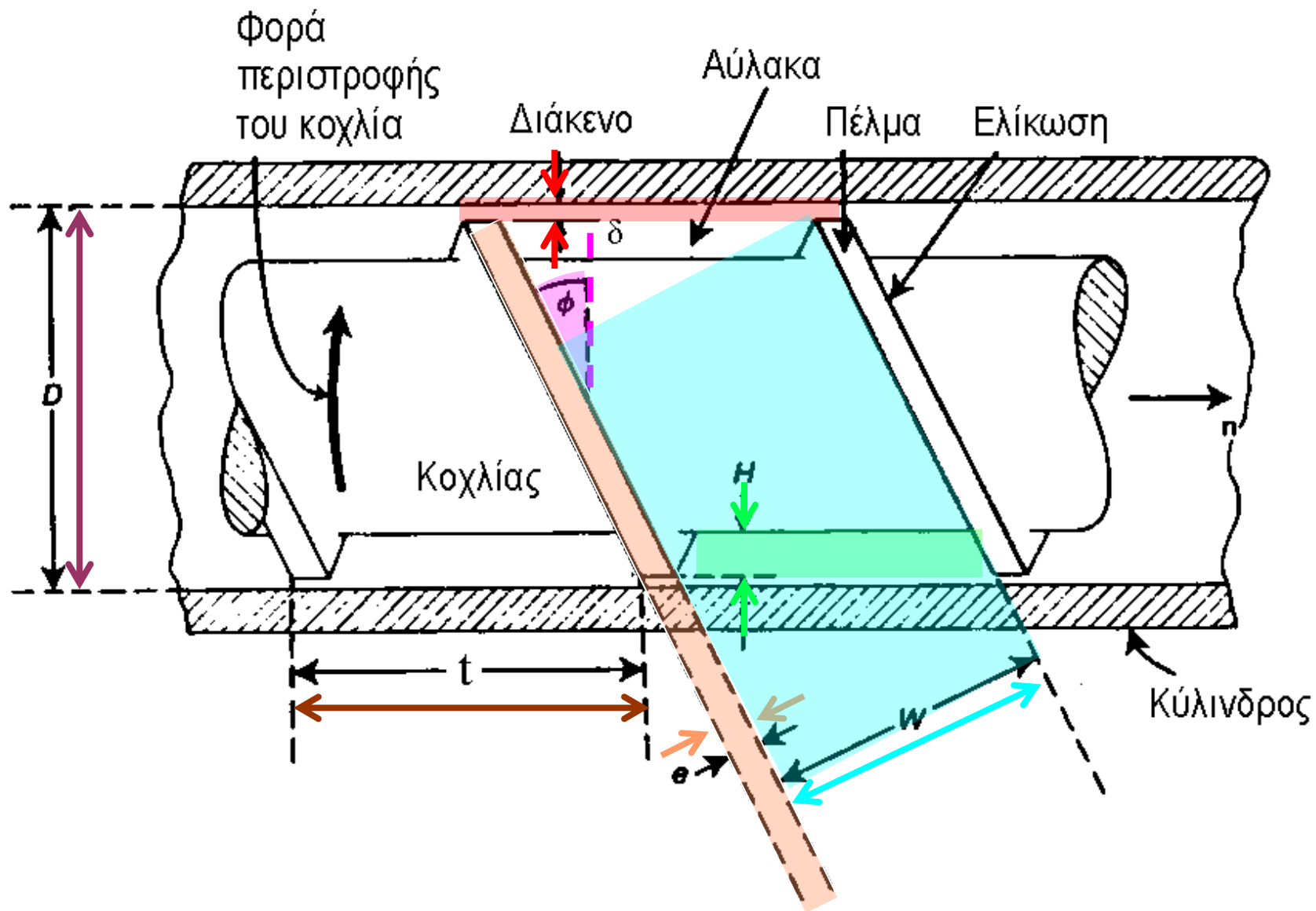


SCREW ELEMENT COMBINATION



kneading mixing element

Conveying element



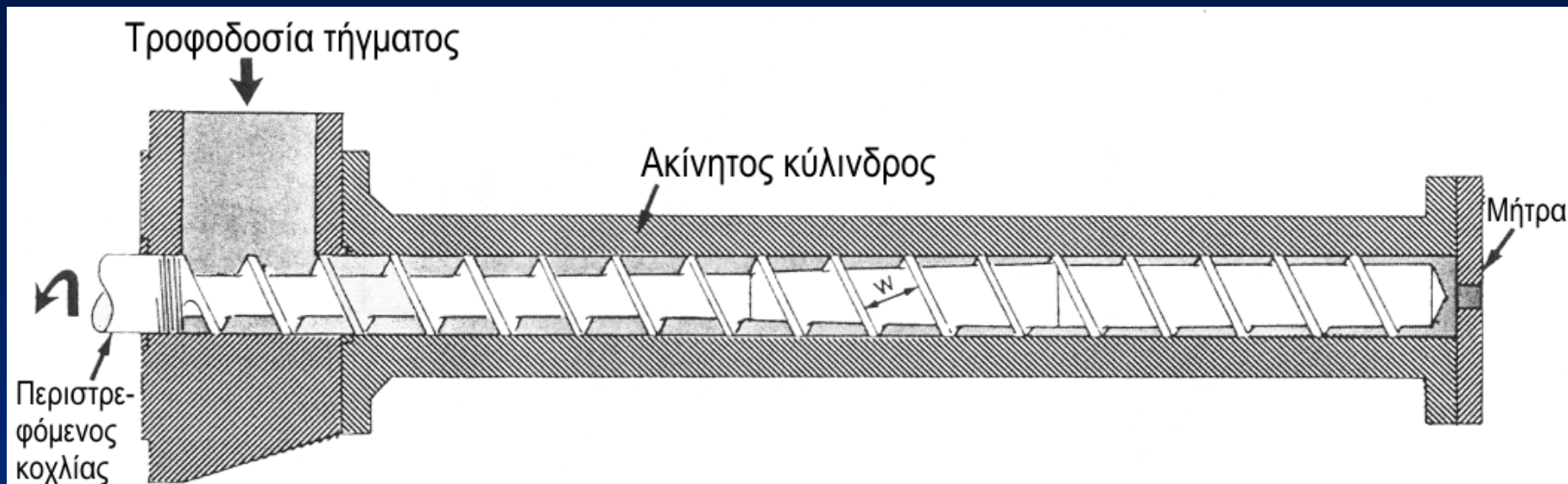
$t = D_s$: κοχλίας τετράγωνου βήματος $\Rightarrow \phi = 17.66^\circ$
 δ αμελητέο $\Rightarrow D_s = D_b = D$

Ποσοτική ανάλυση της ροής σε μονοκόχλιο εκβολέα

Εξίσωση ροής $\leftrightarrow$ Παραγωγικότητα διεργασίας

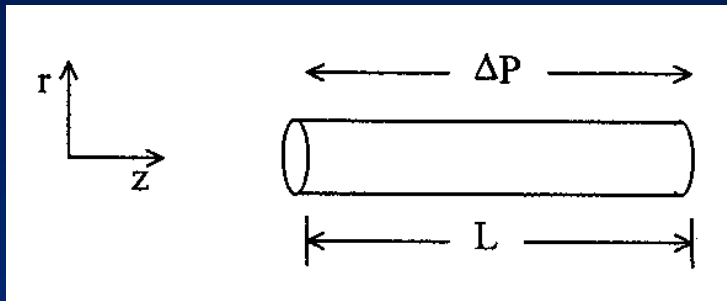
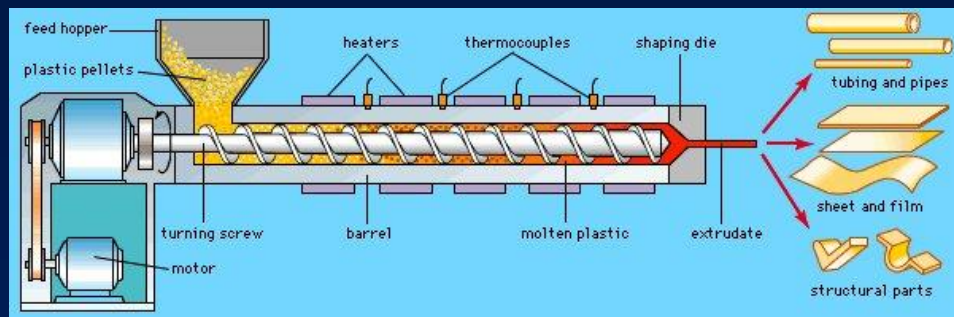
- 👉 Ανάλυση στη ζώνη δοσιμετρίας όπου βρίσκεται σε ισοθερμοκρασιακή κατάσταση.
- 👉 Σταθερό ιξώδες μ .
- 👉 Η ροή λαμβάνει χώρα σε μία αβαθή αύλακα.

Ρεολογική συμπεριφορά στη ζώνη δοσιμετρίας του εκβολέα

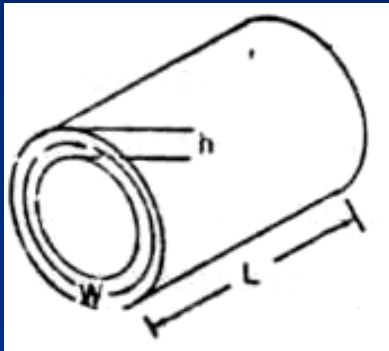


- ✓ η ροή είναι στρωτή
- ✓ η ροή είναι ισοθερμοκρασιακή
- ✓ δεν παρατηρείται ολίσθηση στα τοιχώματα
- ✓ το ρευστό είναι νευτωνικό και ασυμπίεστο
- ✓ οι δυνάμεις βαρύτητας αγνοούνται
- ✓ δεν υπάρχει ροή στις κατευθύνσεις x και y ($v_x = v_y = 0$)
- ✓ η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη

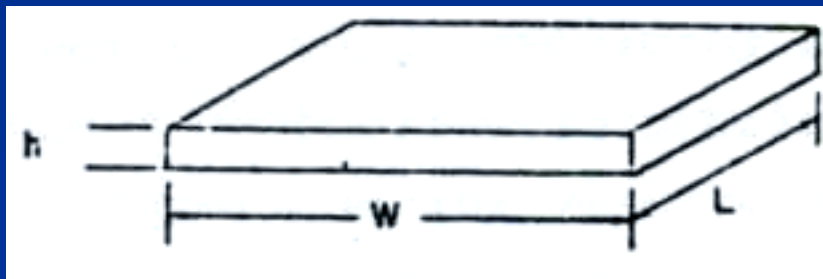
Μήτρα μορφοποίησης



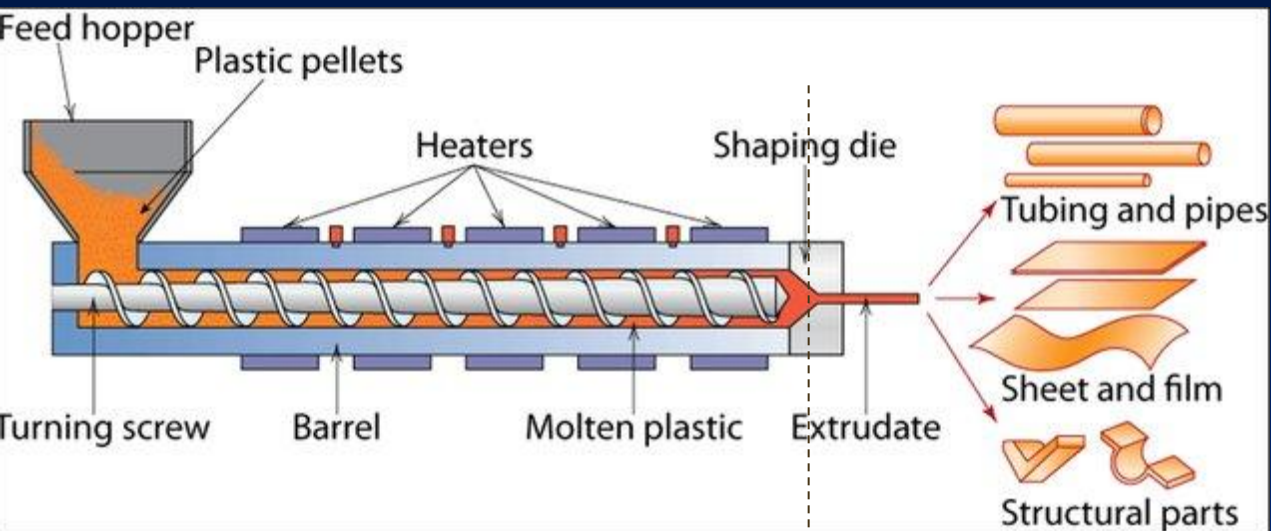
Μήτρα κυκλικής διατομής



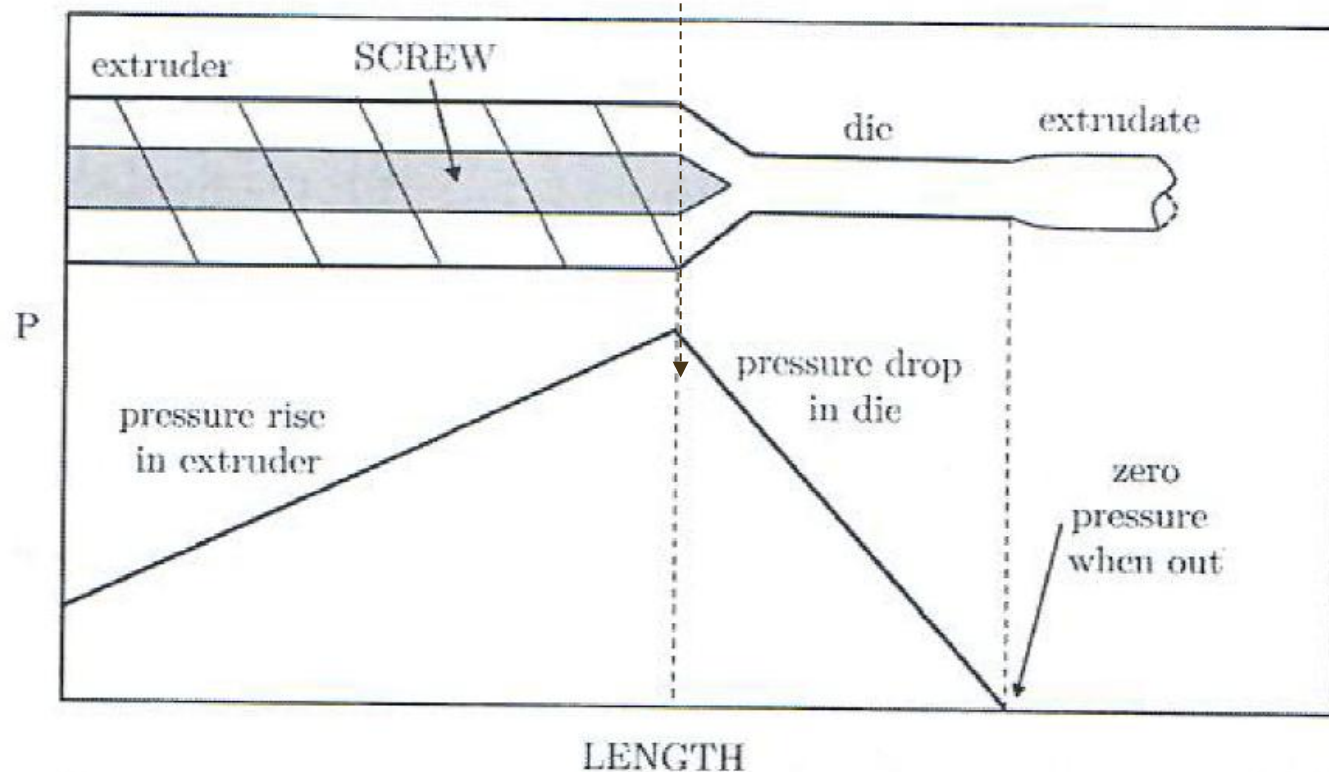
Μήτρα με κυκλική σχισμή
(διάκενο δακτυλίου)



Μήτρα ευθείας σχισμής



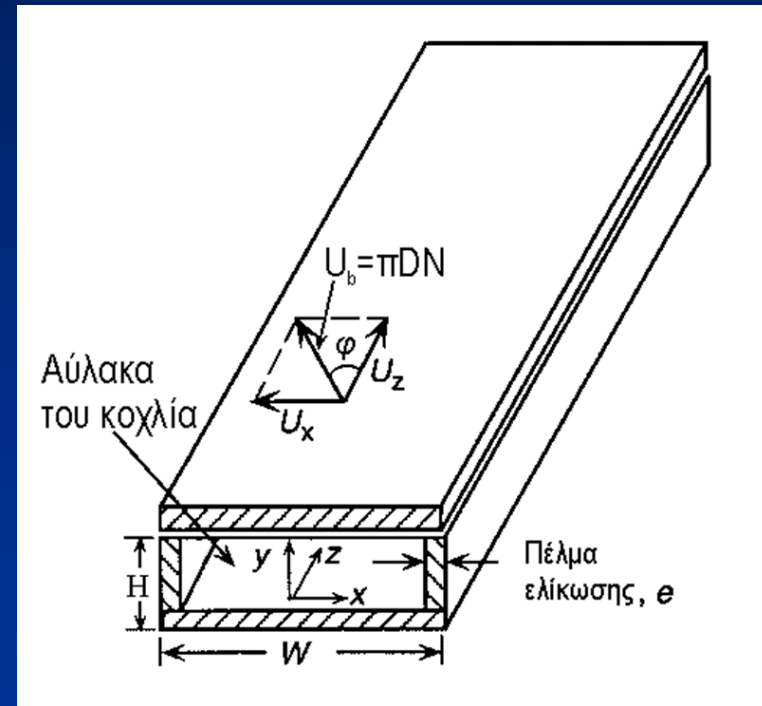
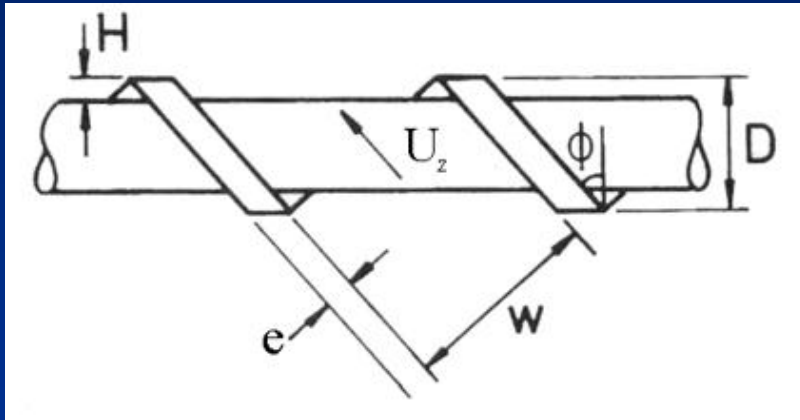
Ανάπτυξη πίεσης στον εκβολέα (ζώνη δοσιμετρίας), με την προσαρμογή της μήτρας μορφοποίησης στην έξοδό του.



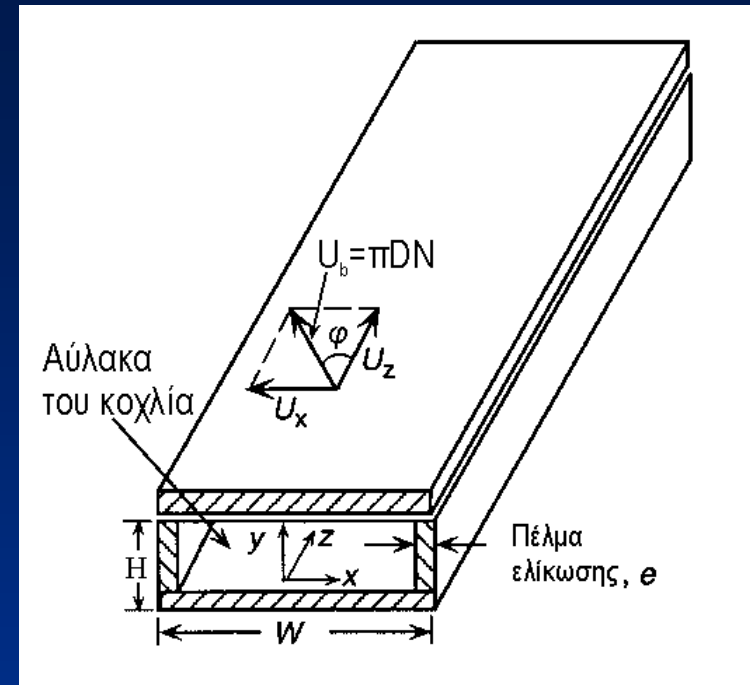
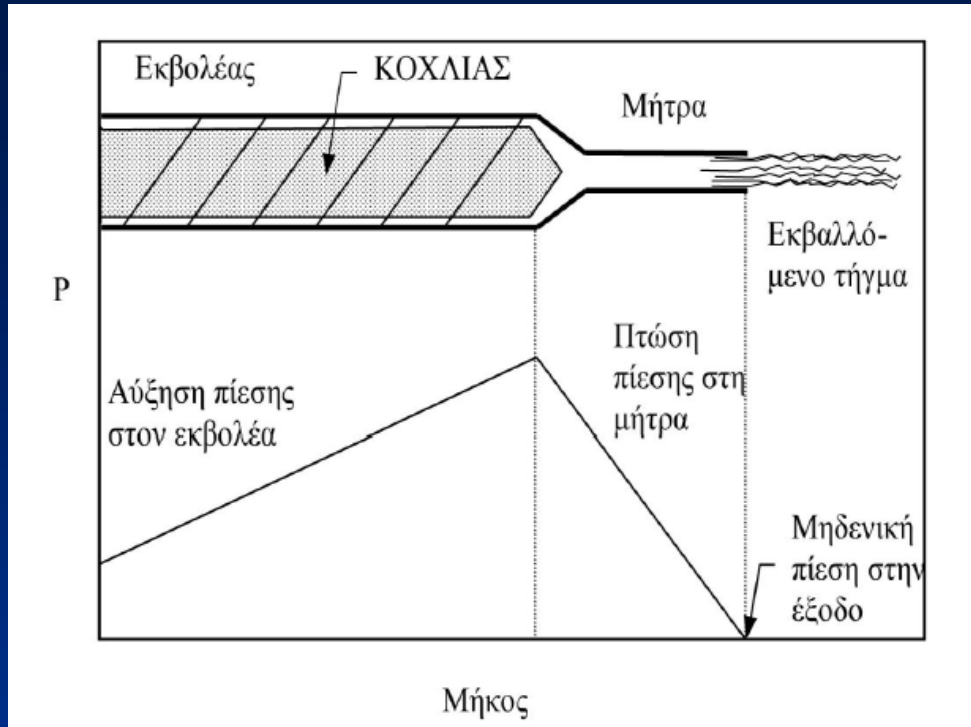
Ποσοτική ανάλυση της ροής στη ζώνη δοσιμετρίας σε μονοκόχλιο εκβολέα

Ας υποθέσουμε ότι στη ζώνη δοσιμετρίας, ξεδιπλώνουμε τον κοχλία μέσα στον κύλινδρο:

Το ρευστό βρίσκεται σε ένα κανάλι με ύψος H και πλάτος W και μήκος L :
→ Ισοδύναμη με ροή ιξώδους ρευστού, με σταθερό ιξώδες μ , μεταξύ δύο επίπεδων παράλληλων πλακών.



Ποσοτική ανάλυση της ροής στη ζώνη δοσιμετρίας σε μονοκόχλιο εκβολέα

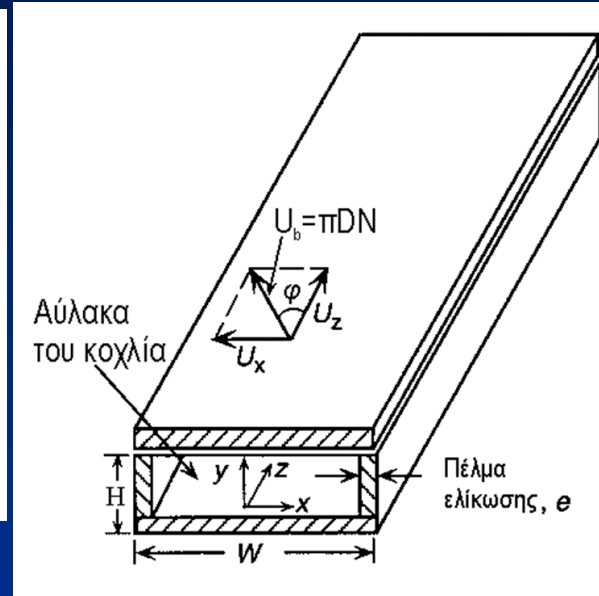
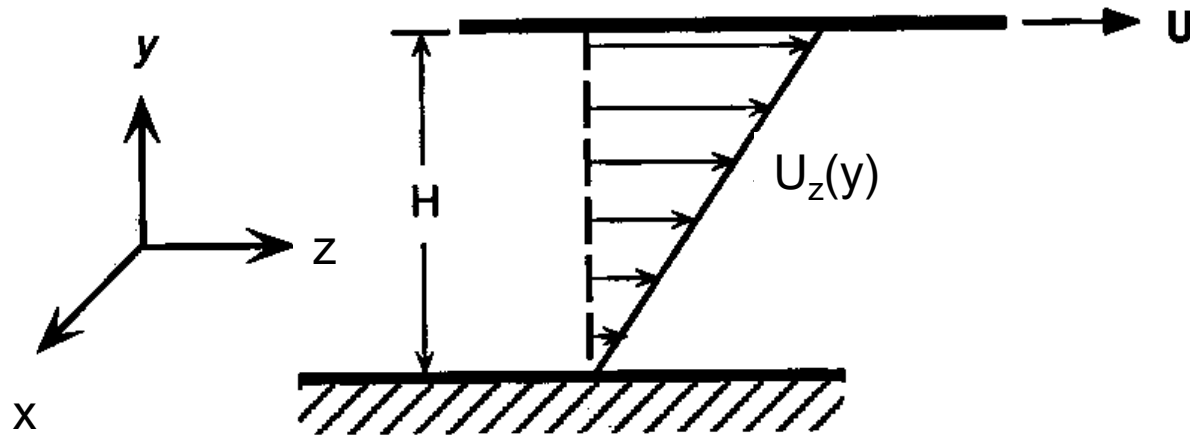


Η ροή αποτελείται από δύο συνιστώσες:

- Τη ροή λόγω της κίνησης (U_z) της μιας επιφάνειας, **ροή λόγω οπισθέλκουσας** (drag flow)
- Αντιτιθέμενη ροή **λόγω της διαφοράς πίεσης** που αναπτύσσεται στον εκβολέα (pressure flow), λόγω της προσαρμογής της μήτρας μορφοποίησης στην έξοδο του εκβολέα

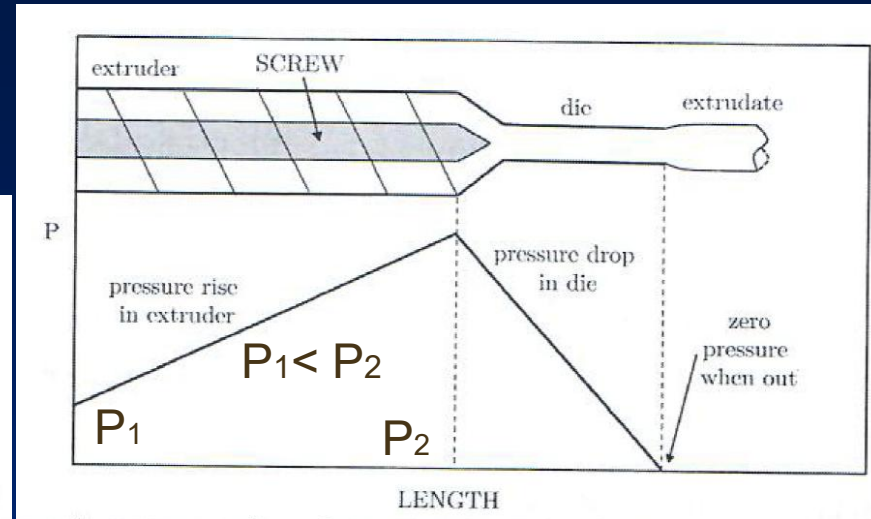
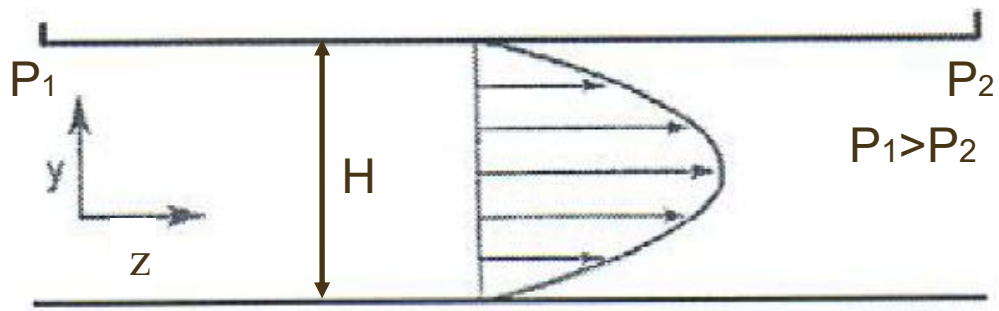
Ροή λόγω οπισθέλκουσας, Q_d :

Η ροή οφείλεται στη διάτμηση ενός ρευστού λόγω της κίνησης μιας πλάκας

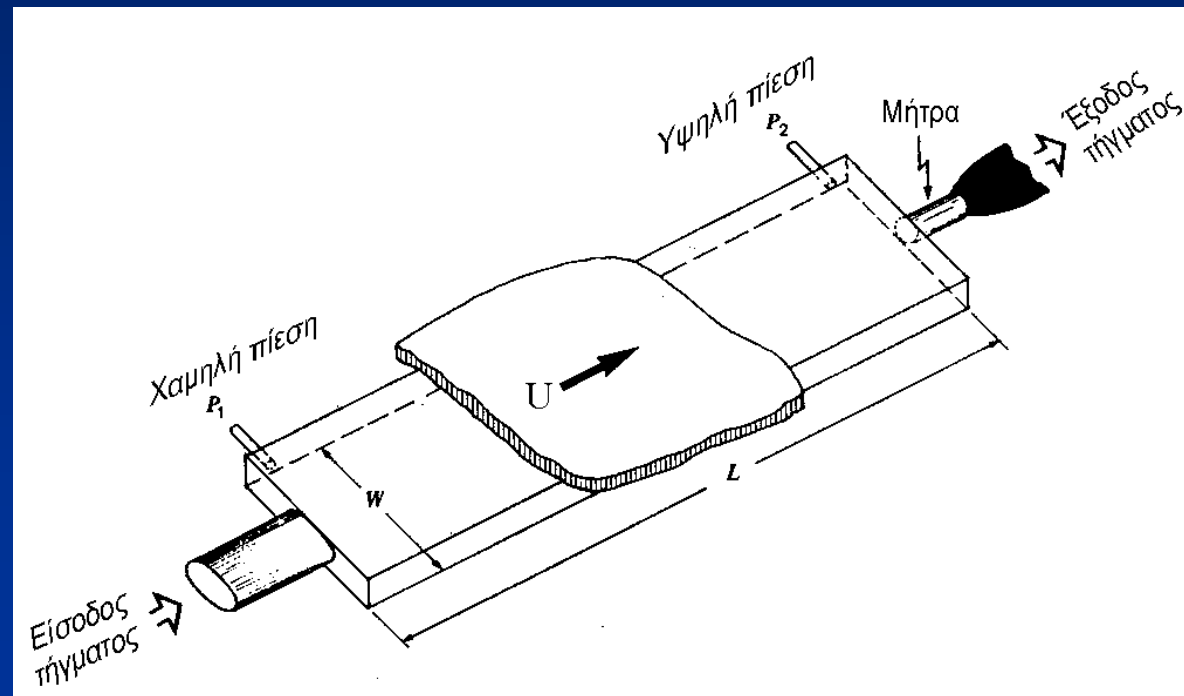
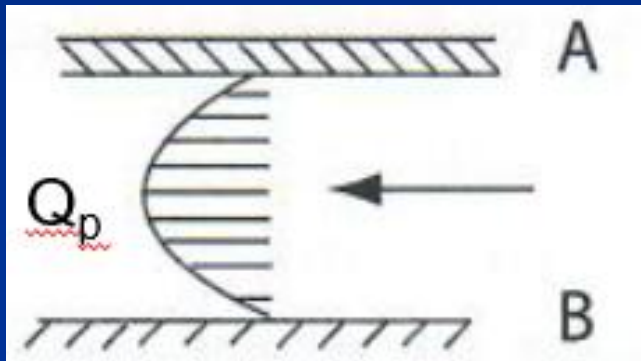


$$Q = \bar{v} \cdot A = \frac{1}{2} U_z H W$$

Ροή λόγω πίεσης, Q_p



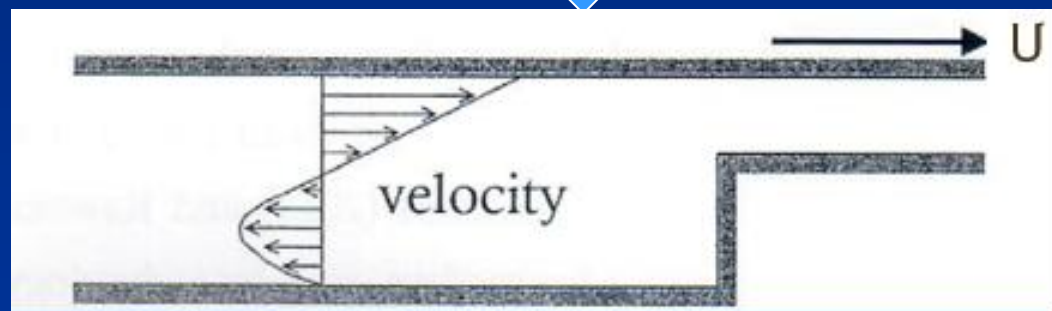
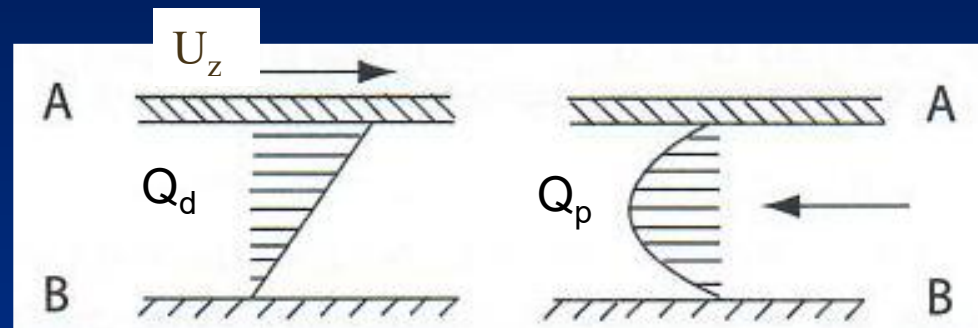
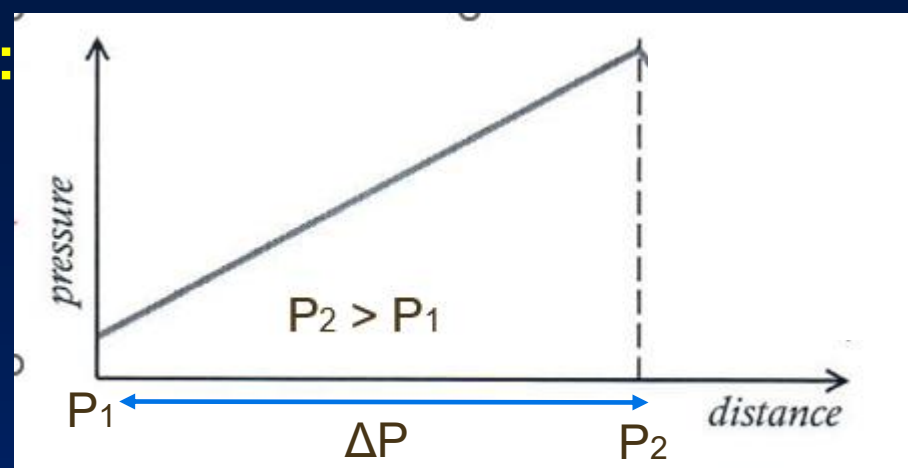
$$Q_P = \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{dP}{dz}$$



Συνολική παροχή Q στον εκβολέα: Συνδυασμός ροής λόγω οπισθέλκουσας Q_d και ροής λόγω πίεσης Q_p

Η ροή που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο πλακών όταν το ένα άκρο είναι κατά ένα μέρος κλειστό (λόγω προσαρμογής της μήτρας μορφοποίησης) και αναπτύσσεται πίεση:

☞ Η ροή λόγω της αύξησης της πίεσης Q_p κατά μήκος του εκβολέα αντιτίθεται στη ροή λόγω οπισθέλκουσας Q_d :



$$Q = Q_d - Q_p = \frac{1}{2}U_zHW - \frac{H^3W}{12\mu} \frac{dP}{dz}$$

Έκφραση της ογκομετρικής παροχής με βάση την ισοδύναμη ροή ανάμεσα στις δύο πλάκες, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκβολέα

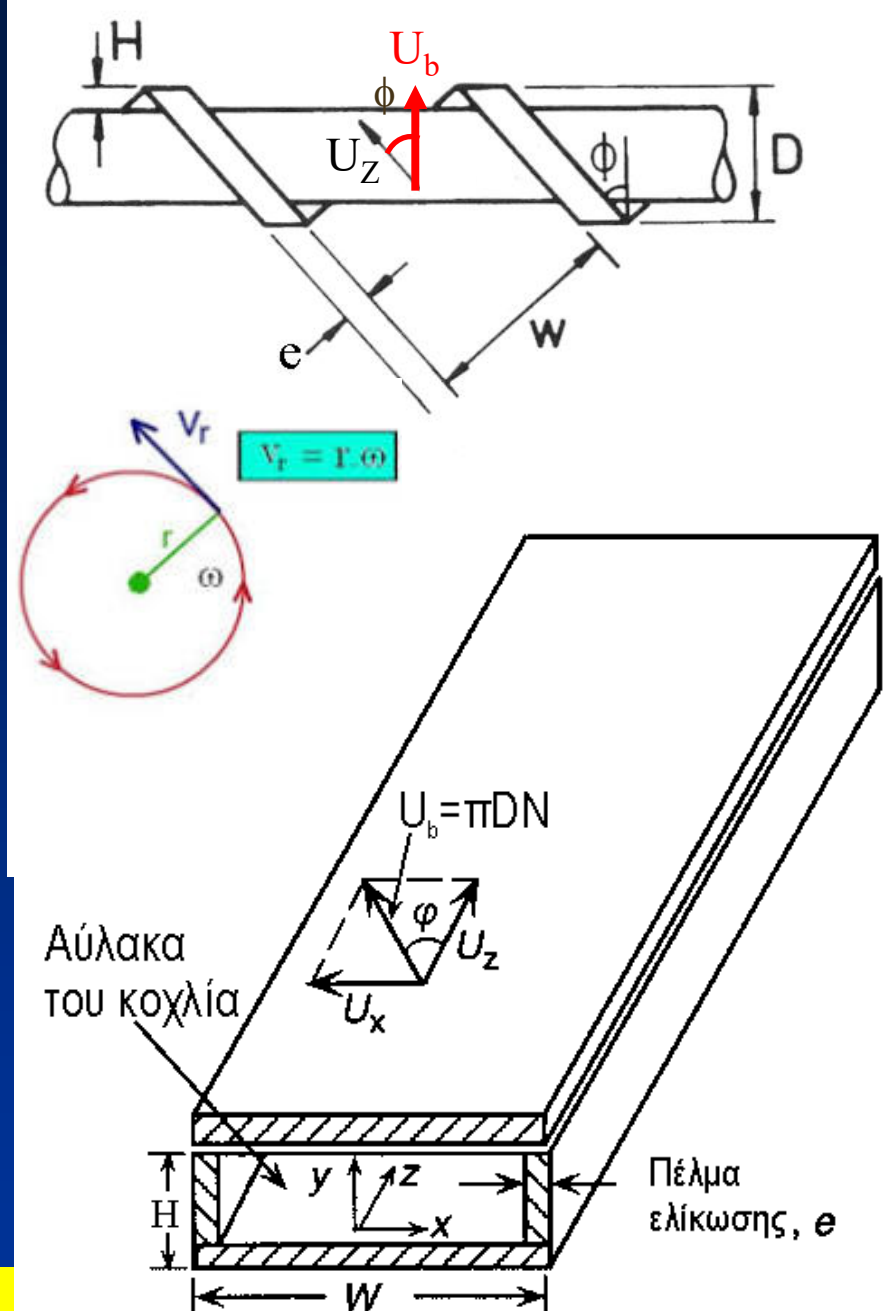
➤ Θεωρούμε ότι η πλάκα που κινείται είναι η εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ο κοχλίας είναι ακίνητος. Η γραμμική ταχύτητα του κοχλία εφαπτομενικά είναι U_b και σχηματίζει γωνία ϕ με τα τοιχώματα της αύλακας (κατά τον άξονα z) :

$$U_b = 2\pi N \frac{D}{2} = \pi DN$$

N: αριθμός στροφών ανά χρόνο, rpm

Η ταχύτητα της πλάκας στην κατεύθυνση του άξονα z :

$$U_z = U_b \cos \phi = \pi DN \cos \phi$$



$$U_b = \pi D N$$

$$U_z = U_b \cos \phi = \pi D N \cos \phi$$

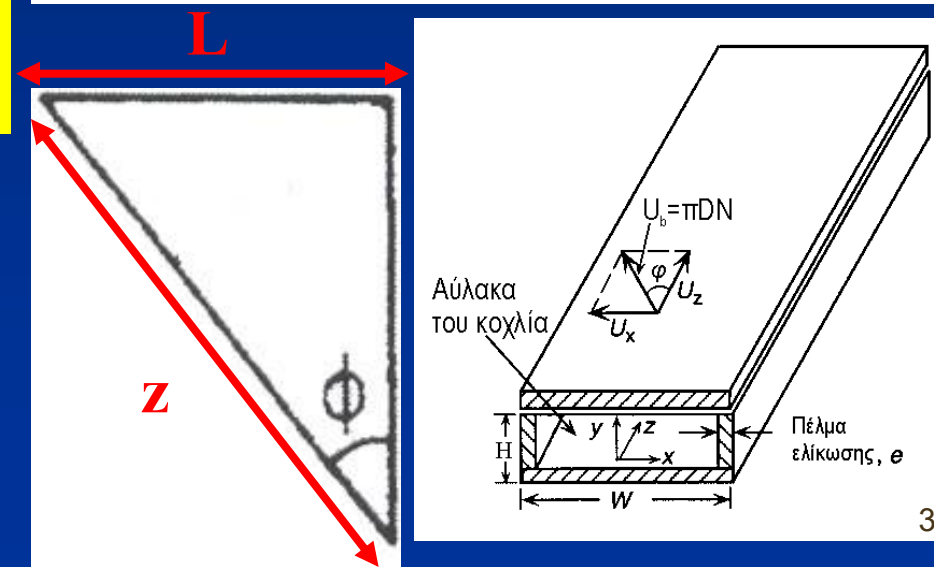
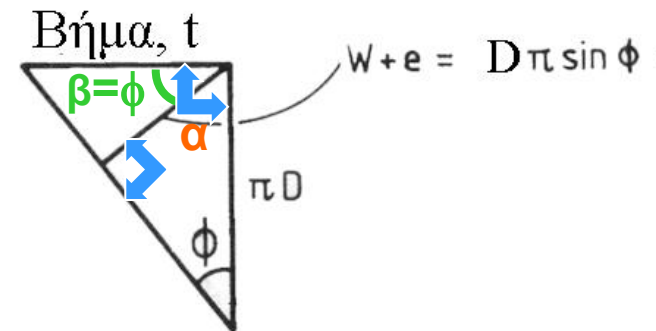
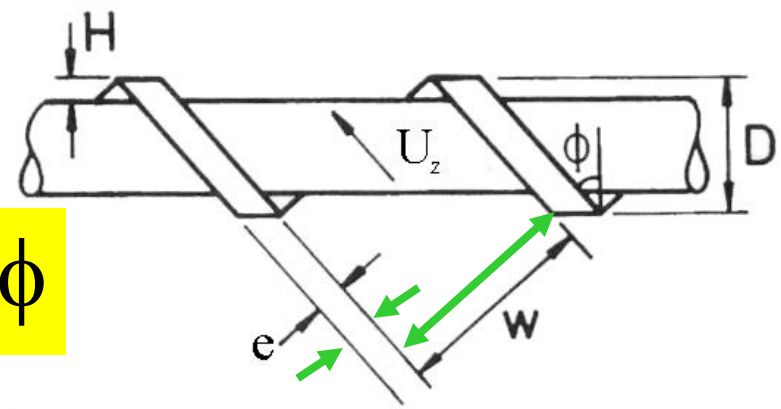
$$t = \pi D \tan \phi$$

$$\cos \phi = \frac{W + e}{t} \Rightarrow$$

$$W = t \cos \phi - e \Rightarrow W \approx t \cos \phi$$

$$W = \pi D \tan \phi \cos \phi - e = \pi D \sin \phi - e \approx \pi D \sin \phi$$

$$z = L / \sin \phi$$



Εξίσωση ροής στον εκβολέα

$$Q = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$

$$U_z = \pi D N \cos \phi$$

$$W = \pi D \sin \phi - e$$

$$Q \stackrel{e=0}{\approx} \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

$$Q = Q_d - Q_p$$



$$Q = AN - C \frac{\Delta P}{\mu}$$

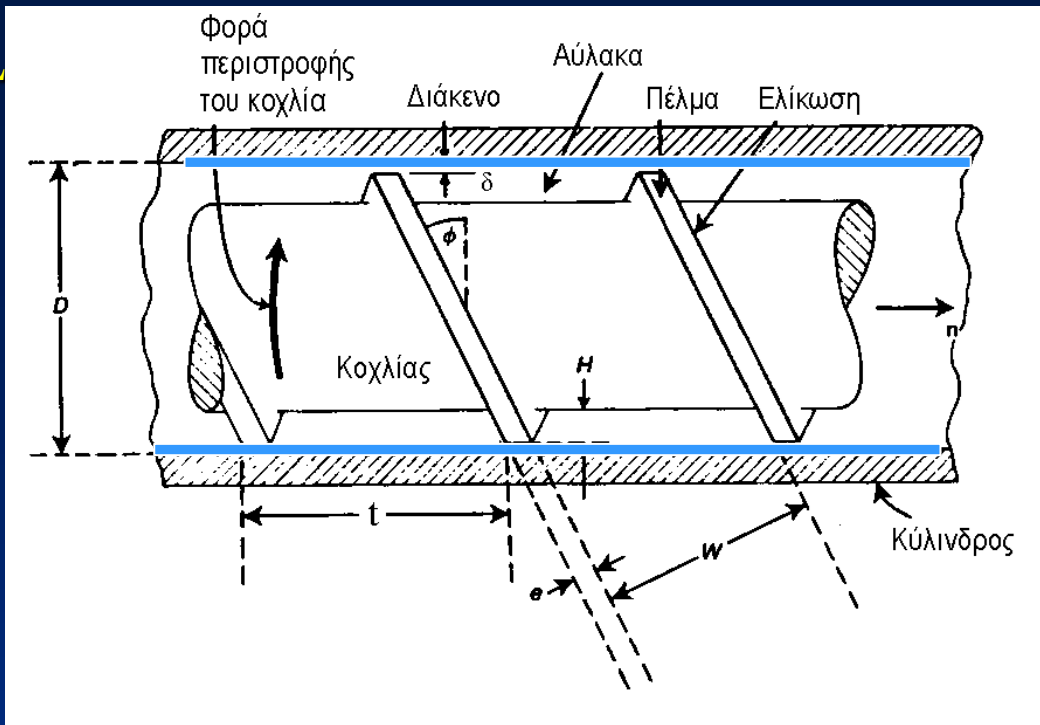
Για δεδομένο εκβολέα τα μεγέθη **D**, **L**, **H** και **φ** είναι δεδομένα:

L: μήκος κοχλία ζώνης δοσιμετρίας, συνήθως **L**=10-15**D**

Ροή λόγω διαρροών, Q_L

Οι διαρροές γίνονται μέσω του διακένου δ μεταξύ ελίκωσης του κοχλίου και του κυλίνδρου.

$$Q = Q_d - Q_p - Q_L$$



$$Q_L = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12 \mu e} \tan \phi \frac{\Delta P}{L}$$

Μπορούμε να παραλείψουμε την Q_L χωρίς σημαντικό σφάλμα.

$$Q = \frac{1}{2} U_z HW - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$

$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

I. Δεν αναπτύσσεται πίεση στο άκρο του εκβολέα ($\Delta P = 0$) $\rightarrow$ μέγιστη παροχή $Q_{\max}$:

$$Q_{\max} = Q_d = \frac{1}{2} U_z HW \stackrel{e \approx 0}{=} \frac{\pi^2 D^2 N H \eta \mu \phi \sin \phi}{2}$$

II. Η πίεση είναι αρκετά μεγάλη ώστε να εμποδίζει την εξώθηση του ρευστού ($Q = 0$), και μπορούμε να ισορροπήσουμε την Q_d και Q_p .

➤ Επειδή το μ για πολυμερικά τήγματα είναι μεγάλο, μπορεί να αναπτυχθούν στον εκβολέα εξαιρετικά υψηλές πιέσεις.

$$\Delta P_{\max} = \frac{6\pi D L N \mu}{H^2 \tan \phi}$$

Παράμετροι λειτουργίας συστήματος εκβολής

$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12 \mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

1. Πίεση εξόδου

Αύξηση της ΔP στην κεφαλή οδηγεί σε μείωση της Q γιατί αυξάνει η ροή πίεσης.

2. Ρυθμός περιστροφής (N) του κοχλίου

Αύξηση στην ταχύτητα περιστροφής οδηγεί σε αναλογική αύξηση της ροής οπισθέλκουσας Q_d .

Συνοψίζοντας ...

$$Q = Q_d - Q_p$$

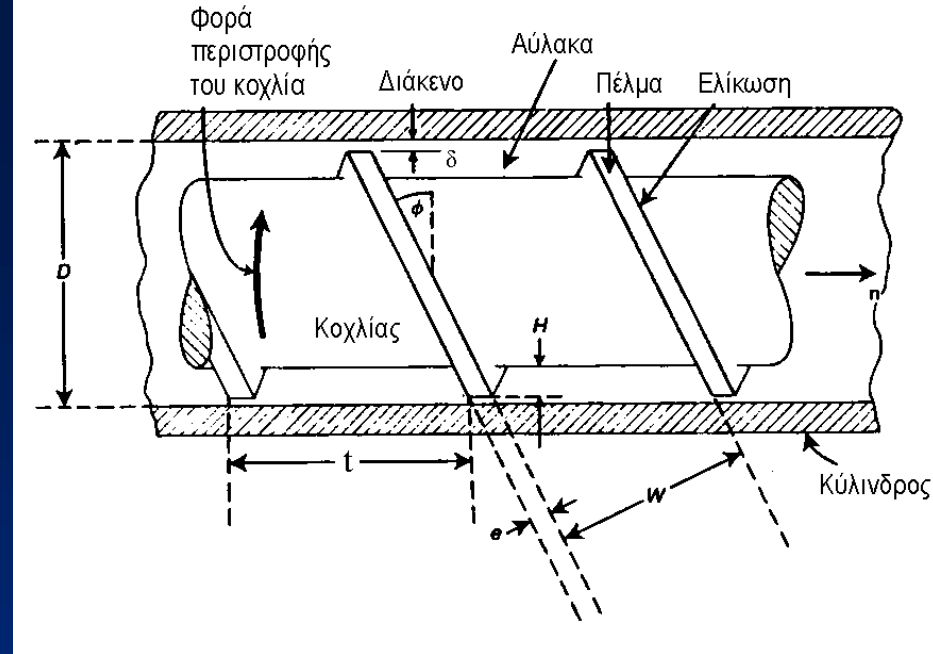
$$Q = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$

$$U_z = \pi D N \cos \phi$$

$$W = \pi D \sin \phi - e$$

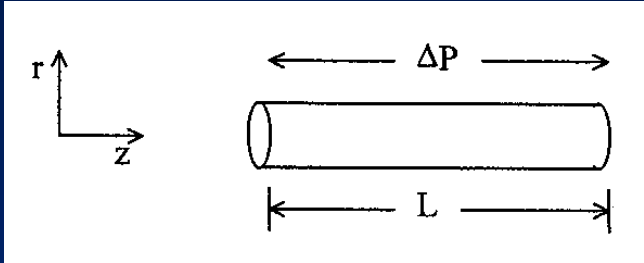
$$\dot{\gamma} = \frac{U_z}{H}$$

$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

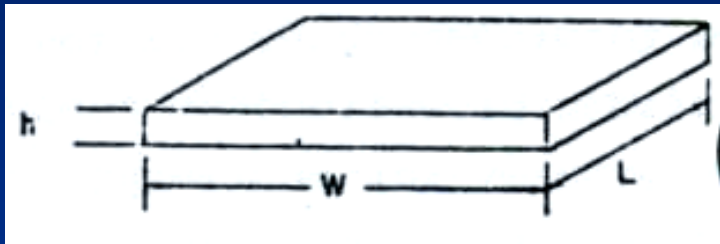


Μήτρα μορφοποίησης

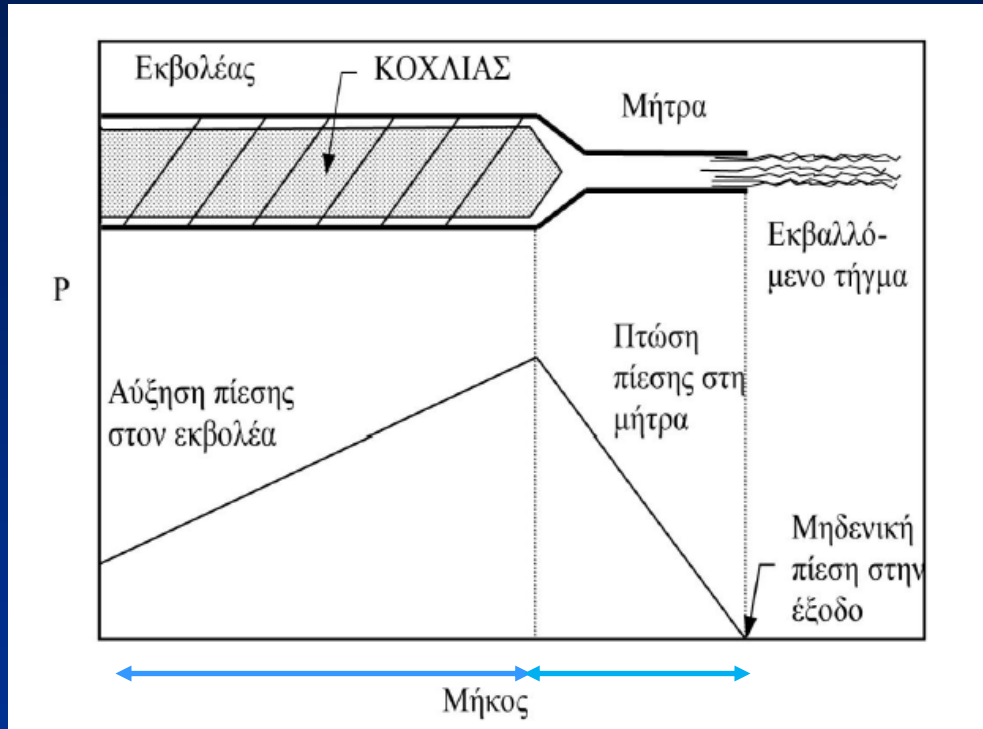
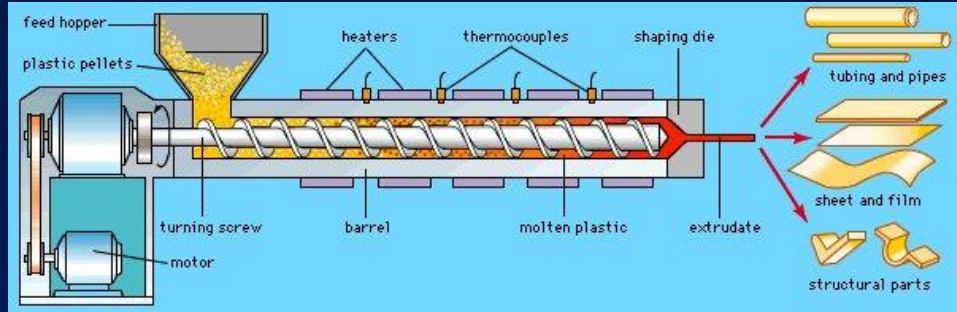
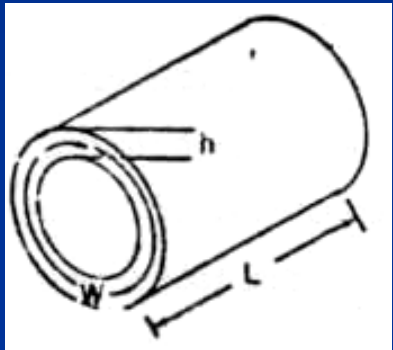
Μήτρα κυκλικής διατομής



Μήτρα ευθείας σχισμής



Μήτρα με κυκλική σχισμή (διάκενο δακτυλίου)



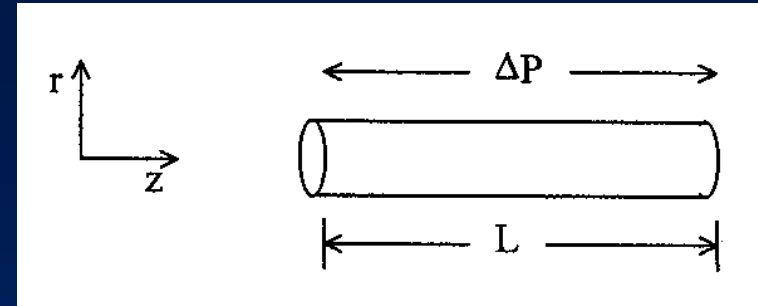
$$\Delta P_{\text{ΕΚΒΟΛΕΑ}} = \Delta P_{\text{ΜΗΤΡΑ}}$$

- Στις διεργασίες μορφοποίησης ο εκβολέας είναι συνδεδεμένος με τη μήτρα μορφοποίησης: η εκροή από τον εκβολέα είναι εισροή στη μήτρα.

Εξίσωση ροής στη μήτρα

Μήτρα κυκλικής διατομής

Εξίσωση Hagen-Poiseuille



Παραδοχές:

- Ισοθερμοκρασιακές συνθήκες
- Νευτώνική συμπεριφορά

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

Q: ογκομετρικός ρυθμός εξώθησης

ΔP : πτώση πίεσης της μήτρας

R: ακτίνα της μήτρας

L_d : μήκος της μήτρας

μ : ιξώδες τήγματος

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

Εξίσωση ροής στη μήτρα

Μήτρα με μορφή σχισμής

- Ευθεία σχισμή
- Κυκλική σχισμή (δακτυλιοειδής)

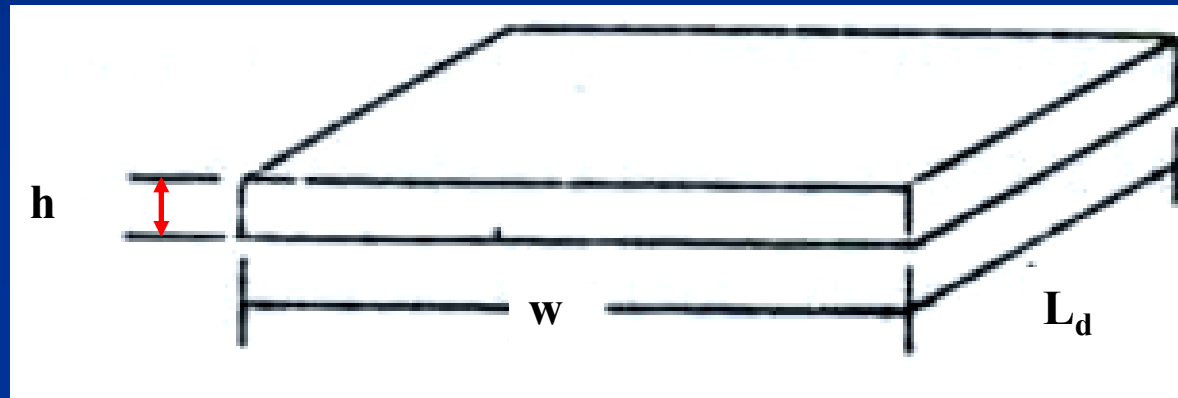
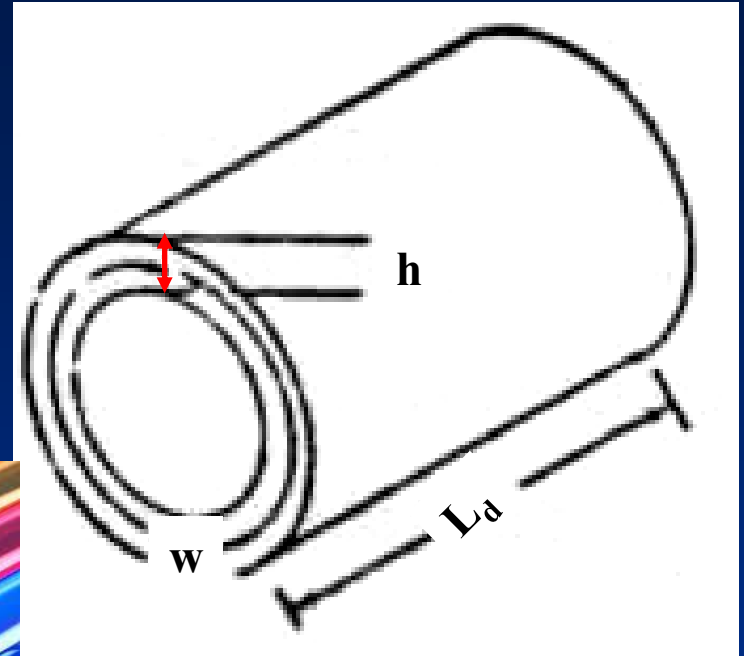
h: άνοιγμα μήτρας

w: πλάτος της μήτρας

L_d: μήκος της μήτρας

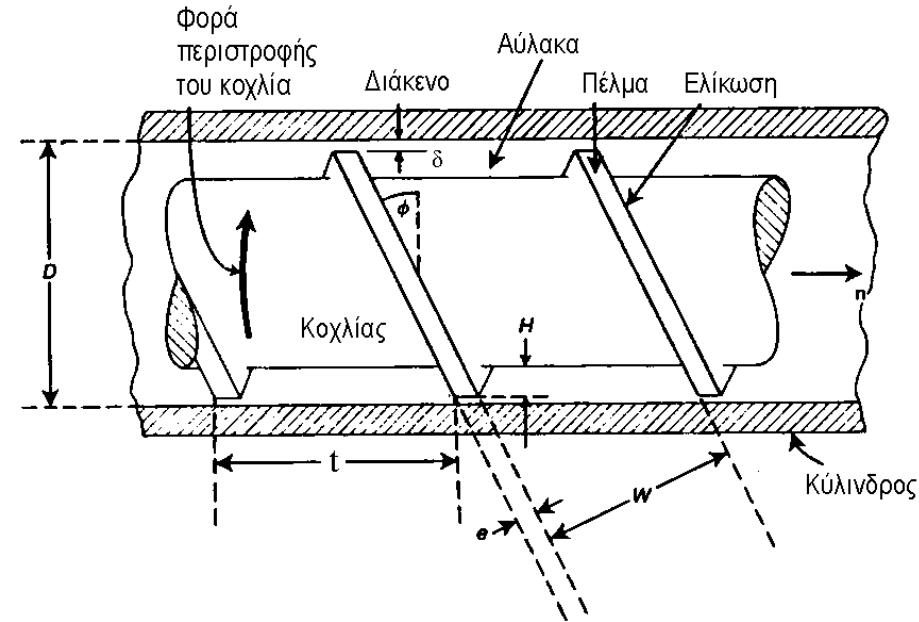
$$Q = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{wh^2}$$



$$Q = Q_d - Q_p$$

$$Q = \frac{1}{2} U_z H W - \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$



$$Q \approx \frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3}{12\mu} \sin^2 \phi \frac{\Delta P}{L}$$

Μήτρα με κυκλικό άνοιγμα

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

Μήτρα ευθείας σχισμής

$$Q = \frac{w h^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

Σχέση κοχλία-μήτρας

➡ Μεγάλη παροχή για τον εκβολέα:

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N h \eta \mu \phi \sigma \nu \phi}{2} - \frac{\pi D h^3 \eta \mu^2 \phi \Delta P}{12 \mu L}$$

Απαιτεί χαμηλή πίεση στην έξοδο.

➡ Μεγάλη παροχή για τη μήτρα:

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

Απαιτεί μεγάλη πίεση στην είσοδό της, δηλαδή στην έξοδο του εκβολέα.

Σχέση εκβολέα-μήτρας μορφοποίησης

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N H \eta \mu \phi \sigma \nu \phi}{2} - \frac{\pi D H^3 \eta \mu^2 \phi}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L}$$

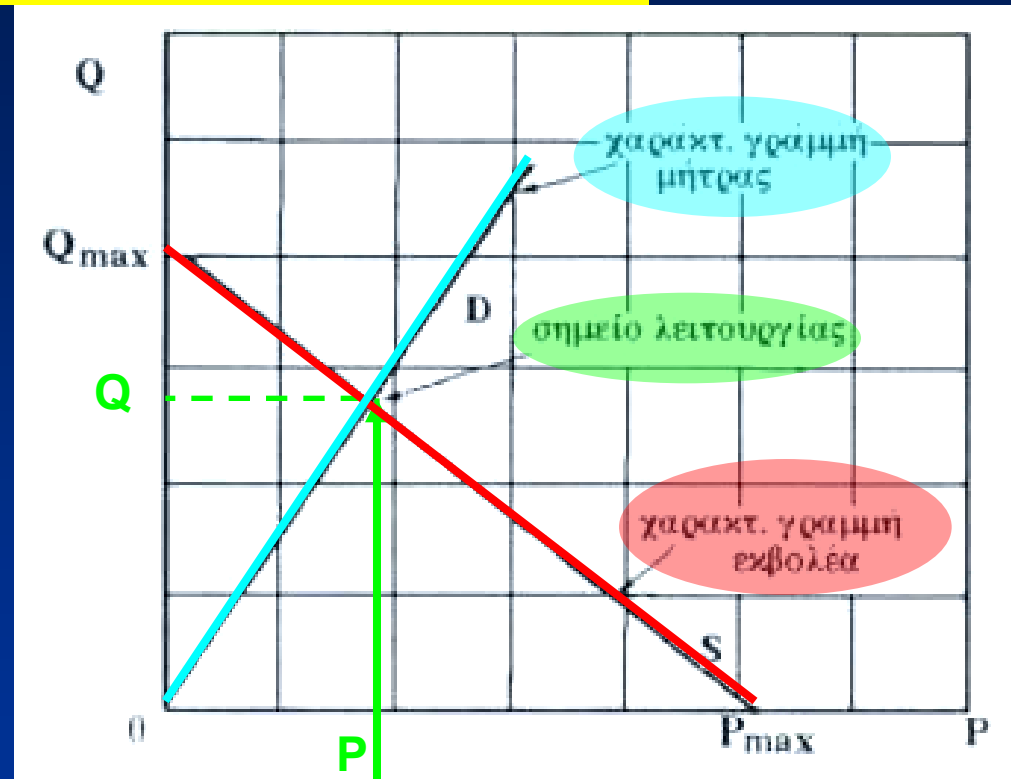
Μήτρα με κυκλικό άνοιγμα

$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{\pi R^4}{8 \mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

Μήτρα με ευθεία σχισμή

$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{w h^3}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

$$Q_{\text{εκβολέα}} = Q_{\text{μήτρας}}$$



P_{λ}

Χαρακτηριστικές γραμμές λειτουργίας, για μήτρα με μορφή σχισμής με διακύμανση στο διάκενο

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 N H \eta \mu \phi \sigma \nu \phi}{2} - \frac{\pi D H^3 \eta \mu^2 \phi}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L}$$

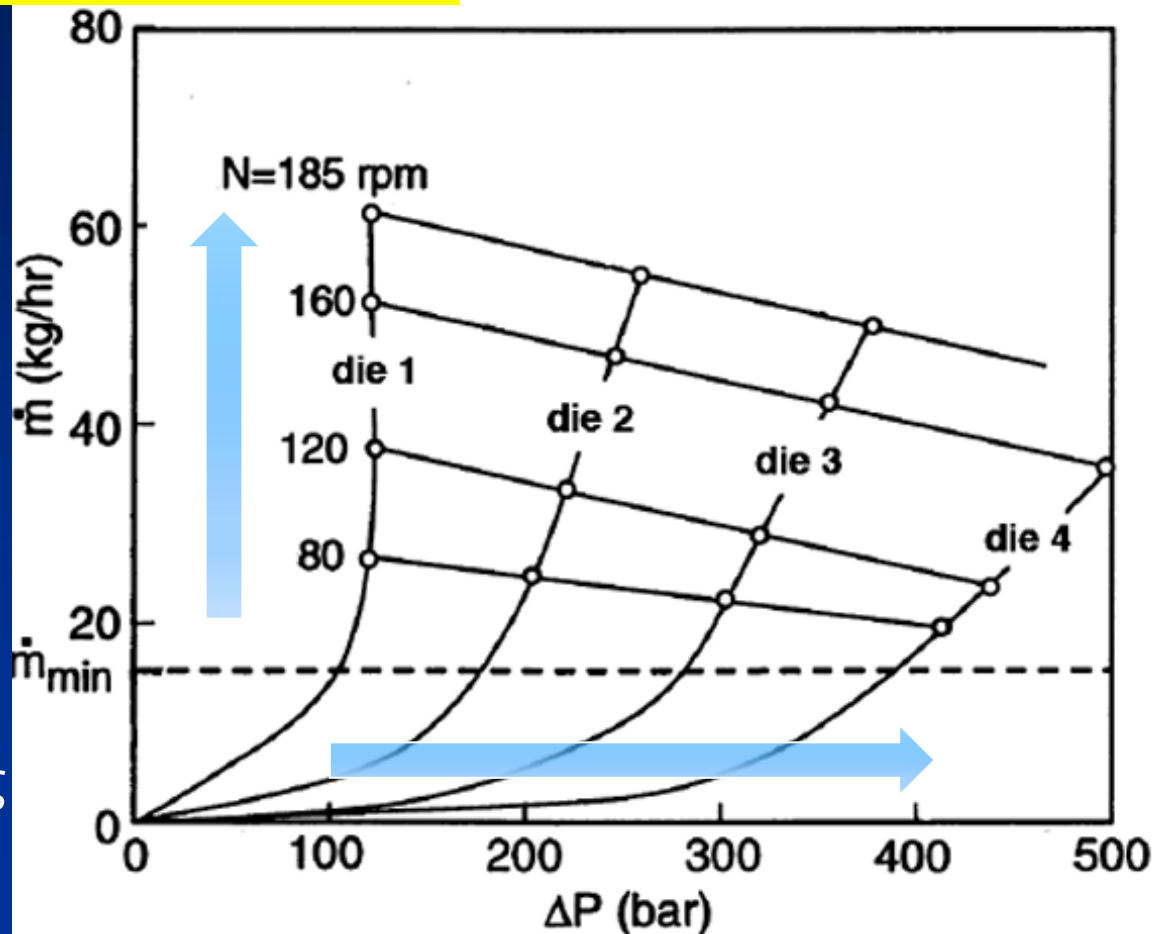
$$Q_{\text{μήτρας}} = \frac{w h^3}{12 \mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

$$h_1 > h_2$$

die 1: μεμβράνη μεγαλύτερου πάχους



die 4: μεμβράνη λεπτού πάχους (φιλμ)



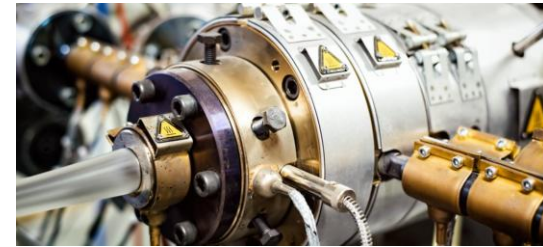
Λειτουργία μονοκόχλιου εκβολέα

Παράμετροι λειτουργίας σε έναν εκβολέα:

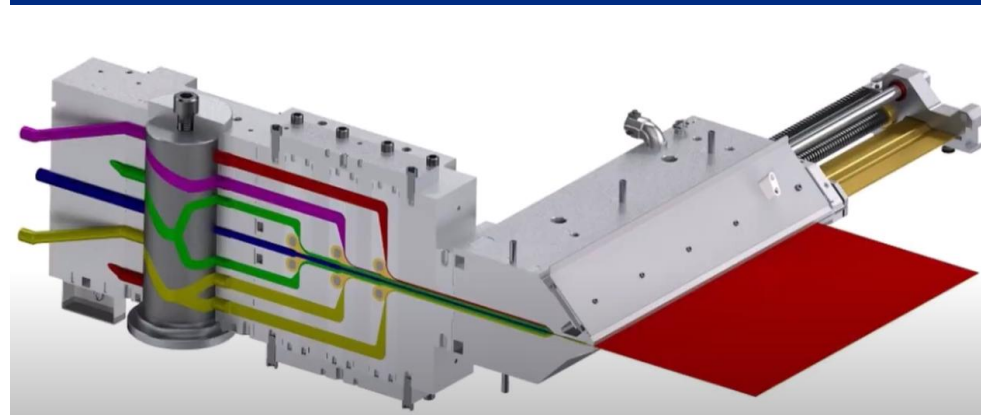
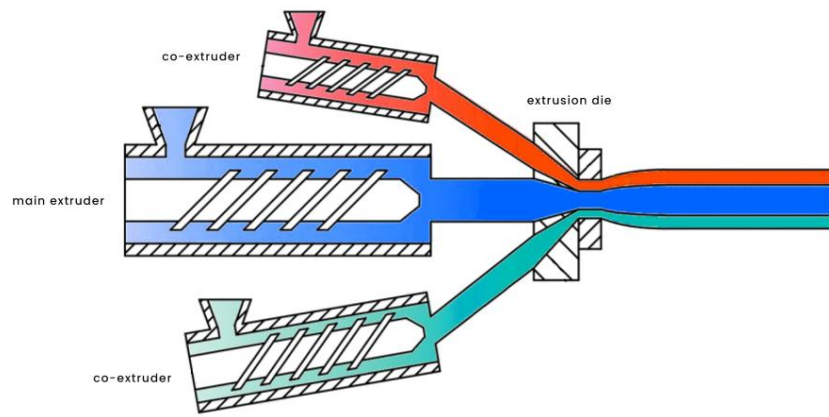
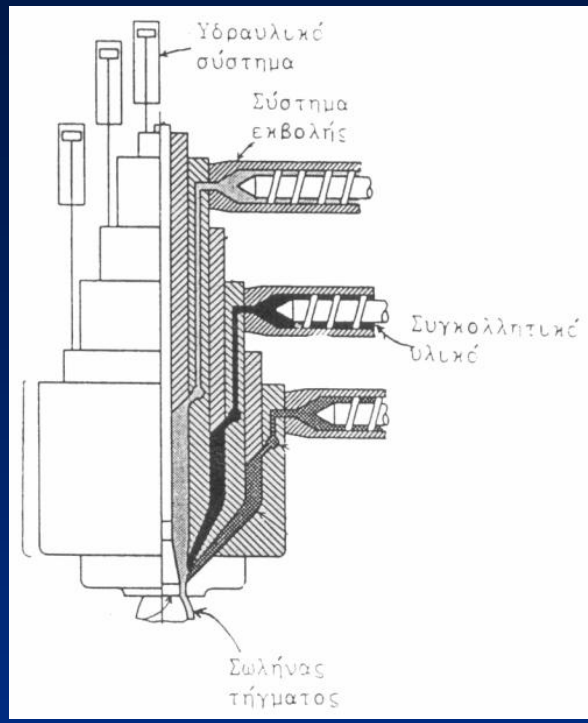
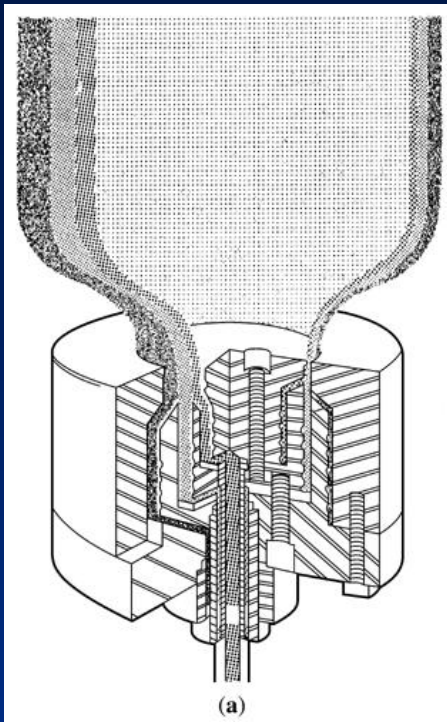
- Ταχύτητα περιστροφής κοχλία [N, rpm, revolutions per minute]
- Θερμοκρασίες στις ζώνες του κυλίνδρου και στη μήτρα μορφοποίησης [°C]
(Προσοχή! Ο εκβολέας πρέπει να προθερμανθεί πριν τεθεί σε κίνηση ο κοχλίας)
- Πίεση τήγματος στο τέλος του εκβολέα (melt pressure) [MPa]
- Ροπή (torque) [N.m]
- Παροχή [m^3/h , kg/h] – Extrusion capacity, Output, Throughput

Αριστοποίηση παραμέτρων της διεργασίας μορφοποίησης με μονοκόχλιο εκβολέα:

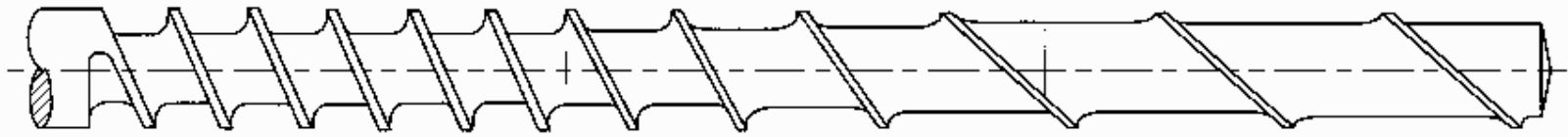
- Ταχύτητα περιστροφής κοχλία [N, rpm, revolutions per minute]
- Προφίλ θερμοκρασιών στις ζώνες του κυλίνδρου [°C]
- Σχεδιασμός κοχλία (screw) – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοχλία (ϕ , H, D)
- Σχεδιασμός μήτρας (die) – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μήτρας:
(L_d , R_d , W_d , H_d)



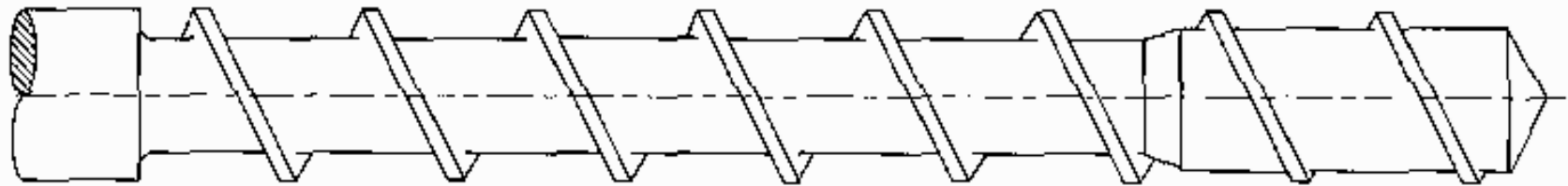
➤ Συνεκβολή (Co-extrusion) διαφορετικών πλαστικών



- Ρεολογική συμβατότητα
- Βαθμός συγκόλλησης μεταξύ των διαφορετικών τηγμάτων

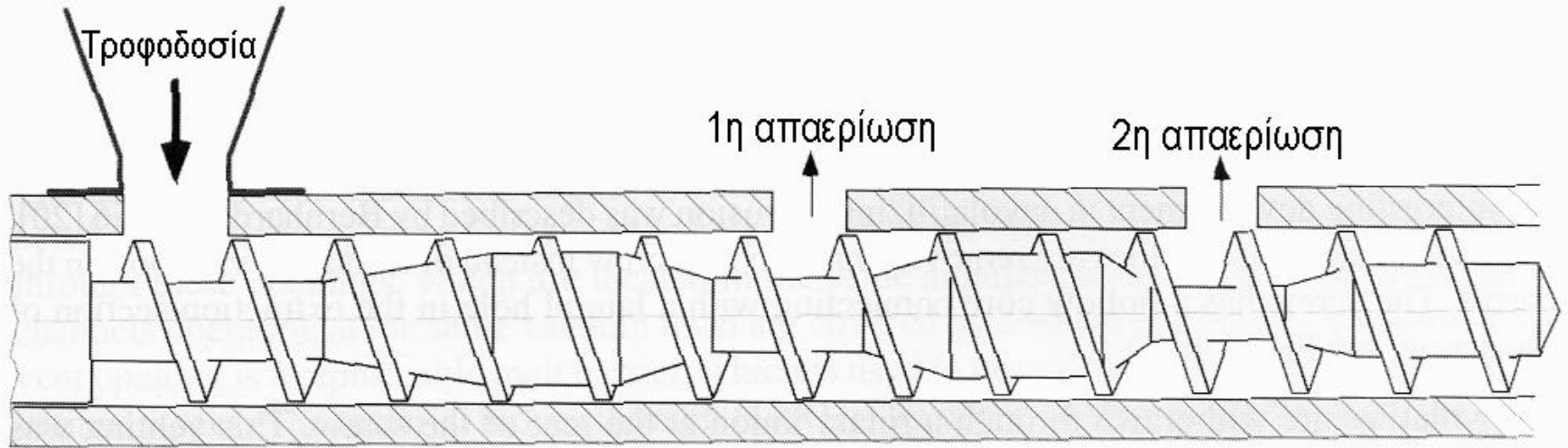


Κοχλίας εκβολέα με μεταβλητό αυξανόμενο βήμα



Κοχλίας ταχείας συμπίεσης

Κοχλίας με ζώνη απαερίωσης



Για την απομάκρυνση πτητικών ουσιών όπως υδρατμοί, ή
ακαθαρσιών χαμηλού μοριακού βάρους

Ειδικά για υγροσκοπικά πολυμερή: προσροφούν υγρασία εύκολα από
τον ατμοσφαιρικό αέρα → κίνδυνος οι εγκλωβισμένοι υδρατμοί στη
μήτρα να διογκώσουν προϊόν → πορώδες ή και αφρώδες

1. Φύλλο από συμπολυμερές πολυστυρενίου (PS) πρόκειται να μορφοποιηθεί σε μονοκόχλιο εκβολέα, διαμέτρου 75 mm. Ο εκβολέας περιλαμβάνει ζώνη απαερίωσης μεταξύ πρώτης και δεύτερης ζώνης δοσιμετρίας, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά για τον κοχλία:

Πρώτη ζώνη δοσιμετρίας: μήκος 250 mm, βάθος αύλακας 4 mm

Δεύτερη ζώνη δοσιμετρίας: μήκος 500 mm, βάθος αύλακας 6 mm

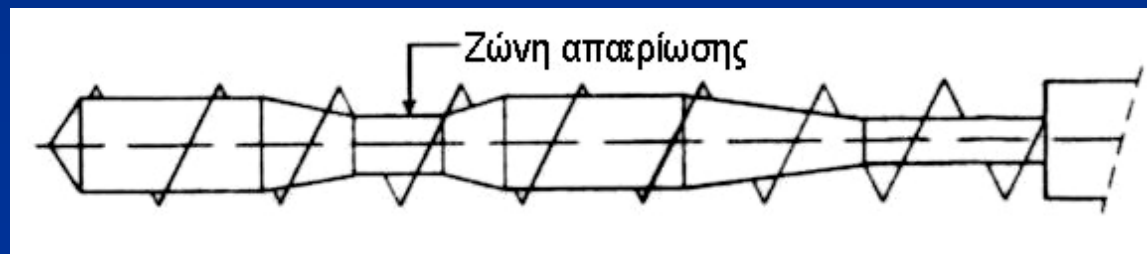
Η γωνία ελίκωσης του κοχλία και στις δύο ζώνες δοσιμετρίας είναι 17.7° , η ταχύτητα περιστροφής του κοχλία 40 στρ./min και η θερμοκρασία είναι ρυθμισμένη στους 230°C .

Η παραπάνω διάταξη εκβολής χρησιμοποιείται για την παραγωγή φιλμ με τη χρήση μήτρας επίπεδης σχισμής, η οποία έχει πλάτος 1 m και μήκος 10 mm.

Να υπολογισθεί το άνοιγμα της μήτρας εκβολής του φιλμ, το οποίο απαιτείται για την ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος εκβολής.

Το ιξώδες του πολυμερικού τήγματος να θεωρηθεί $250 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

* Να αναφερθούν οι παραδοχές που θα γίνουν για την επίλυση της άσκησης.



(1) Δεδομένα:

I. Μονοκόχλιος εκβολέας

D: 75mm N: 40σπρ/min ϕ : 17.7° e: 7.5mm μ : 250N·s/m²

1^η Ζώνη δοσιμετρίας L₁: 250mm H₁: 4mm

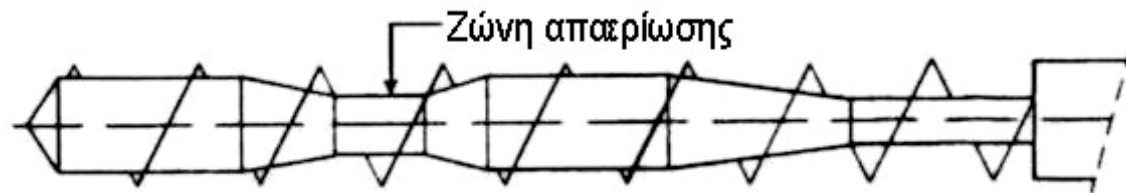
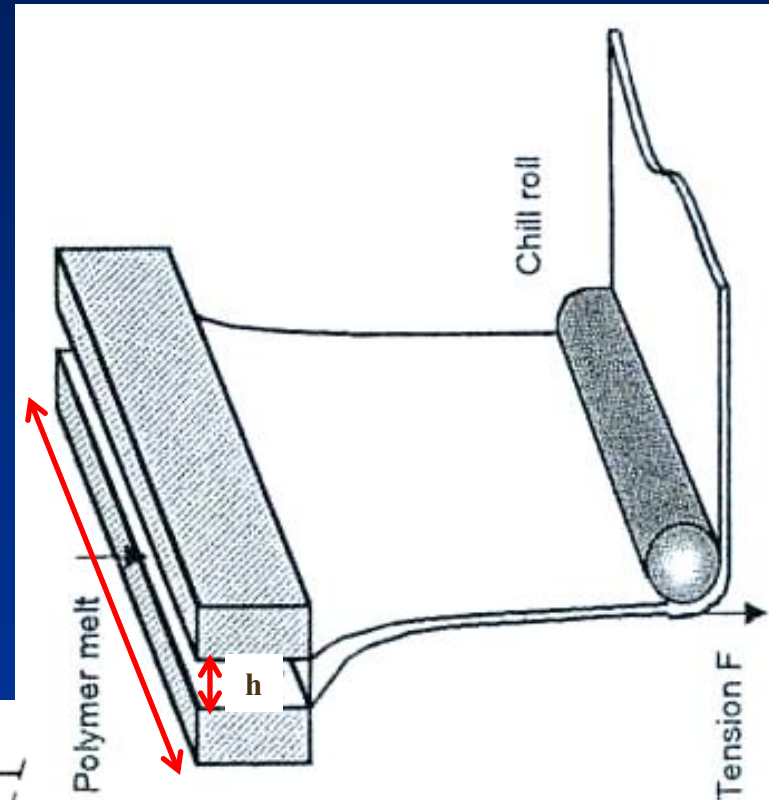
2^η Ζώνη δοσιμετρίας L₂: 500mm H₂: 6mm

II. Μήτρα μορφοποίησης φιλμ

w: 1m L_d: 10mm

Ζητούμενα:

Το άνοιγμα της μήτρας **h**
που ικανοποιεί την ομαλή
λειτουργία της διάταξης?



1^η ζώνη δοσιμετρίας

$$Q_1 = Q_{d,1} - Q_{p,1}$$

$$Q_d = \frac{U_z HW}{2}$$

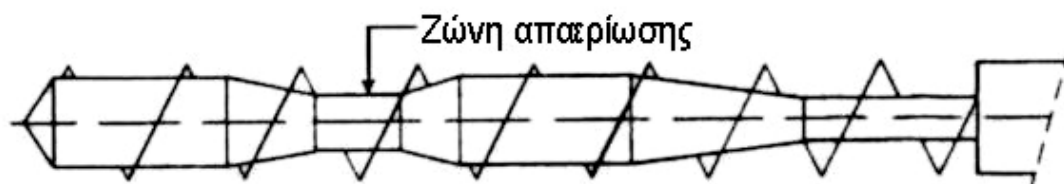
$$U_z = \pi DN \cos \phi$$

$$U_z = \frac{\pi \cdot 0.075 \cdot 40}{60} \cos 17.7^\circ = 0.1497 \text{ m/s}$$

$$W = \pi D \sin \phi - e = \pi \cdot 0.075 \sin 17.7^\circ - 0.0075 \Rightarrow$$

$$W = 0.0641 \text{ m}$$

$$Q_1 = Q_{d,1} = \frac{0.1497 \cdot 0.004 \cdot 0.0641}{2} = 1.92 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$



2η ζώνη δοσιμετρίας

$$Q_2 = Q_{d,2} - Q_{p,2} = Q_1 = 1.92 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$U_z = 0.1497 \text{ m} / \text{s}$$

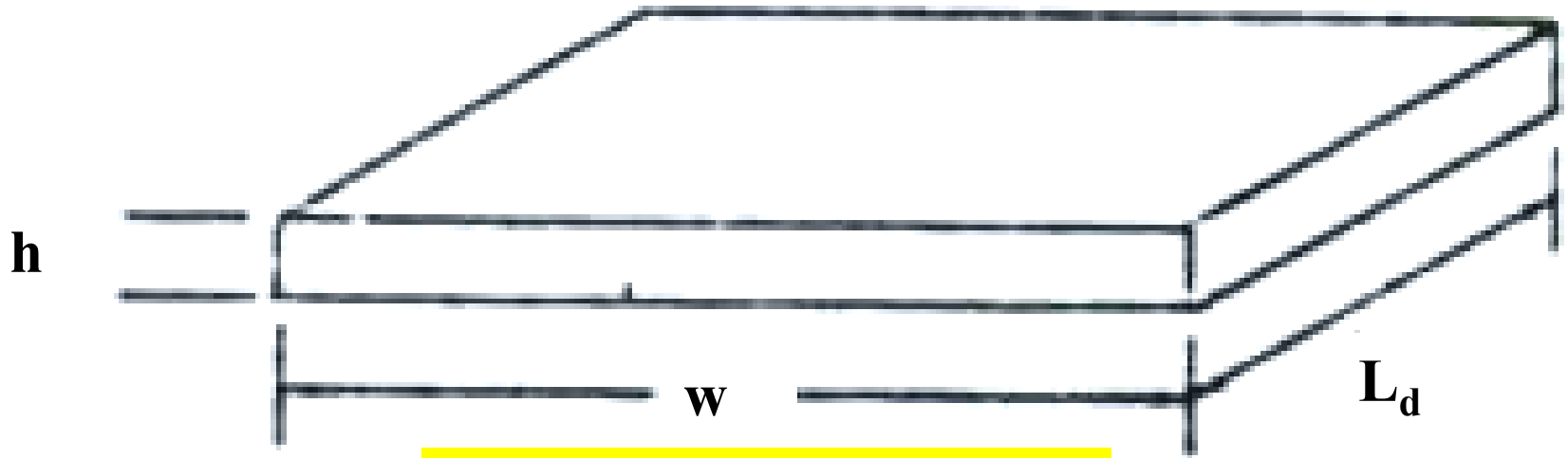
$$W = 0.0641 \text{ m}$$

$$Q_{d,2} = \frac{1}{2} U_z H_2 W = \frac{0.1497 \cdot 0.006 \cdot 0.0641}{2} = 2.88 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{p,2} = \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_2} \sin \phi = \frac{(0.006)^3 0.0641 \cdot \Delta P}{12 \cdot 250} \frac{1}{0.5} \sin 17.7^\circ =$$
$$2.806 \times 10^{-12} \Delta P \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$1.92 \times 10^{-5} = 2.88 \times 10^{-5} - 2.806 \times 10^{-12} \Delta P \Rightarrow$$
$$\Delta P = 3.42 \times 10^6 \text{ Pa}$$

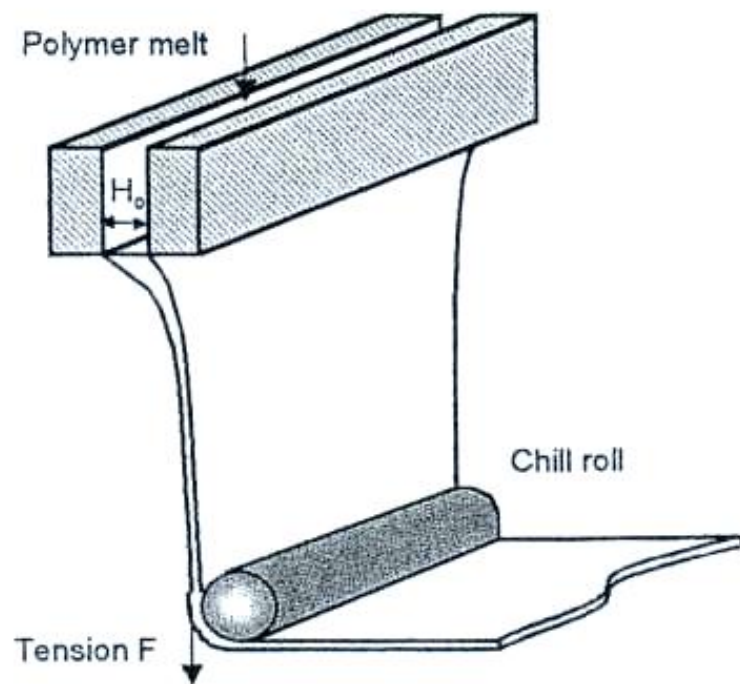
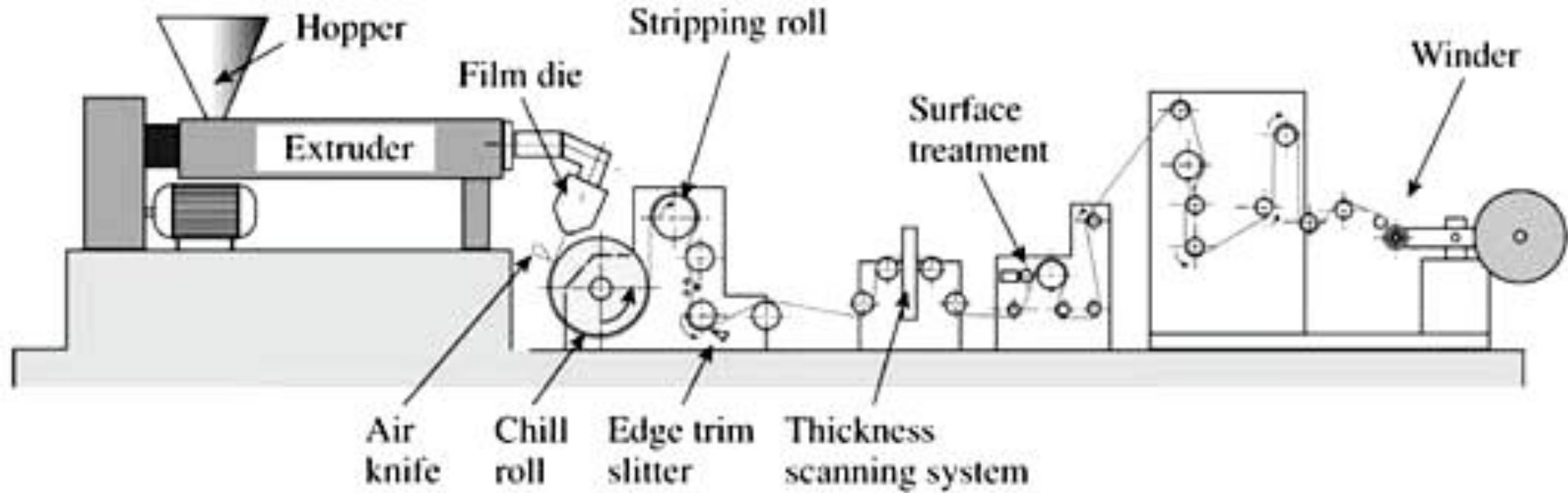
(1)



$$Q_{\text{εκβολέα}} = Q_{\text{μήτρα}}$$

$$Q_{\mu} = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d} \Rightarrow 1.92 \times 10^{-5} = \frac{1 \cdot h^3 \cdot 3.42 \times 10^6}{12 \cdot 250 \cdot 0.01} \Rightarrow$$

$$h = \left(\frac{1.92 \times 10^{-5} \cdot 30}{3.42 \times 10^6} \right)^{1/3} \Rightarrow h = 5.52 \times 10^{-4} \text{ m}$$



2) Σύστημα μονοκόχλιου εκβολέα έχει κοχλία με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: βάθος αύλακας 6.3 mm, πέλμα ελίκωσης 12 mm, διάμετρος κυλίνδρου 120 mm, μήκος ζώνης δοσιμετρίας 400 mm, γωνία ελίκωσης 17.7° . Στο παραπάνω σύστημα εκβάλεται ABS στους 190°C με ταχύτητα περιστροφής του κοχλία 60 RPM.

α) Χρησιμοποιώντας δεδομένα για το ιξώδες από το διπλανό διάγραμμα, να κατασκευασθεί γράφημα της ογκομετρικής παροχής εξόδου σε συνάρτηση με την πίεση ΔP που αναπτύσσεται στην ζώνη δοσιμετρίας, για τιμές ΔP από 0 μέχρι 10 MPa.

Να γίνει η παραδοχή σταθερού ιξώδους με προσεγγιστική τιμή που αντιστοιχεί στο ρυθμό διάτμησης που επικρατεί στην αύλακα του κοχλία.

β) Για την παραγωγή σωλήνα από ABS χρησιμοποιείται μήτρα μορφοποίησης με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: διάμετρος 150 mm, διάκενο 2 mm, μήκος 20 mm.

Να κατασκευασθεί το διάγραμμα της ογκομετρικής παροχής εξόδου της μήτρας σε συνάρτηση με την πτώση πίεσης ΔP , για τιμές Q μεταξύ 0 και $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Για το ιξώδες του ABS στους 190°C να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα του διαγράμματος, με την παραδοχή σταθερής τιμής που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό διάτμησης.

Με τη χρήση των γραφημάτων από τα ερωτήματα (α) και (β), να υπολογισθεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος εκβολέα-μήτρα μορφοποίησης σωλήνα.

$$2a) \quad D : 120 \text{ mm} \quad L : 400 \text{ mm} \quad \phi : 17.7^\circ$$

$$H : 6.3 \text{ mm} \quad e : 12 \text{ mm} \quad Q_{\text{Εκβολέα}} = f(\Delta P)$$

$$\Delta P : 0 - 10 \text{ MPa}$$

$$Q_d = \frac{1}{2} U_z H W$$

$$W = \pi D \sin \phi - e = \pi \cdot 0.12 \cdot \sin 17.7^\circ - 0.012 \Rightarrow$$

$$W = 0.1026 \text{ m}$$

$$U_z = \pi D N \cos \phi = \frac{\pi \cdot 0.12 \cdot 60}{60} \cos 17.7 = 0.3591 \text{ m/s}$$

$$Q_d = \frac{1}{2} U_z H W = \frac{0.3591 \cdot 0.0063 \cdot 0.1026}{2} = 1.161 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$$

2α)

$$\dot{\gamma} = \frac{U_z}{H} = \frac{0.3591}{0.0063} = 57 \text{ s}^{-1}$$

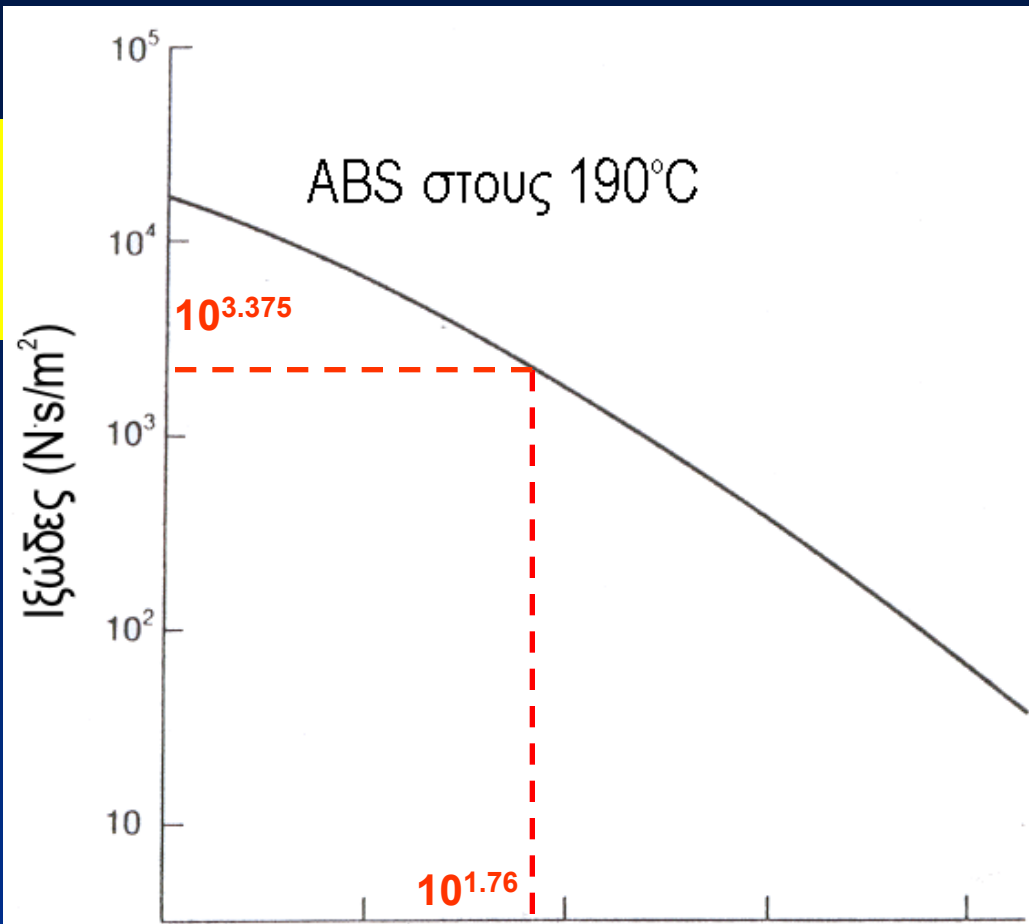
$$\mu = 2371 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

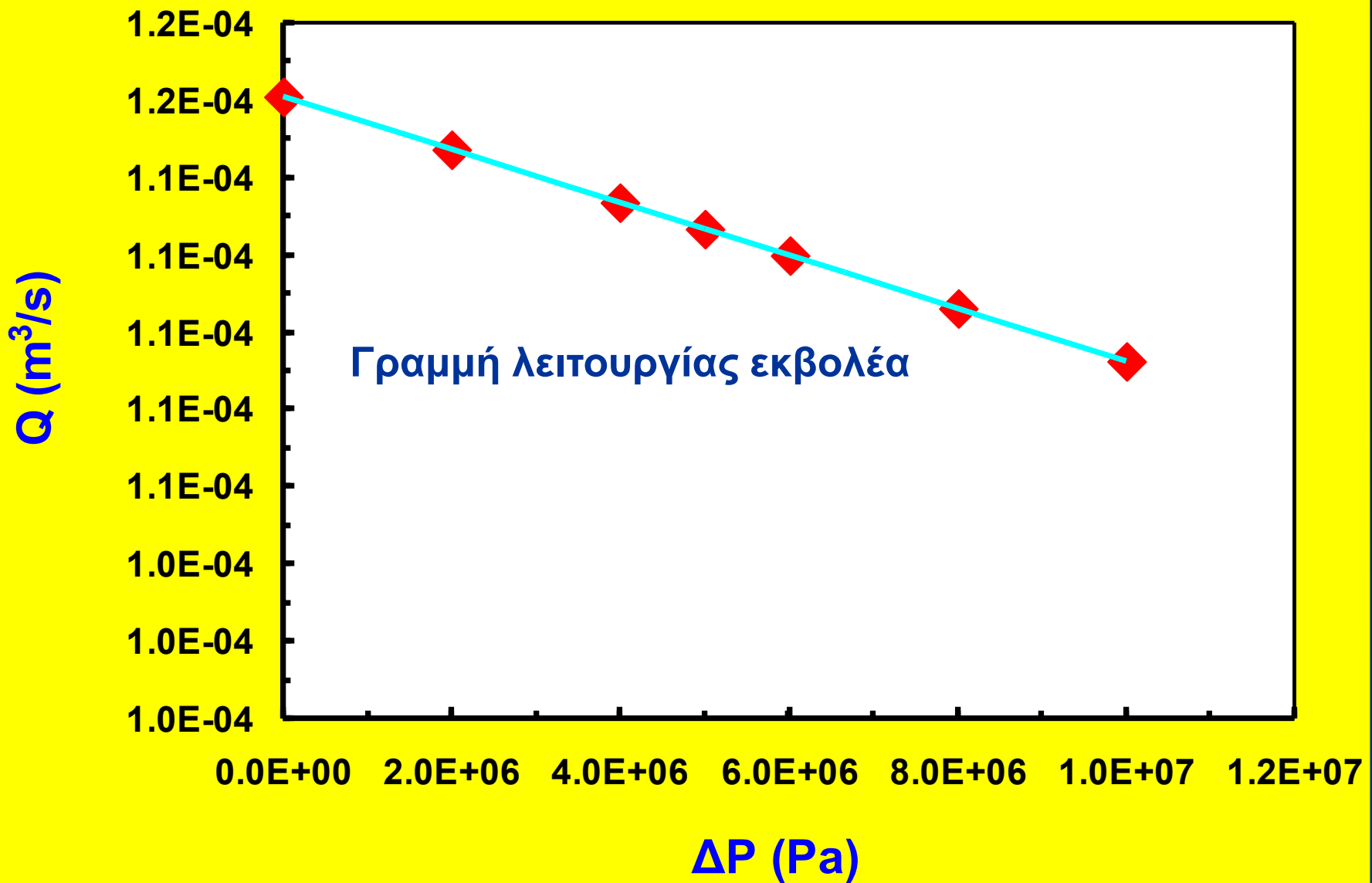
$$Q_p = \frac{H^3 W}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} \sin \phi$$

?

$$Q_p = \frac{0.1026 \cdot (0.0063)^3 \cdot 0.304 \cdot \Delta P}{12 \cdot 2371 \cdot 0.4} = (6.852 \times 10^{-13} \Delta P) \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q = Q_d - Q_p = (1.161 \times 10^{-4} - 6.852 \cdot 10^{-13} \Delta P) \text{ m}^3 / \text{s}$$





$$Q = (1.161 \times 10^{-4} - 6.852 \cdot 10^{-13} \Delta P) \text{m}^3 / \text{s}$$

$$2\beta) \quad D : 150\text{mm} \quad h : 2\text{mm} \quad L_d : 20\text{mm}$$

$$\Delta P = f(Q_{\text{Μήτρας}}) \quad Q : 0 - 2 \times 10^{-4} \text{m}^3 / \text{s}$$

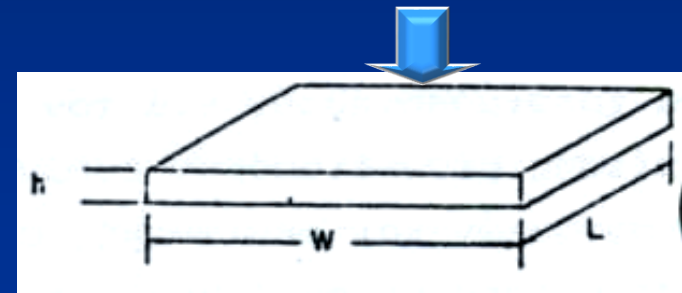
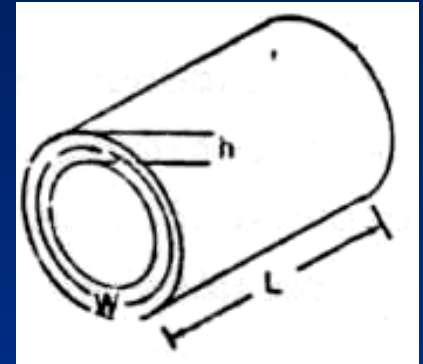
$$Q = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L_d}$$

$$w = \pi D = \pi \cdot 0.15 = 0.4712\text{m}$$

$$\Delta P = \frac{12\mu L_d Q}{wh^3} =$$

$$\frac{12 \cdot 0.02 \cdot \mu \cdot Q}{0.4712 \cdot (0.002)^3} \Rightarrow$$

$$\Delta P = 63.66 \times 10^6 \mu \cdot Q \quad \mu?$$



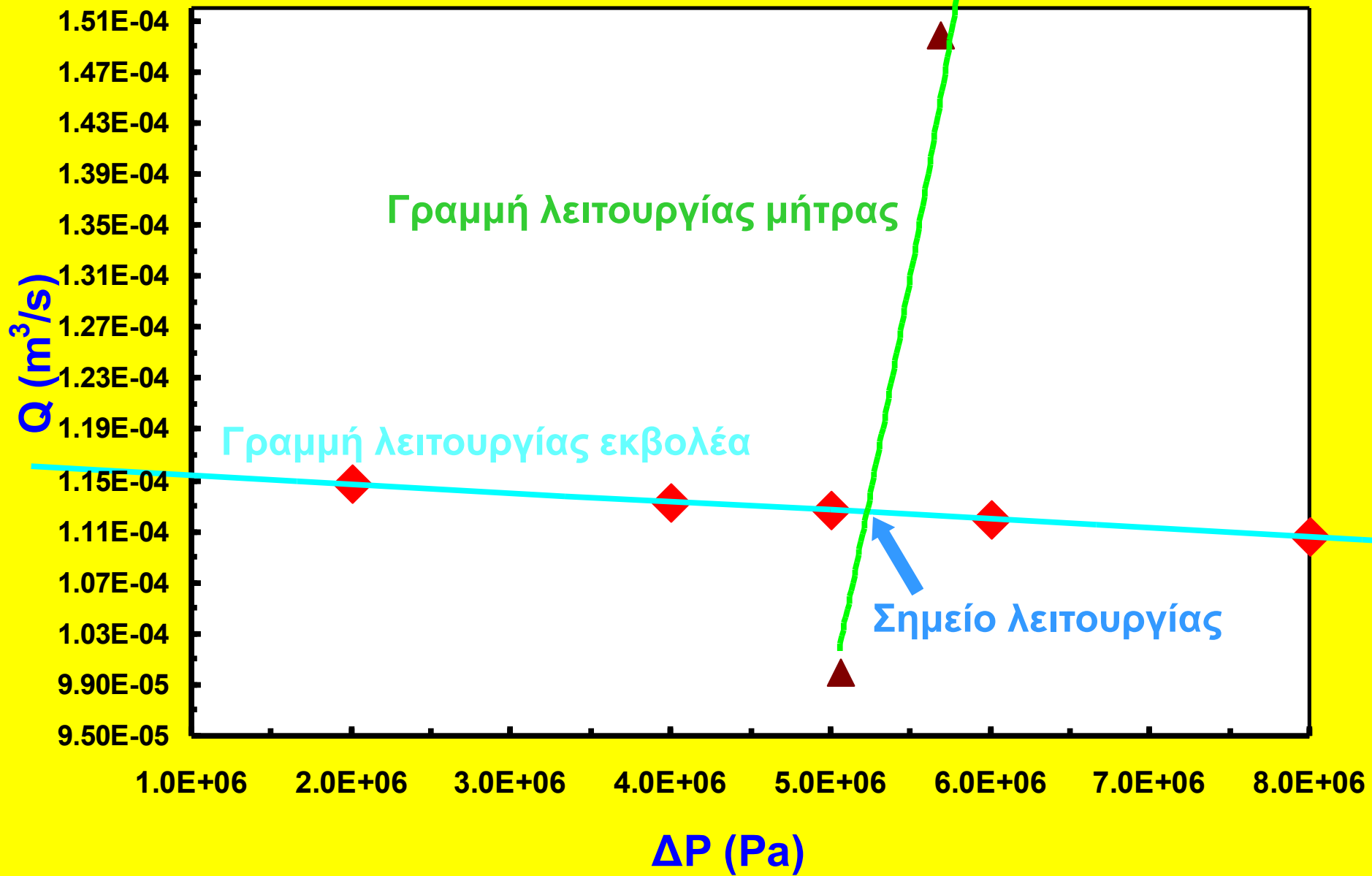
$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{wh^2} \quad \dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{0.4712 \cdot (0.002)^2} \Rightarrow \dot{\gamma}_w = 3.18 \times 10^6 Q$$

2β)



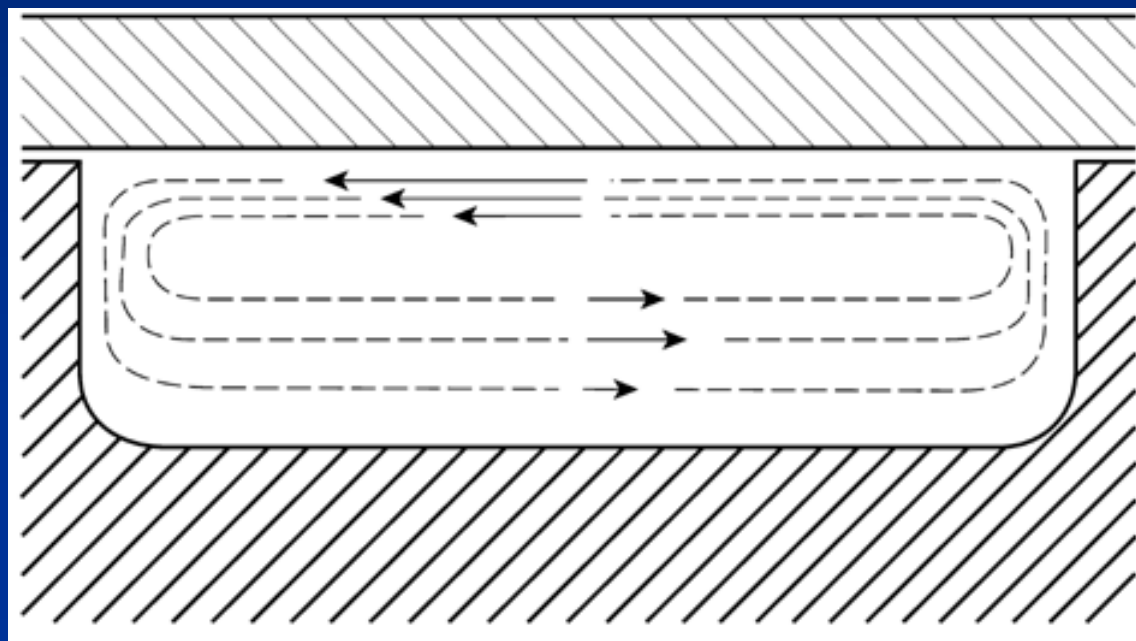
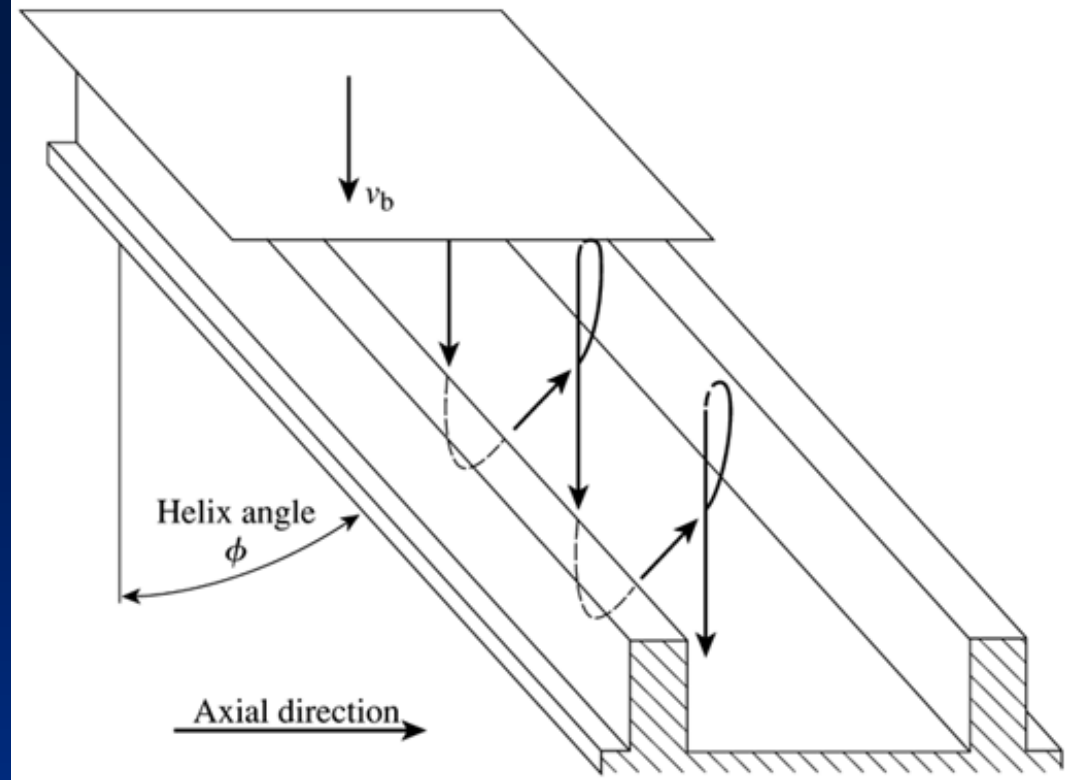
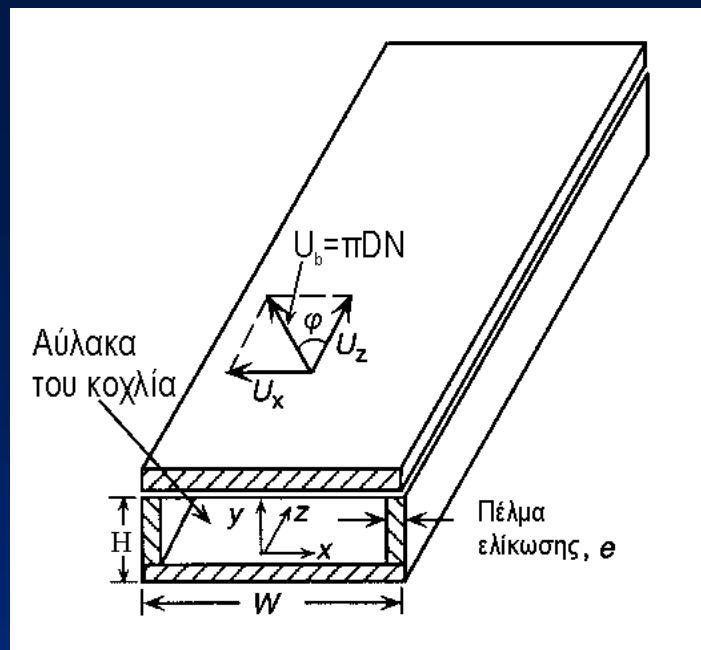
$$\Delta P = 63.66 \times 10^6 \mu Q$$

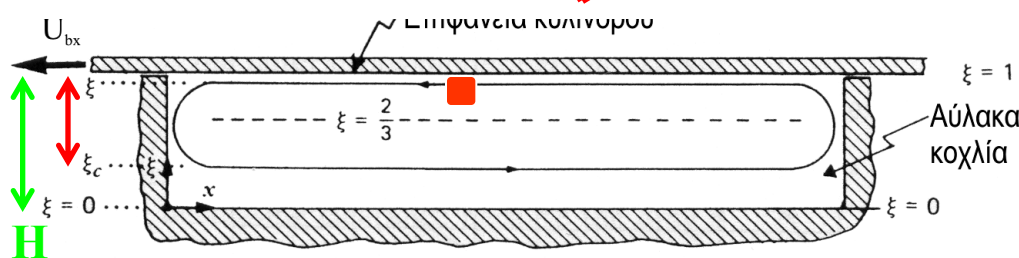
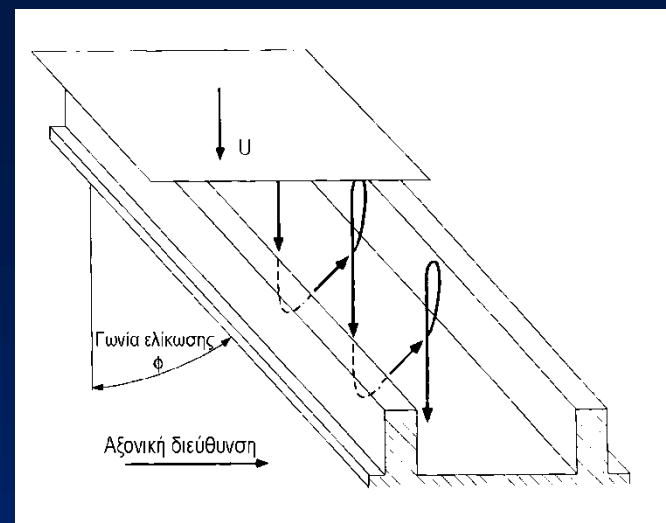
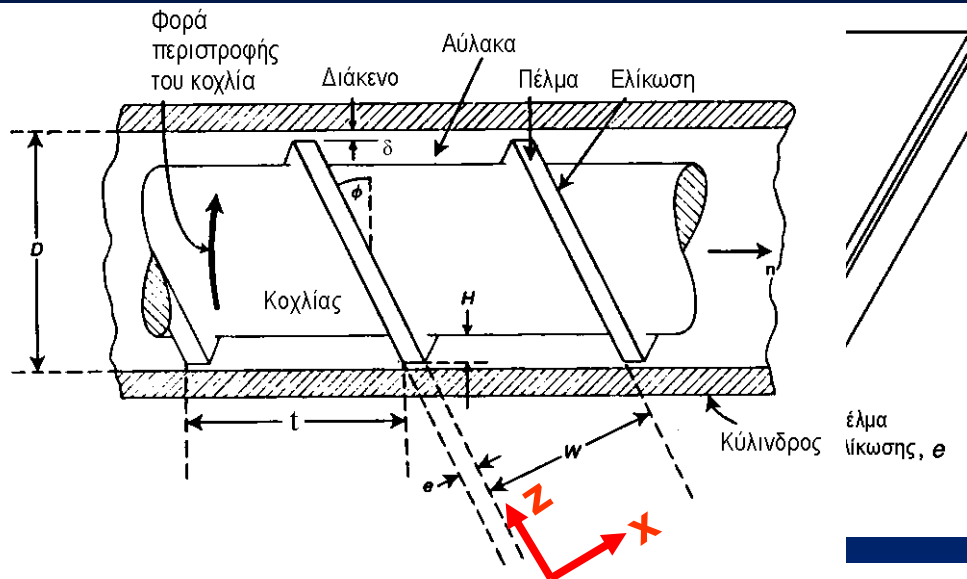
$Q \times 10^4 \text{ (m}^3/\text{s)}$	1.0	1.5	2
$\dot{\gamma}_w$	318.3	477.5	636.6
μ	794	596	501
$\Delta P \text{ (MPa)}$	5.055	5.691	6.378



$$Q = 1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\Delta P = 5.21 \text{ MPa}$$





$$\xi = y / H$$

$$U_b = \pi N D$$

$$U_z = U_b \cos \phi$$

$$U_x = U_b \sin \phi$$

$$u_x = v_x / U_x$$

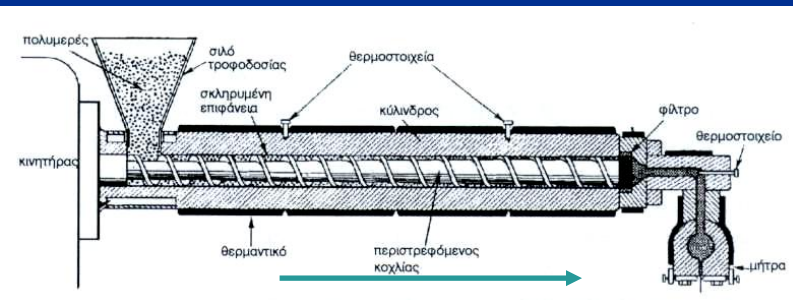
$$u_x = \xi(2 - 3\xi)$$

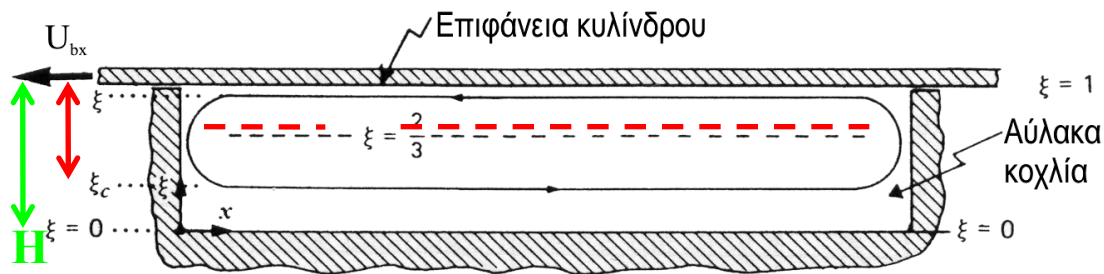
$$u_z = v_z / U_z$$

$$u_z = \xi + 3\xi(1 - \xi) \frac{Q_p}{Q_d}$$

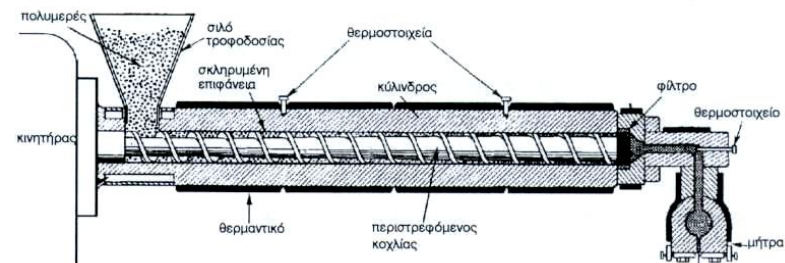
$$u_\ell = v_\ell / U_b$$

$$u_\ell = 3\xi(1 - \xi) \left(1 + \frac{Q_p}{Q_d} \right) \sin \phi \cos \phi$$





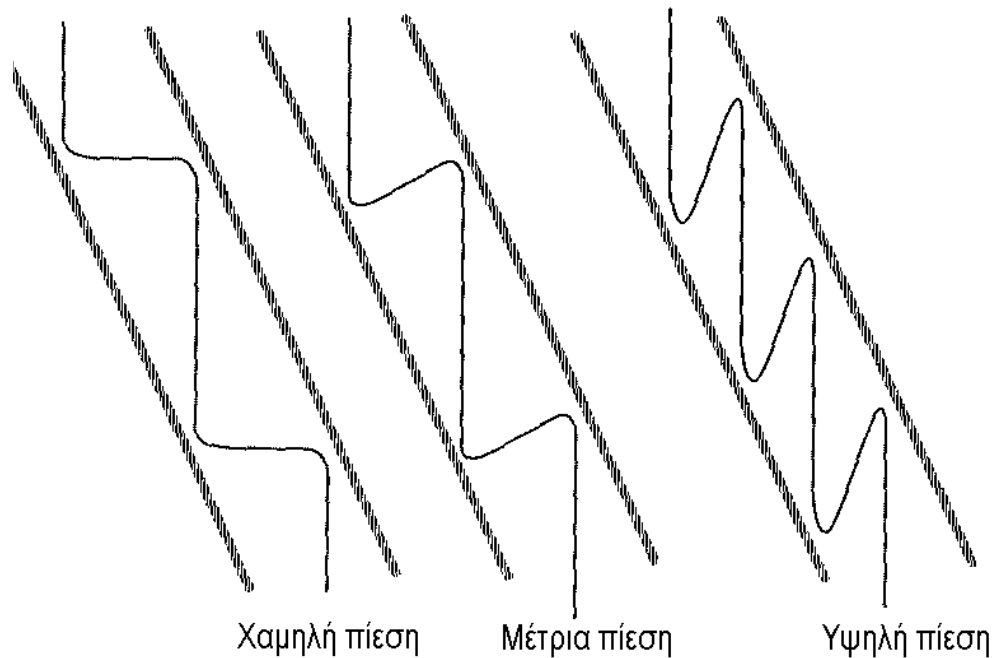
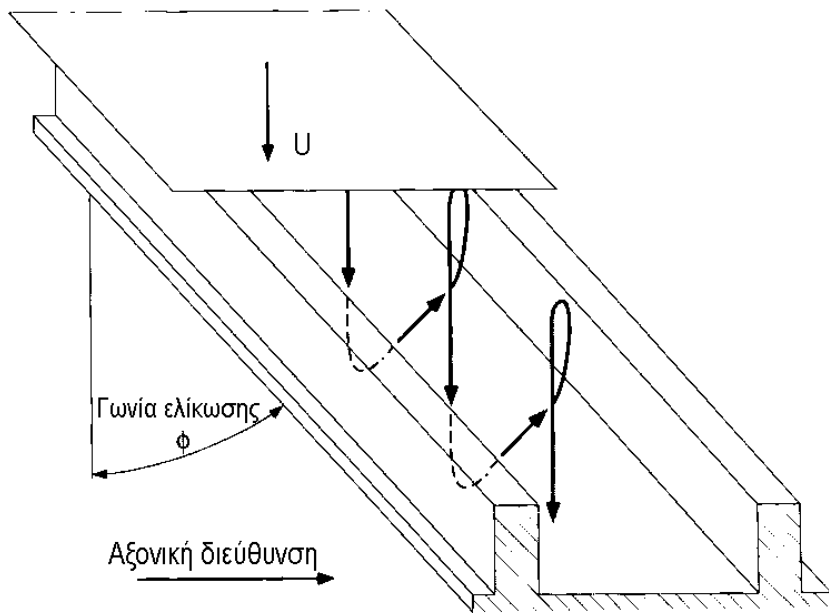
$$\xi = y / H$$

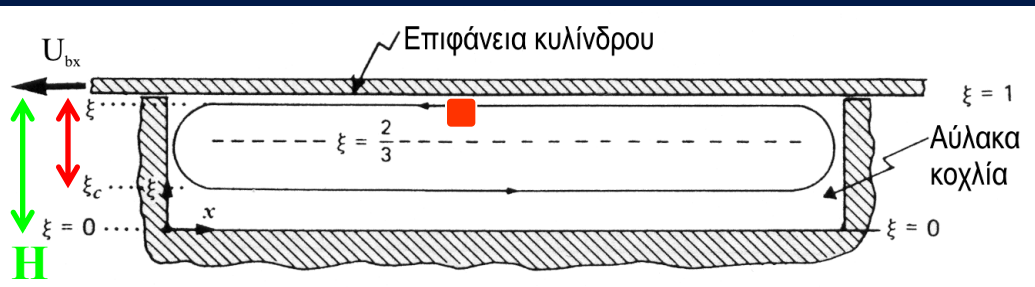


l : αξονικό μήκος εκβολέα

- Συνάρτηση κατανομής του χρόνος παραμονής στον εκβολέα
- Συνάρτηση κατανομής της παραμόρφωσης

Κίνηση ρευστού στη ζώνη μεταφοράς τήγματος





$$u_z = \xi + 3\xi(1 - \xi) \frac{Q_p}{Q_d}$$

$$u_x = \xi(2 - 3\xi)$$

$$\xi = y / H$$

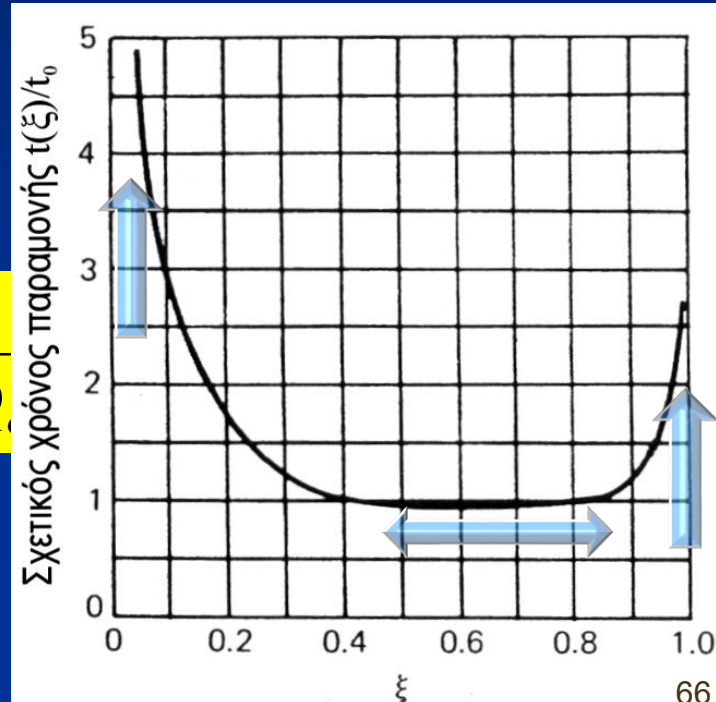
Συνάρτηση κατανομής του χρόνος παραμονής στον εκβολέα

$$t(\xi) = \left[\frac{\ell}{3U_b(1 + Q_p / Q_d) \sin \phi \cos \phi} \right] \frac{3\xi - 1 + 3\sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2}}{\xi[1 - \xi + \sqrt{1 + 2\xi - 3\xi^2}]}, \frac{2}{3} \leq \xi \leq 1$$

Ελάχιστος χρόνος παραμονής στον εκβολέα:

$\xi = 2/3$: τα σωματίδια του ρευστού, δεν έχουν συνιστώσα ταχύτητας στην x-κατεύθυνση

$$t_0 = \frac{3\ell}{2U_b(1 + Q_p / Q_d) \sin \phi \cos \phi} = \frac{3Z}{2U_z(1 + Q_p / Q_d)}$$



Μονοκόχλιος εκβολέας (single screw extruder)

👍 Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό κόστος
- Απλός σχεδιασμός
- Αξιοπιστία

👎 Μειονεκτήματα

- Σε κάποιες εφαρμογές η ικανότητα ανάμιξης δεν είναι ικανοποιητική

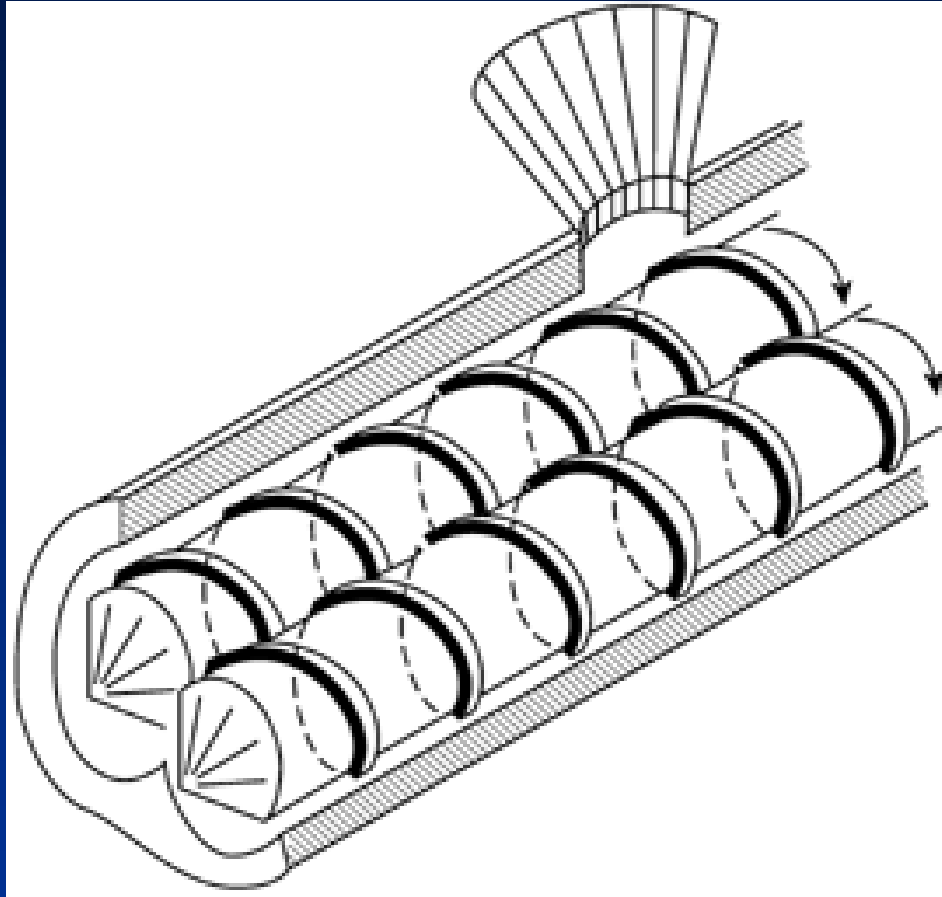


Διπλοκόχλιος εκβολέας (twin screw extruder)



- ✓ Βελτιωμένη ικανότητα ανάμειξης
- ✓ Μικρότερος χρόνος παραμονής → Θερμοευαίσθητα υλικά
- ✓ Αυξημένη παροχή σε χαμηλές στροφές

Διπλοκόχλιος εκβολέας (twin screw extruder)

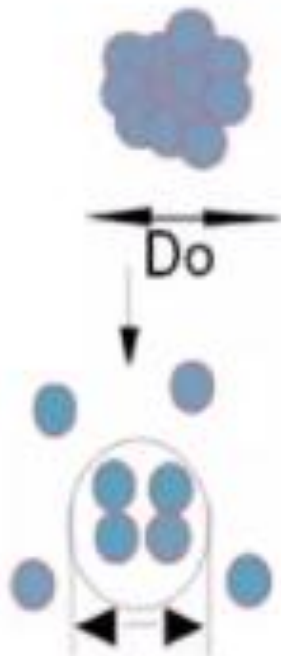


Χρησιμοποιείται κυρίως για: **εκβολή προφίλ** και
ανάμειξη (compounding)

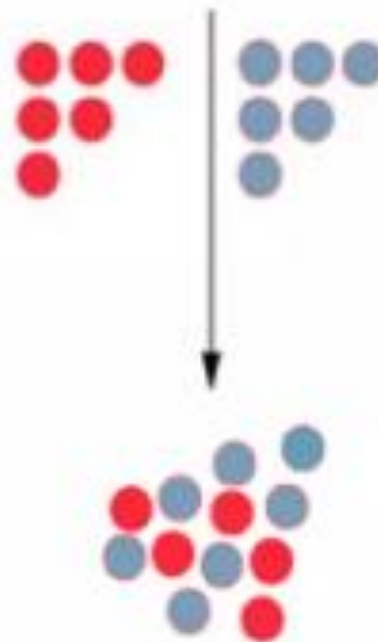
Ανάμειξη με διασπορά

Ανάμειξη με κατανομή

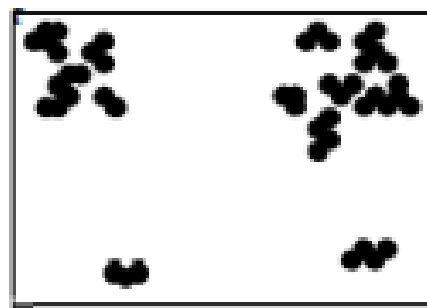
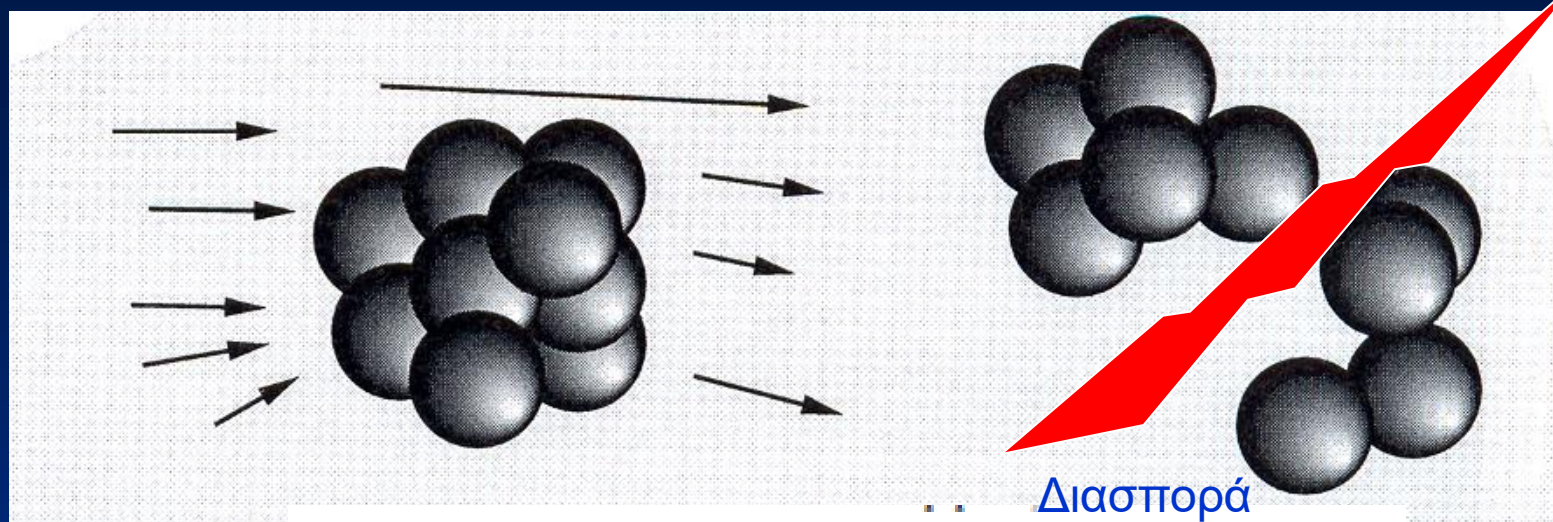
**Dispersive
Mixing**
=
**Break up of
agglomerates and
aggregates**



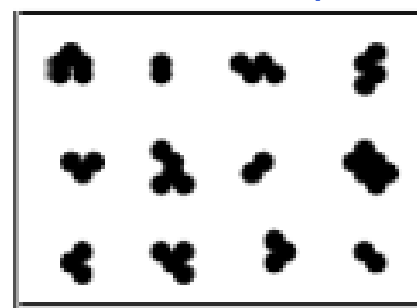
**Distributive
Mixing**
=
**Distribution of
primary particles**



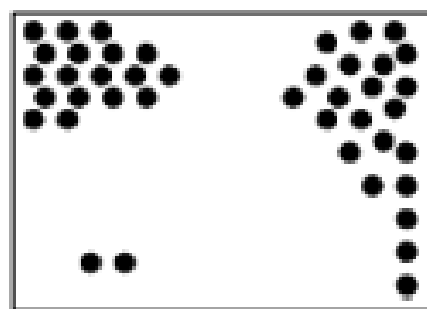
Διασπορά (dispersion) και κατανομή (distribution) προσθέτων (στερεών σωματιδίων) στη μάζα του πολυμερούς



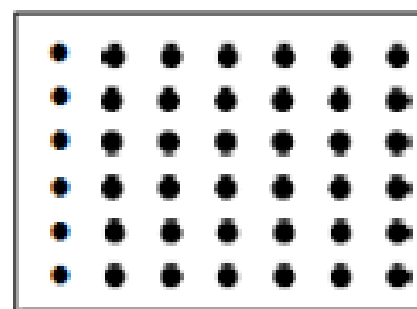
BAD DISPERSION : BAD DISTRIBUTION



BAD DISPERSION : GOOD DISTRIBUTION



GOOD DISPERSION : BAD DISTRIBUTION



GOOD DISPERSION : GOOD DISTRIBUTION

Ανάμειξη (Compounding):

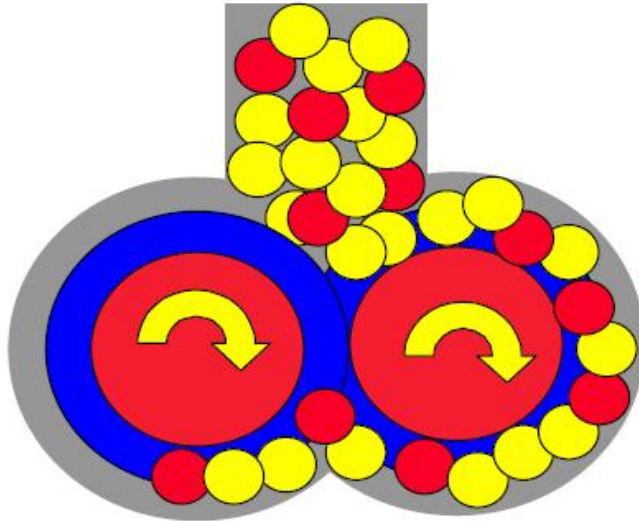
Ανάμειξη προσθέτων με πολυμερή → παραγωγή **masterbatch** των προσθέτων στο πολυμερές σε υψηλή συγκέντρωση (10-30 %) (συνήθως σε δικόχλιους εκβολείς)

Αραίωση masterbatch με πολυμερές → μέσω εκβολής (μονοκόχλιος εκβολέας) → επιθυμητή συγκέντρωση προσθέτου στο τελικό προϊόν

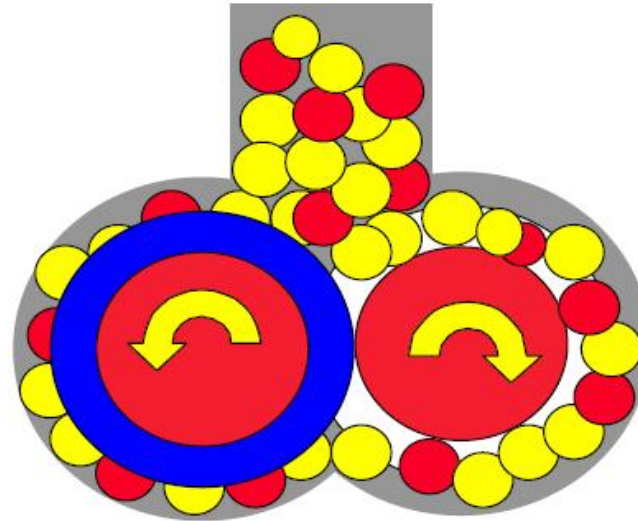


Ομόστροφοι και ετερόστροφοι

Twin-screw extruder versions:

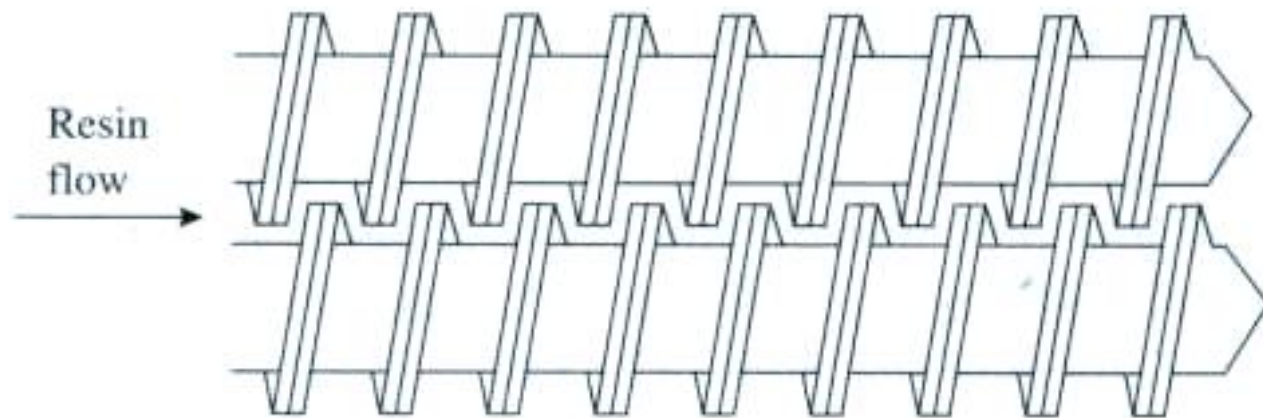


Co-rotating

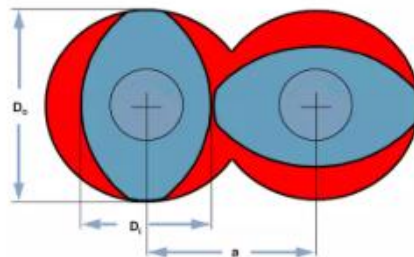


Counter-rotating

Διπλοκόχλιος εκβολέας (twin screw extruder)



Design Principal



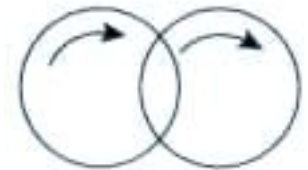
D_o / D_i = Diameter ratio
determines shear, degassing and
powder intake

Md / a^3 = Specific torque
determines power density and filling
degree

n = Screw speed
determines shear and mixing

D_o = Outer diameter
 D_i = Inner diameter
 a = Centerline distance

Screw rotation



Material path

Ομόστροφους

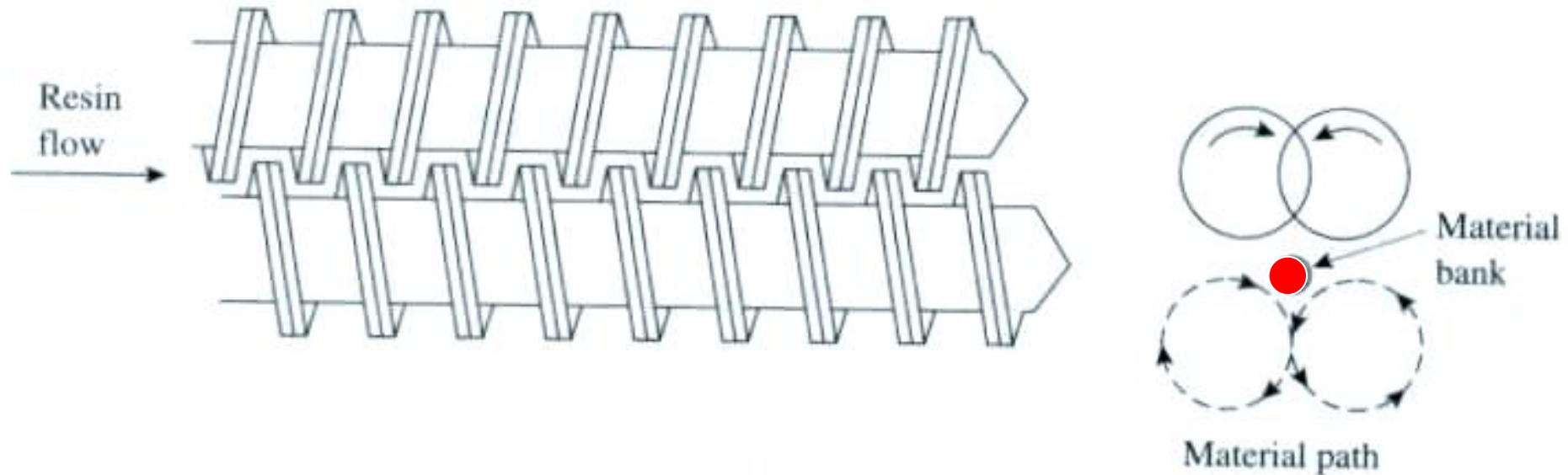
- Το υλικό μεταφέρεται από τον ένα κοχλία στον άλλο κάνοντας το σχήμα 8.
- Μεγαλύτερη επαφή με τον θερμαινόμενο κύλινδρο.
- Καλύτερη ανάμειξη.
- Κατάλληλη διάταξη για θερμοευαίσθητα υλικά, διότι το υλικό εξωθείται μέσω του εκβολέα πολύ γρήγορα.

Ετερόστροφους

Το υλικό διατέμνεται και συμπιέζεται.

Μικρή ποσότητα του υλικού περνά μεταξύ των δύο κοχλίων.

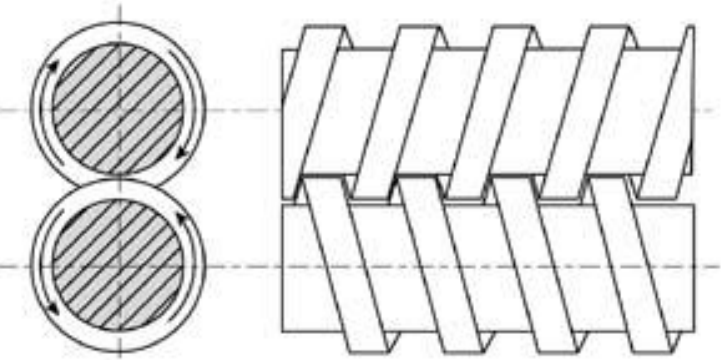
Το συσσωρευμένο υλικό μεταφέρεται κατά μήκος του εκβολέα.



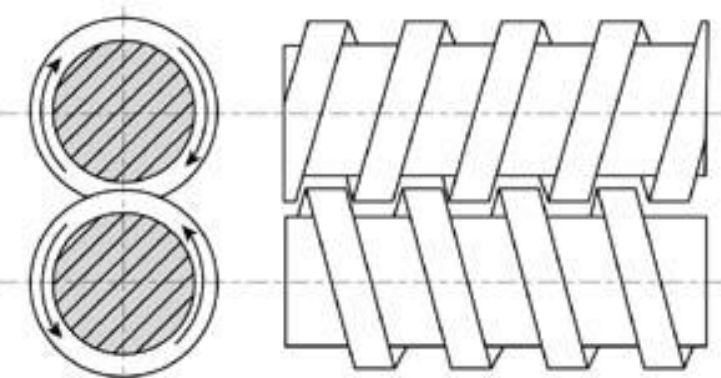
Ομόστροφοι & Ετερόστροφοι

- Έχουν ίδιες γωνίες ελίκωσης
- Ο κοχλίας περιστρέφεται μέχρι 1400 rpm
- Μεγάλη χρήση σε προετοιμασία μιγμάτων (compounding), πολύ μικρή σε εκβολή προφίλ

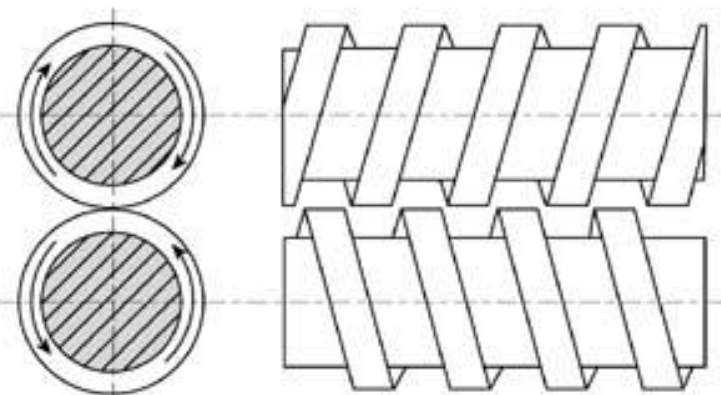
- Έχουν αντίθετες γωνίες ελίκωσης
- Ο κοχλίας περιστρέφεται μέχρι 500 rpm
- Μικρή χρήση σε προετοιμασία μιγμάτων (compounding), πολύ μεγάλη σε εκβολή προφίλ



(a)



(b)



(c)

Συμπλεκόμενους (intermeshing)

Οι σπείρες του ενός κοχλία εισχωρούν στην εκγλυφή του άλλου κοχλία.

(a) Συζευκτούς (conjugated):
το μεγαλύτερο μέρος της εκγλυφής καταλαμβάνεται από την εισχωρούσα σπείρα

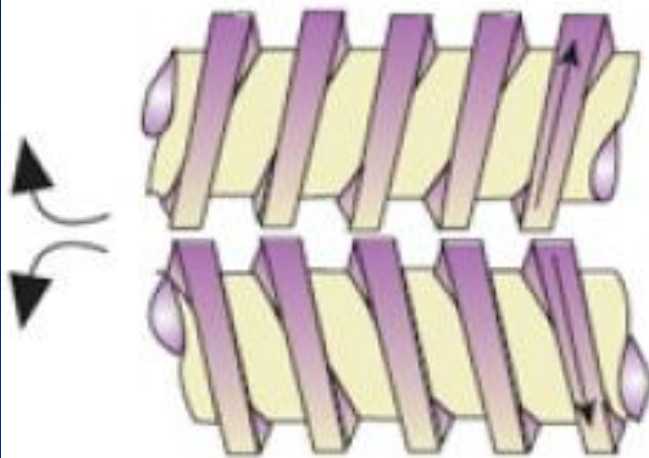
(b) Ασύζευκτους (non-conjugated)

Εφαπτόμενους (non-intermeshing)

Οι σπείρες του ενός κοχλία εφάπτονται με τις σπείρες του άλλου κοχλία.

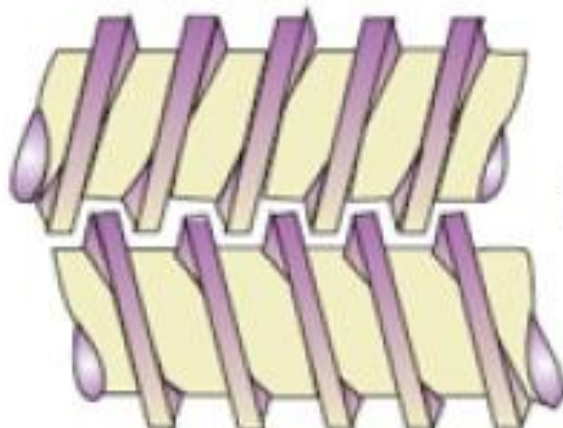
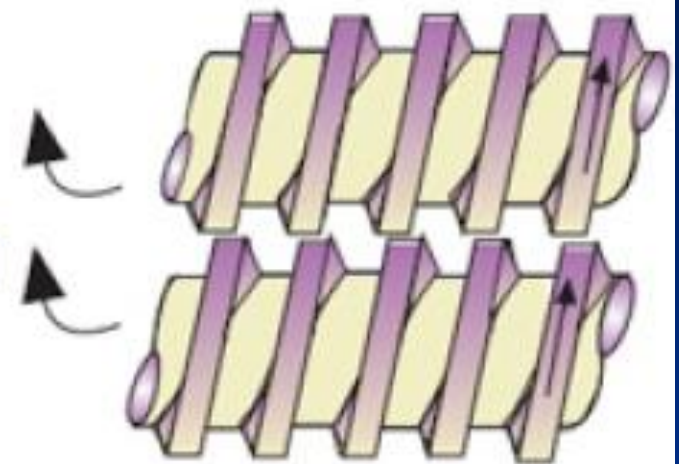
Εφαπτόμενοι (non-intermeshing) και συμπλεκόμενοι (intermeshing)

Counter-rotating

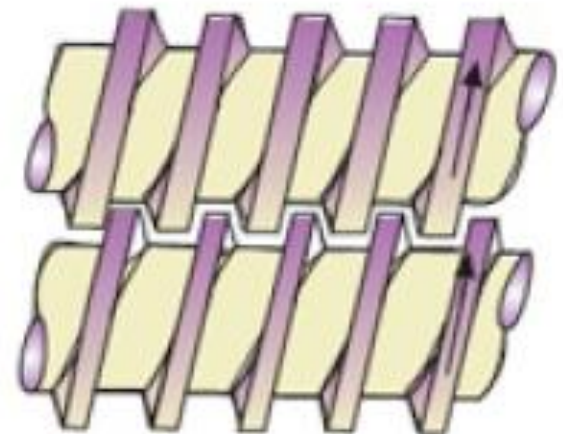


non-
intermeshing

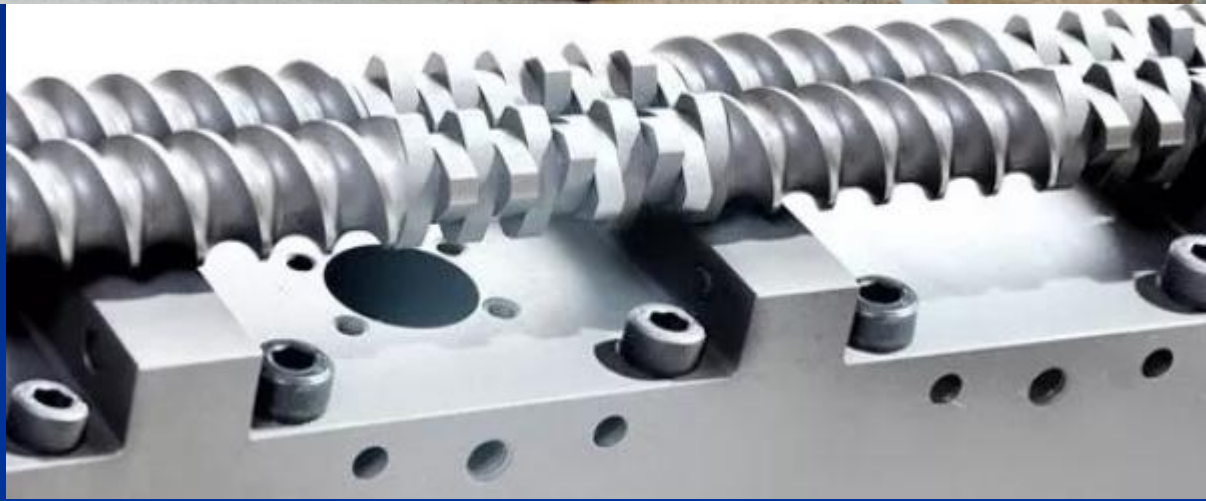
Co-rotating



intermeshing



Εργαστ. “Τεχνολογίας Πολυμερών”: Δικόχλιος εκβολέας σε σειρά με λουτρό ψύξης και κοκοποιητή



Haake PTW 16



- Παράλληλοι ομόστροφοι, συμπλεκόμενοι κοχλίες (parallel co-rotating intermeshing screws)
- Συναρμολογούμενοι κοχλίες (segmented screws):
 - τμήματα μεταφοράς (transporting elements) και
 - τμήματα ανάμειξης (kneading elements)

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- $L/D=25:1$ ($L=400$ mm, $D=16$ mm)
- Μήτρα κυκλικής διατομής:
διάμετρος 2 mm
- Δυνατότητα = 200 g – 5 kg/h

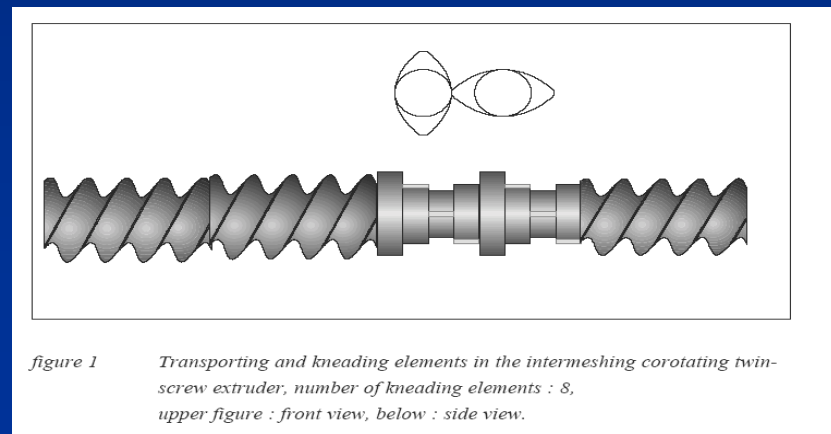
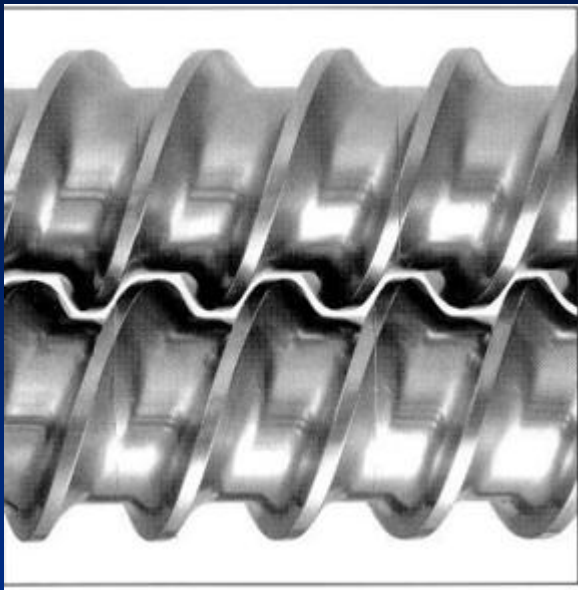
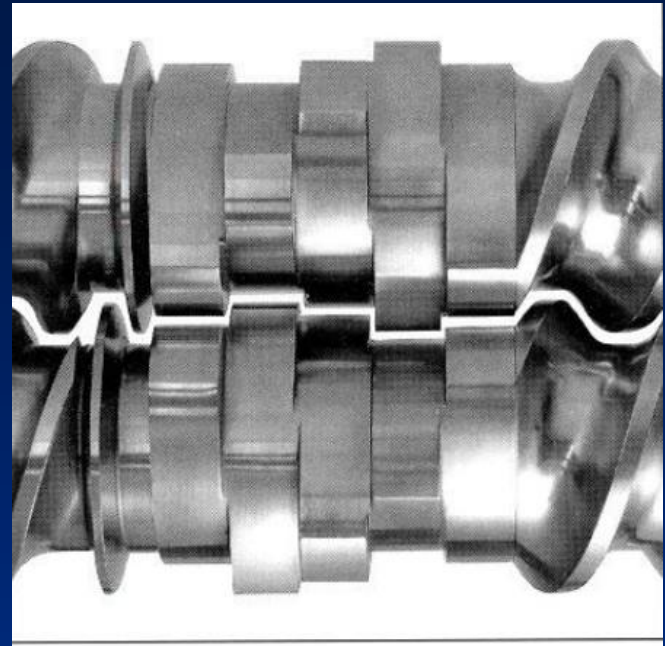


figure 1 Transporting and kneading elements in the intermeshing corotating twin-screw extruder, number of kneading elements : 8, upper figure : front view, below : side view.

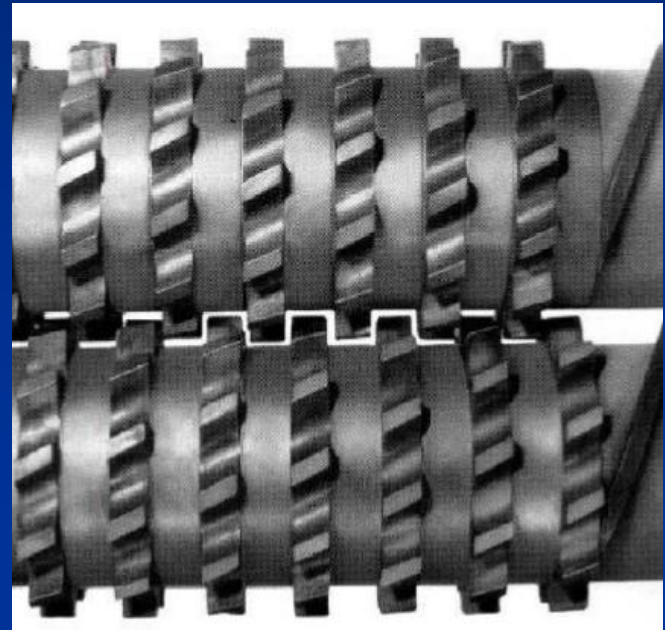
Τμήματα μεταφοράς (convey elements):



Τμήματα ανάμειξης
(kneading/mixing elements):
προκαλούν ισχυρές
διατμητικές τάσεις (→ ανάμειξη)



Ειδικά τμήματα για ηπιότερες
διατμητικές τάσεις
(πολυμερή ευαίσθητα σε
διατμητικές τάσεις)

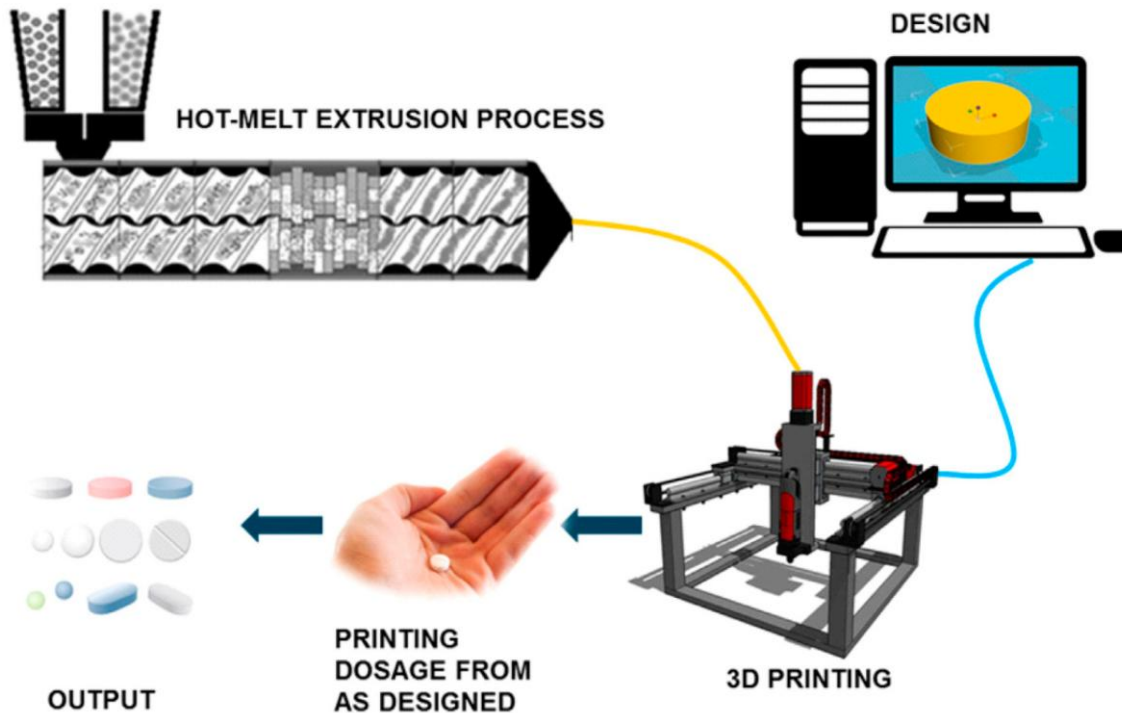


Ειδικές εφαρμογές της εκβολής

Στη φαρμακοβιομηχανία για την παρασκευή συστημάτων ελεγχόμενης αποδέσμευσης:

Για τη διασπορά της δραστικής φαρμακευτικής ουσίας (API) σε κατάλληλο πολυμερικό φορέα (hot melt extrusion, HME).

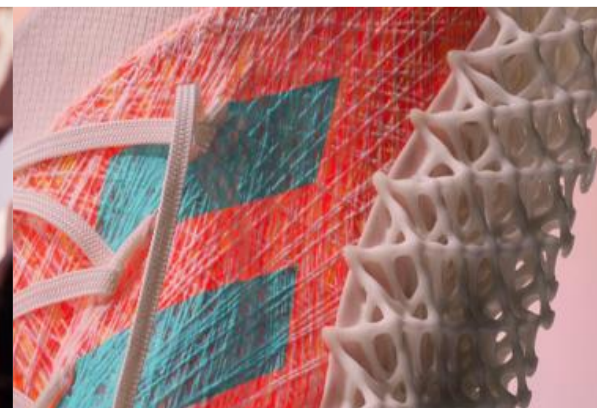
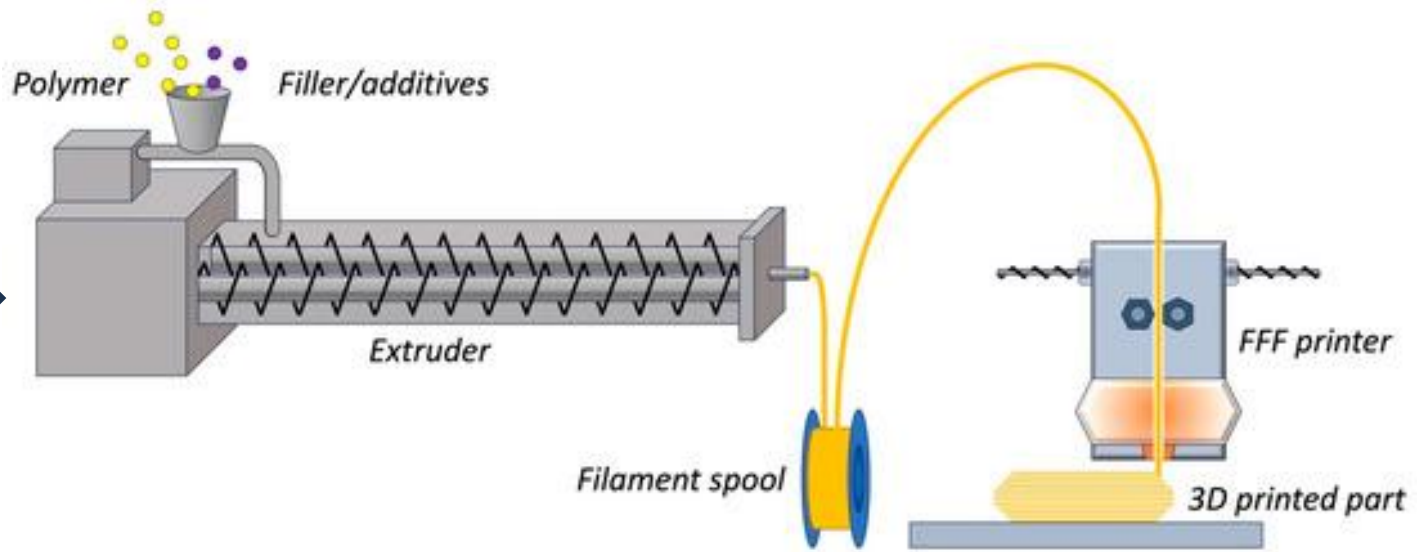
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με 3-D εκτύπωση.



Ειδικές εφαρμογές της εκβολής

Τεχνολογίες Προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing)
Τεχνολογία εναπόθεσης συντηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling, FDM), ή Κατασκευή συντηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication, FFF)

Παραγωγή του
νήματος με
εκβολή

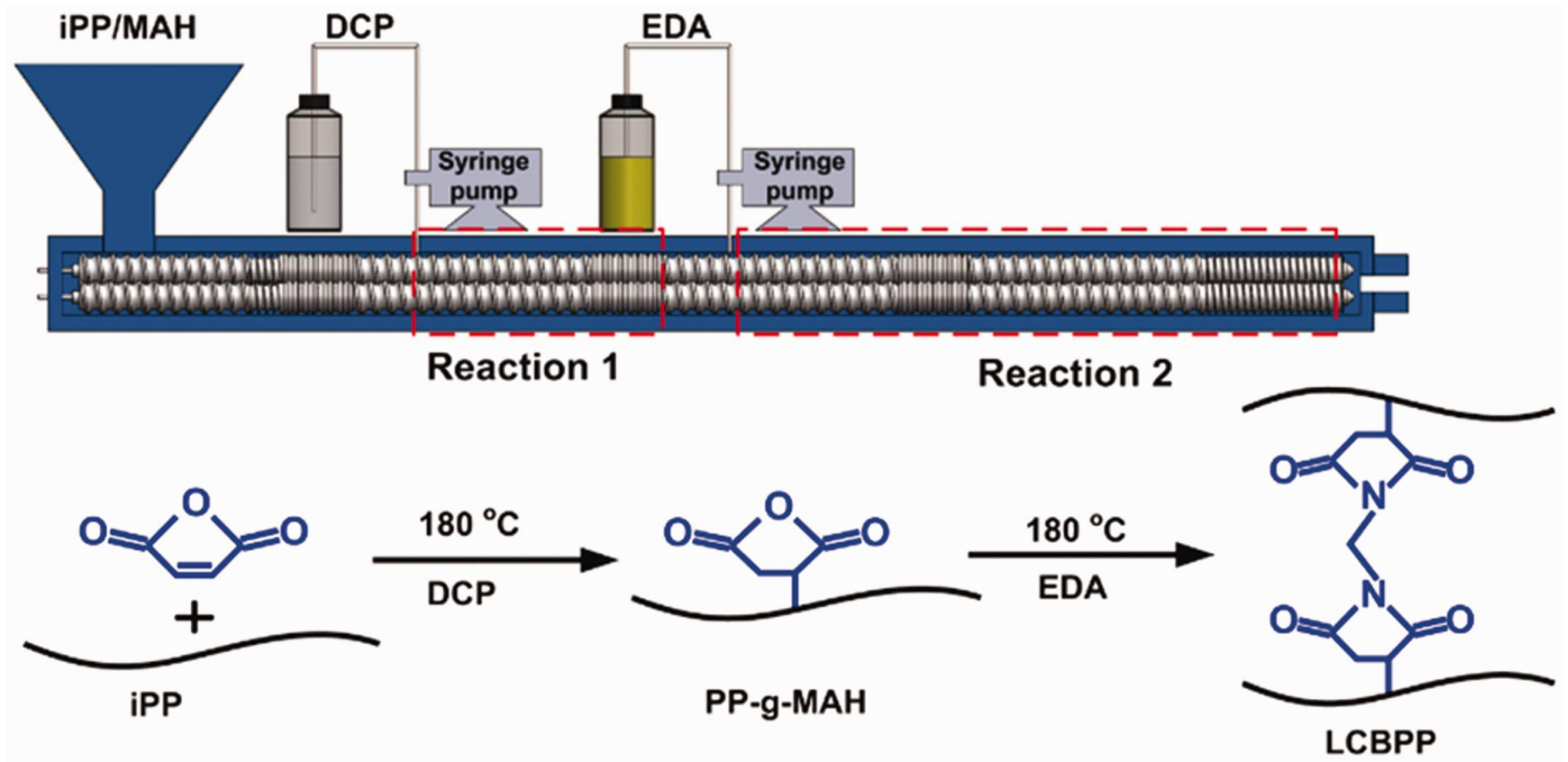


Ειδικές εφαρμογές της εκβολής

Χρήση ως αντιδραστήρας για την πραγματοποίηση αντιδράσεων (Reactive extrusion, REX):

Πλευρική τροφοδοσία στον εκβολέα με αντλία των αντιδρώντων ουσιών για αντίδραση με το πολυμερικό τήγμα.

Χρησιμοποιείται κυρίως για τροποποίηση πολυμερών.



Βιβλιογραφία

“Σημειώσεις του μαθήματος Δυναμικές Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών-Ρεολογία” στο HELIOS, Κεφ. 2

Further reading

1. J. Vlachopoulos, N.D. Polychronopoulos. “Understanding Rheology of Polymer Extrusion”, Chapter 6.
2. Κ.Γ. Παναγιώτου. “Πολυμερή: Επιστήμη και Τεχνολογία”, Εκδ. Σιμώνη 2023, Κεφ. 20.1