

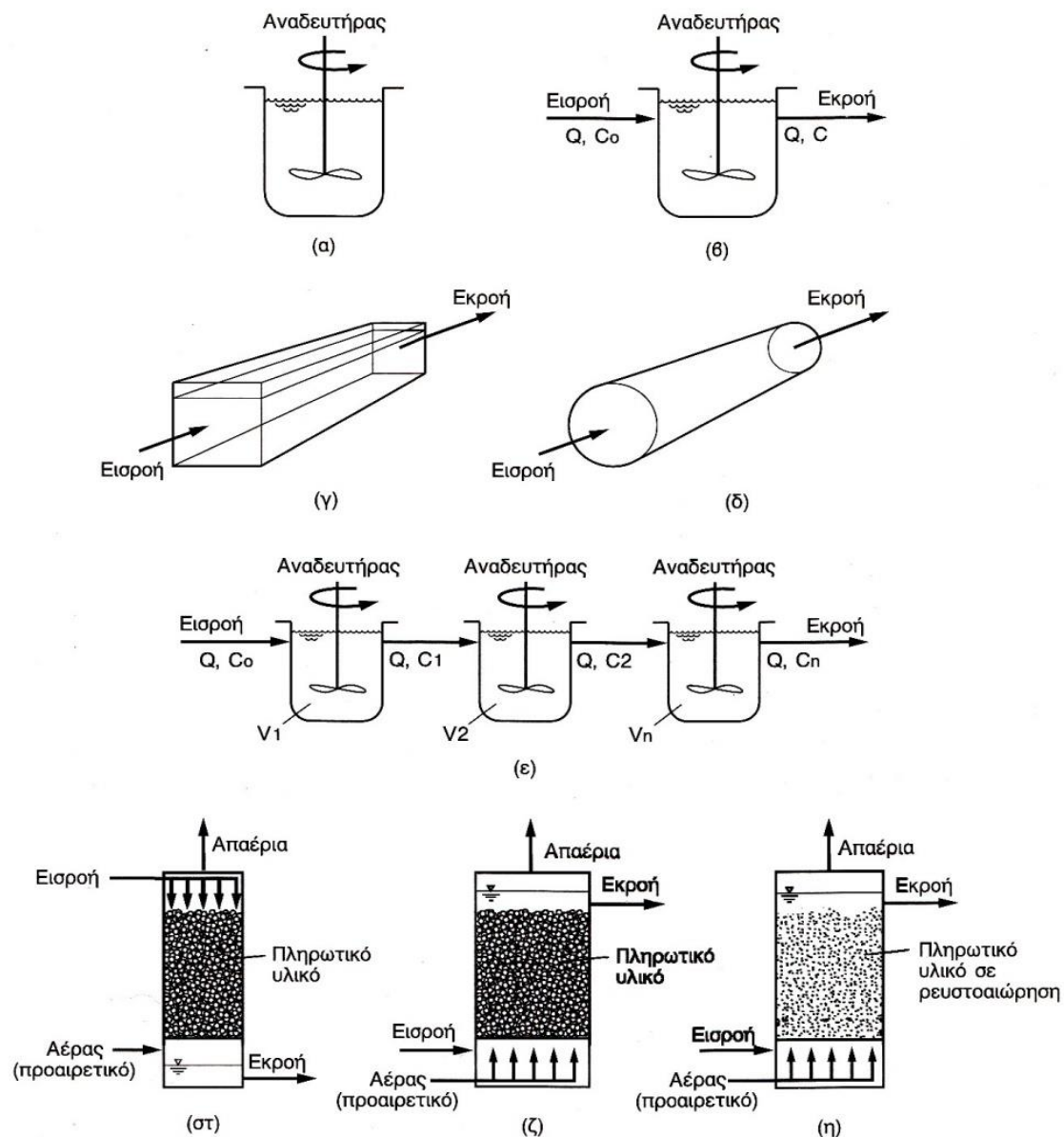
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – ΔΠΘ
Εργαστήριο διαχείρισης και τεχνολογίας υγρών αποβλήτων

Μάθημα: Τεχνολογία και διαχείριση υγρών αποβλήτων II (εργαστήριο)

Κατανομή χρόνου παραμονής σε αντιδραστήρες



Εισαγωγή - Διαφορετικοί τύποι αντιδραστήρων



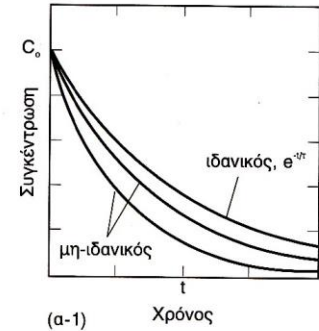
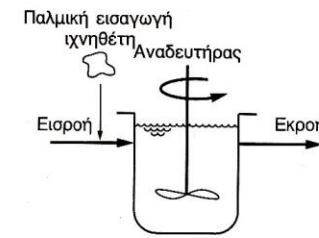
- α) ασυνεχούς λειτουργίας,
- β) πλήρους ανάμιξης,
- γ) ανοικτός εμβολικής ροής,
- δ) αυλωτός εμβολικής ροής,
- ε) πλήρους ανάμιξης σε σειρά,
- στ, ζ) με πληρωτικό υλικό,
- η) διαστελλόμενης κλίνης

Εισαγωγή

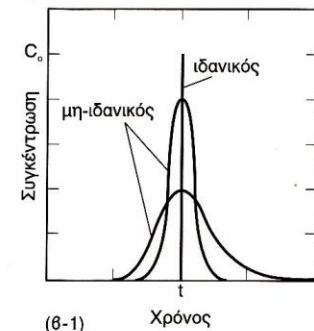
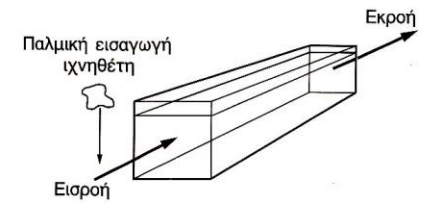
Η κατανόηση των συνθηκών ροής σε ένα χημικό αντιδραστήρα είναι απαραίτητη για την ανάλυση και το σχεδιασμό της λειτουργίας του.

Η παραδοχή της ιδανικής ροής, δηλαδή της πλήρους ανάμιξης στα δοχεία ανάδευσης ή της εμβολικής ροής στους αυλωτούς αντιδραστήρες δεν είναι συχνά ικανοποιητική για την περιγραφή των πραγματικών συνθηκών.

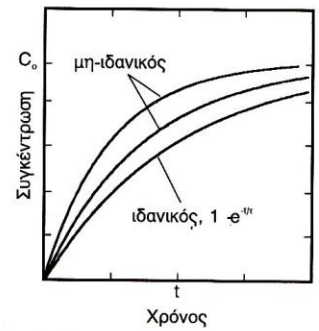
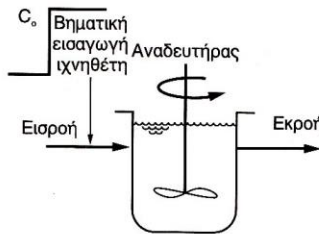
Η ποσοτική περιγραφή των αποκλίσεων από την ιδανική ροή μπορεί να γίνει με τον προσδιορισμό της **κατανομής του χρόνου παραμονής**, που χαρακτηρίζει το βαθμό ανάμιξης στον αντιδραστήρα.



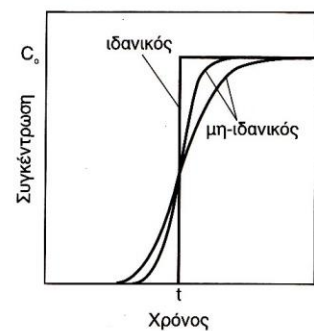
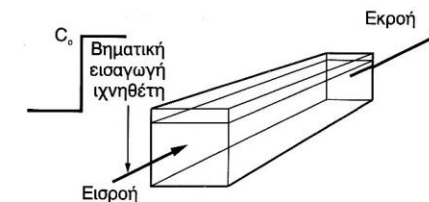
(a-1)



(β-1)



(a-2)



(β-2)

Καμπύλες απόκρισης ιχνηθέτη στην έξοδο αντιδραστήρων για παλμική και βηματική εισαγωγή

Εισαγωγή

Σκοπός της άσκησης είναι η εξοικείωση με τις μεθόδους ελέγχου της μη ιδανικής ροής

Στόχοι της άσκησης:

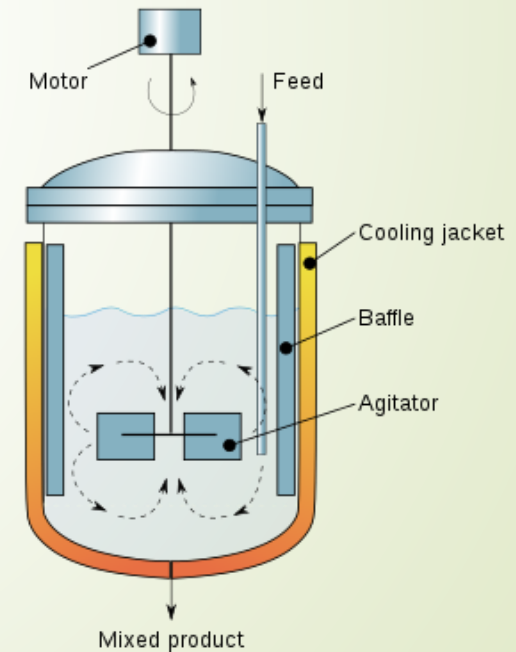
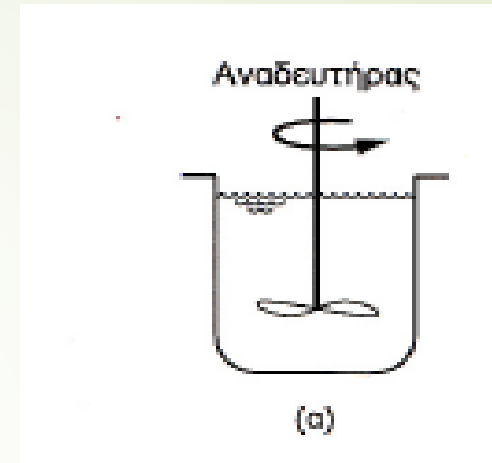
- Η πειραματική εύρεση της κατανομής του χρόνου παραμονής για τρεις τύπους αντιδραστήρων
 - α) δοχεία ανάδευσης (CSTR)
 - β) αυλωτός αντιδραστήρας
 - γ) συστοιχία δοχείων ανάδευσης
- Ο θεωρητικός υπολογισμός των κατανομών του χρόνου παραμονής και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Θεωρία – Τύποι αντιδραστήρων

α) Αντιδραστήρες διαλείποντος έργου

Ο τρόπος λειτουργίας του αντιδραστήρα διαλείποντος έργου είναι μη συνεχής, και περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Τοποθέτηση όλων των αντιδρώντων στο δοχείο του αντιδραστήρα
- Έναρξη της αντίδρασης
- Ολοκλήρωση της αντίδρασης (μέχρι τον επιθυμητό βαθμό μετατροπής)
- Απομάκρυνση των προϊόντων και των αντιδρώντων από τον αντιδραστήρα

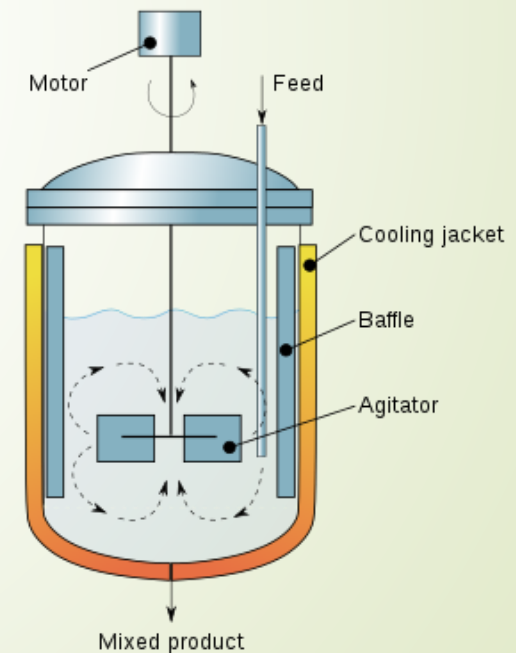
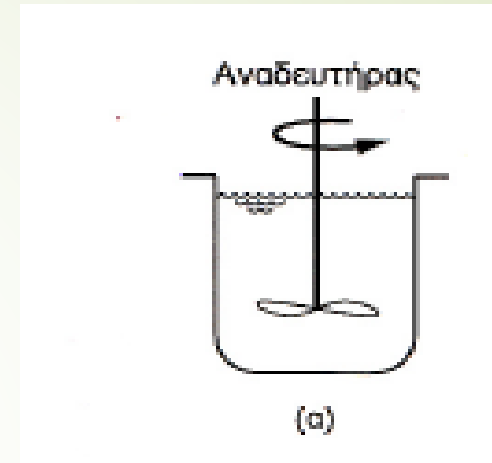


Θεωρία – Τύποι αντιδραστήρων

α) Αντιδραστήρες διαλείποντος έργου

Χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για αντιδράσεις που διεξάγονται στην υγρή φάση και περιλαμβάνουν συστήματα εισαγωγής και εξαγωγής αντιδρώντων και προϊόντων, τάρακτρο για την ανάδευση του μίγματος της αντίδρασης και θερμαντικό ή ψυκτικό μανδύα. Στον πρότυπο αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, γίνεται η παραδοχή ότι η ανάδευση είναι τόσο αποτελεσματική ώστε η ανάμιξη του αντιδρώντος μίγματος να είναι πλήρης (αντιδραστήρας πλήρους ανάμιξης διαλείποντος έργου).

Κατά συνέπεια τόσο η σύσταση όσο και η θερμοκρασία του μίγματος, και επομένως ο ρυθμός της αντίδρασης, είναι ομοιόμορφοι σε όλον τον όγκο του αντιδραστήρα σε μία δεδομένη στιγμή.



Θεωρία – Τύποι αντιδραστήρων

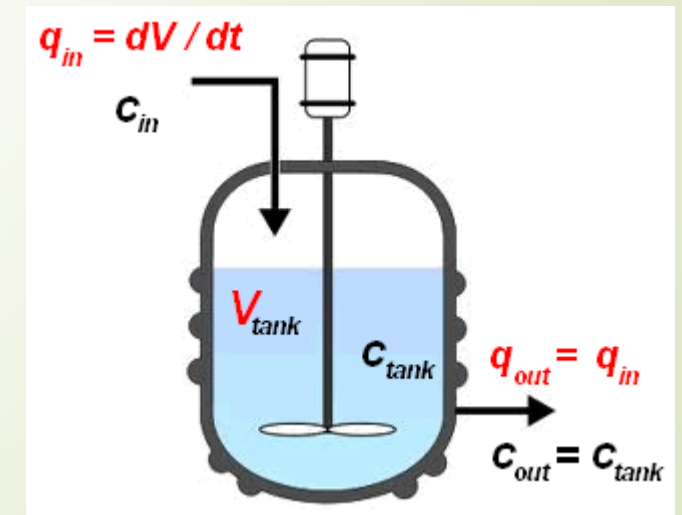
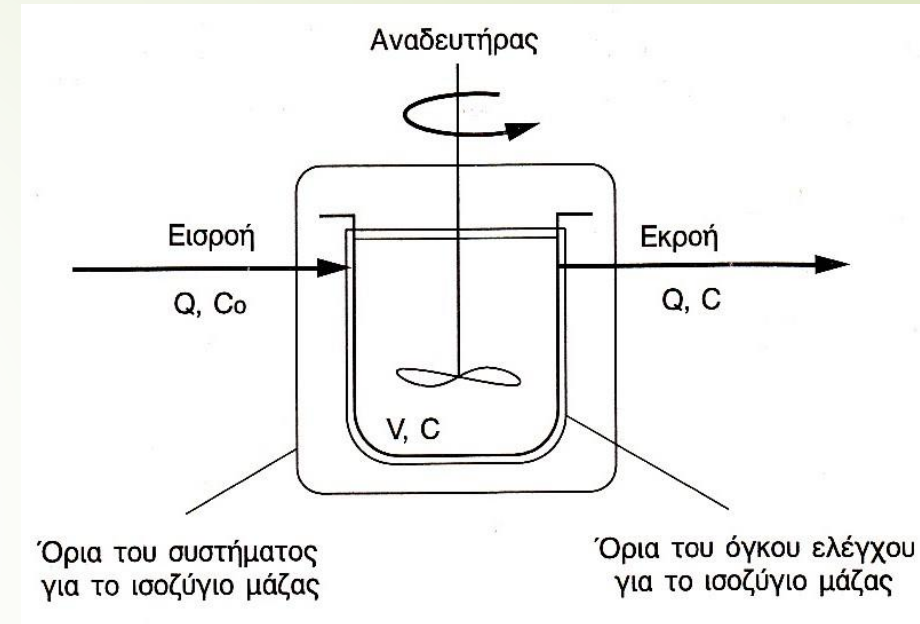
β) Αντιδραστήρες συνεχούς έργου με ανάδευση

Υπάρχει συνεχής εισροή των αντιδρώντων στο δοχείο του αντιδραστήρα και συνεχής εκροή των προϊόντων από αυτό.

Λειτουργούν συνήθως σε μόνιμη κατάσταση και περιλαμβάνουν τάρακτρο, για την ανάδευση του συνήθως υγρού μίγματος της αντίδρασης, καθώς και θερμαντικό ή ψυκτικό μανδύα.

Στον πρότυπο αντιδραστήρα συνεχούς έργου γίνεται η παραδοχή της πλήρους ανάμιξης, ώστε η σύσταση και η θερμοκρασία του μίγματος της αντίδρασης να είναι ομοιόμορφες σε όλο τον όγκο του αντιδραστήρα και ίδιες με τη σύσταση και τη θερμοκρασία εξόδου (αντιδραστήρας συνεχούς έργου πλήρους ανάμιξης).

Επομένως, οι ιδιότητες του μίγματος και ο ρυθμός της αντίδρασης είναι σταθεροί σε όλον τον όγκο του αντιδραστήρα σε κάθε χρονική στιγμή



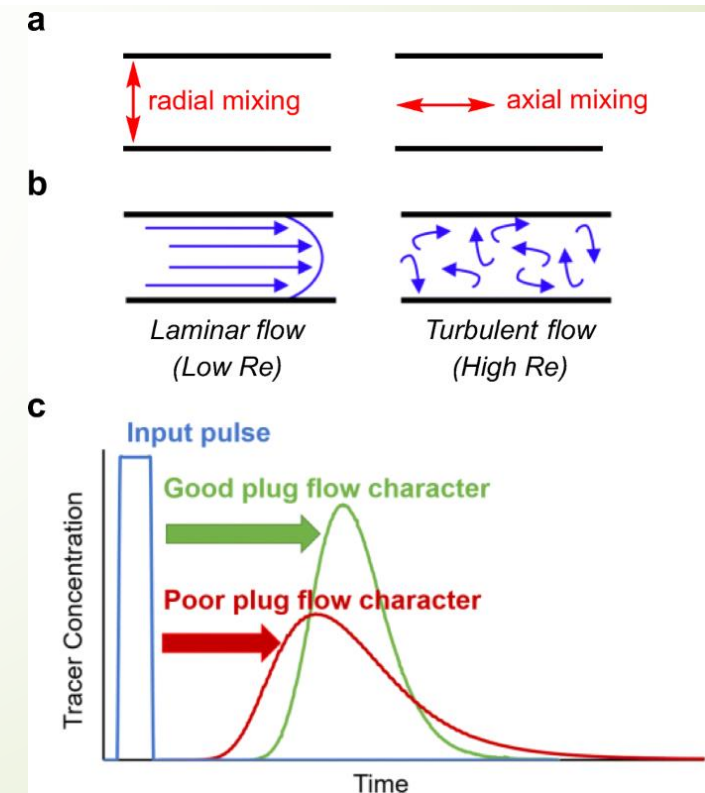
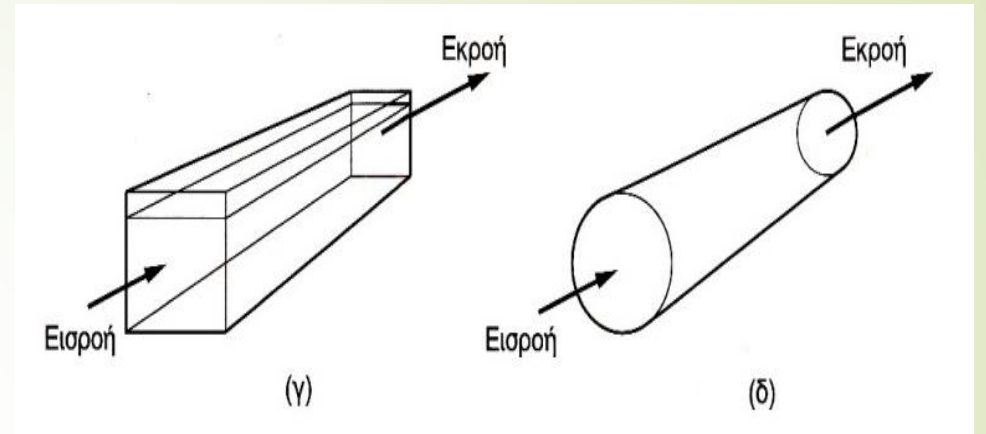
Θεωρία – Τύποι αντιδραστήρων

γ) Αυλωτός αντιδραστήρας (tubular reactor)

Οι αυλωτοί αντιδραστήρες είναι συνεχούς λειτουργίας και έχουν τη μορφή σωλήνων (αυλών), δηλαδή δοχείων με διάμετρο μικρή σε σχέση με το μήκος τους. Οι αυλωτοί αντιδραστήρες λειτουργούν συνήθως σε μόνιμη κατάσταση και χρησιμοποιούνται για αντιδράσεις στην υγρή όσο και στην αέρια φάση.

Στον πρότυπο αυλωτό αντιδραστήρα, γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Στη διεύθυνση της ροής δεν γίνεται διάχυση μάζας ή αγωγή θερμότητας (μηδενική ανάμιξη κατά την αξονική διεύθυνση)

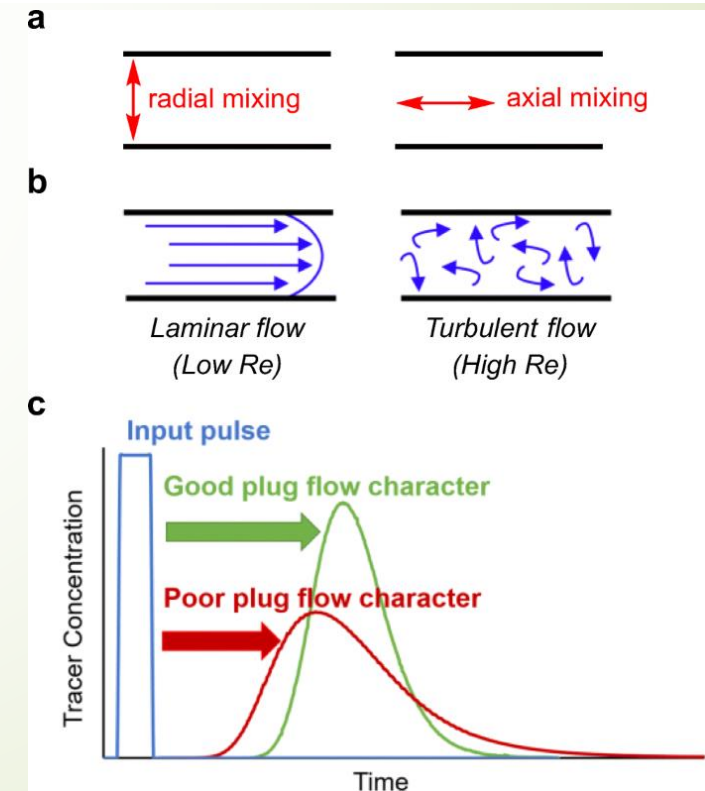
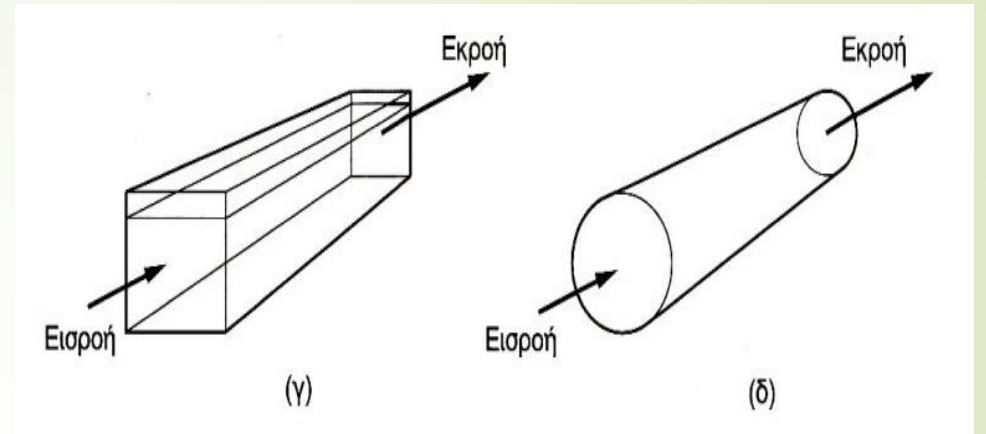


Θεωρία – Τύποι αντιδραστήρων

γ) Αυλωτός αντιδραστήρας (tubular reactor)

- Σε κάθε επίπεδο κάθετο προς τον άξονα του αυλού, η σύσταση και θερμοκρασία του μίγματος είναι ομοιόμορφες (πλήρη ανάμιξη κατά την ακτινική διεύθυνση)

Στις ιδεατές αυτές συνθήκες του αντιδραστήρα εμβολικής ροής η θερμοκρασία και η σύσταση και επομένως ο ρυθμός της αντίδρασης μεταβάλλονται μόνο κατά το μήκος του αντιδραστήρα.



Θεωρία – Τύποι αντιδραστήρων

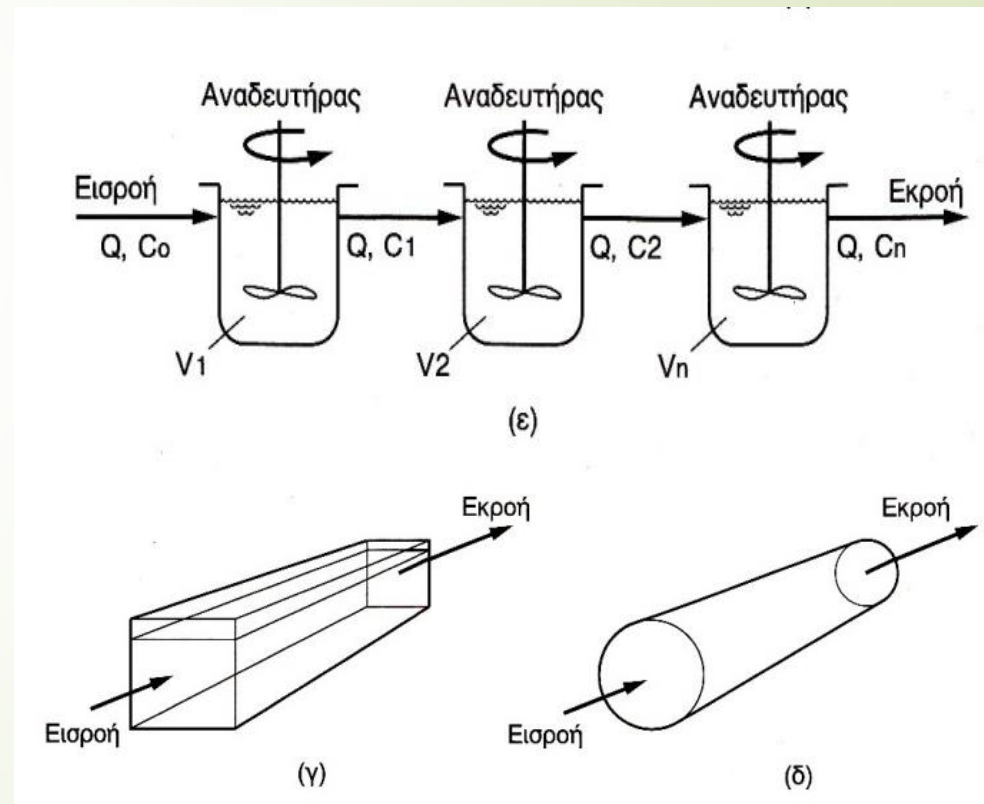
Τα πρότυπα της πλήρους ανάμιξης και της εμβολικής ροής αντιπροσωπεύουν τις δύο ακραίες (ιδανικές) καταστάσεις λειτουργίας ενός αντιδραστήρα.

Ενδιάμεσες καταστάσεις λειτουργίας μπορεί να επιτευχθούν με δύο διατάξεις:

- ➔ Συστοιχία αντιδραστήρων CSTR σε σειρά
- ➔ Αυλωτός αντιδραστήρας αναρροής

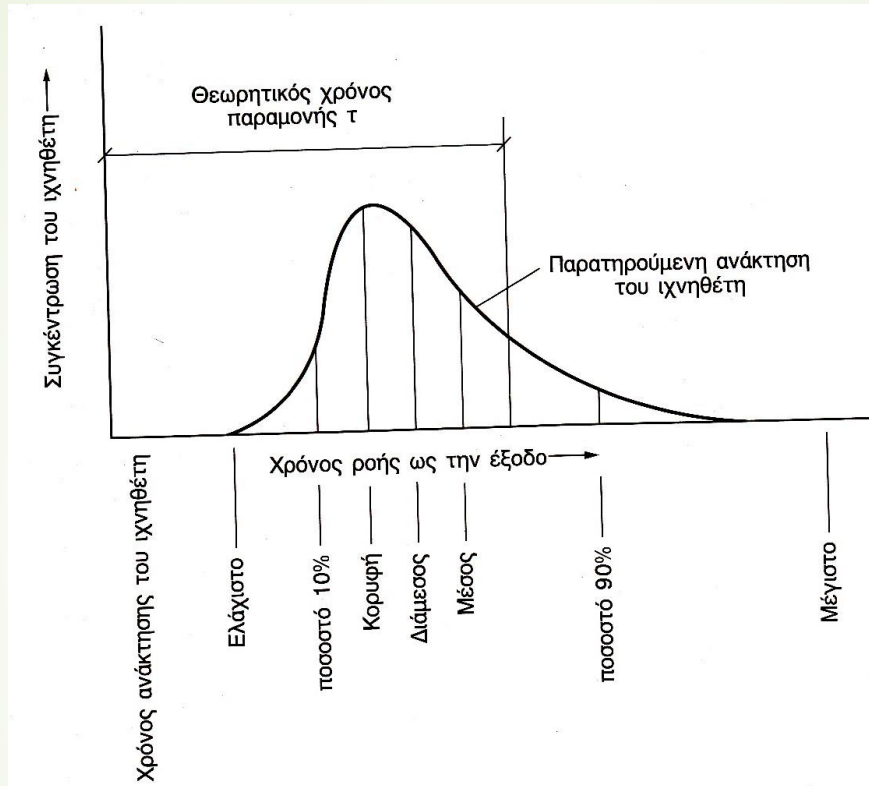
Όταν ο αριθμός των αντιδραστήρων CSTR είναι μεγάλος (θεωρητικά άπειρος) η συστοιχία προσεγγίζει τη λειτουργία του αντιδραστήρα εμβολικής ροής.

Ανάλογα, όταν ο λόγος αναρροής είναι μεγάλος (θεωρητικά προσεγγίζει τη λειτουργία του αντιδραστήρα CSTR)

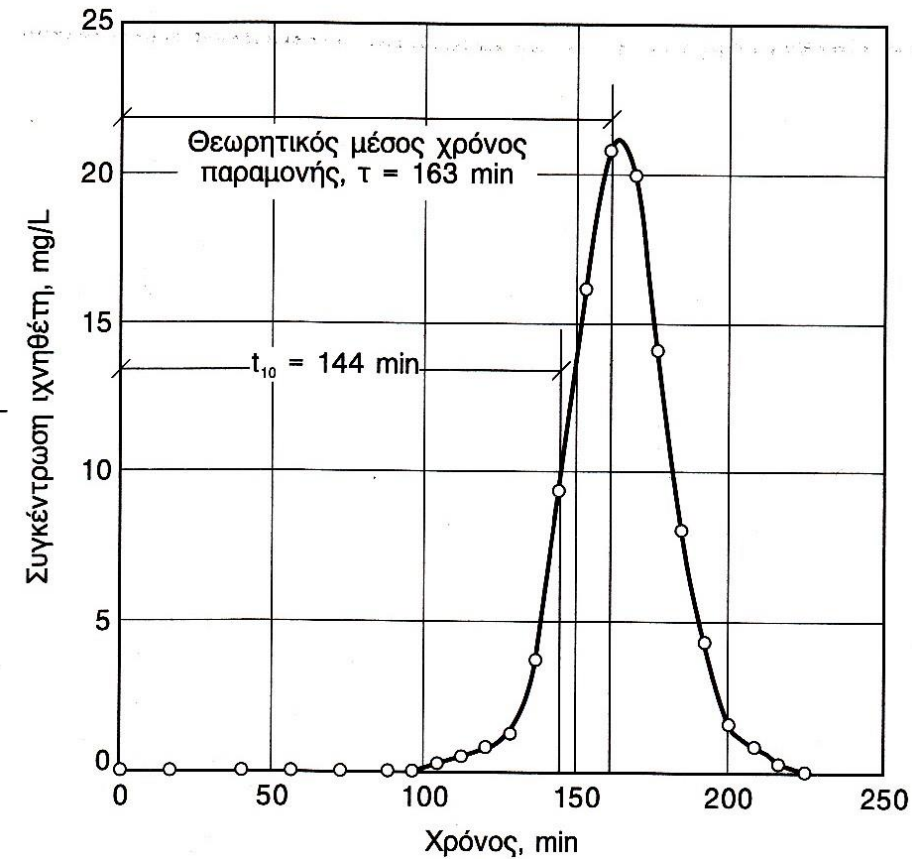


Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

Η περιγραφή των αποκλίσεων από την ιδανική ροή (πλήρη ανάμιξη ή εμβολική ροή), μπορεί να γίνει με την **εύρεση της κατανομής του χρόνου παραμονής** (σε σχέση με το μέσο χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα τ , δηλαδή το λόγο του όγκου του αντιδραστήρα ως προς την ογκομετρική παροχή του ρευστού).



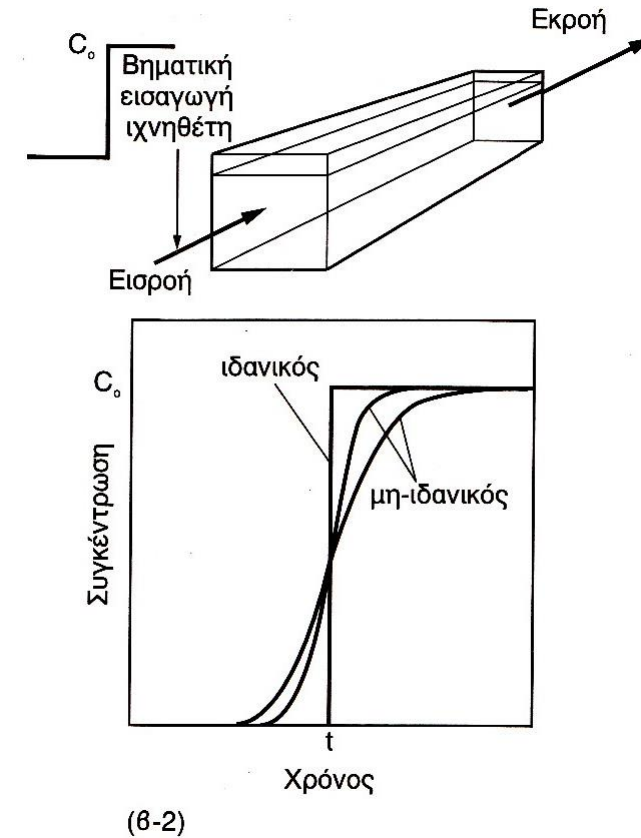
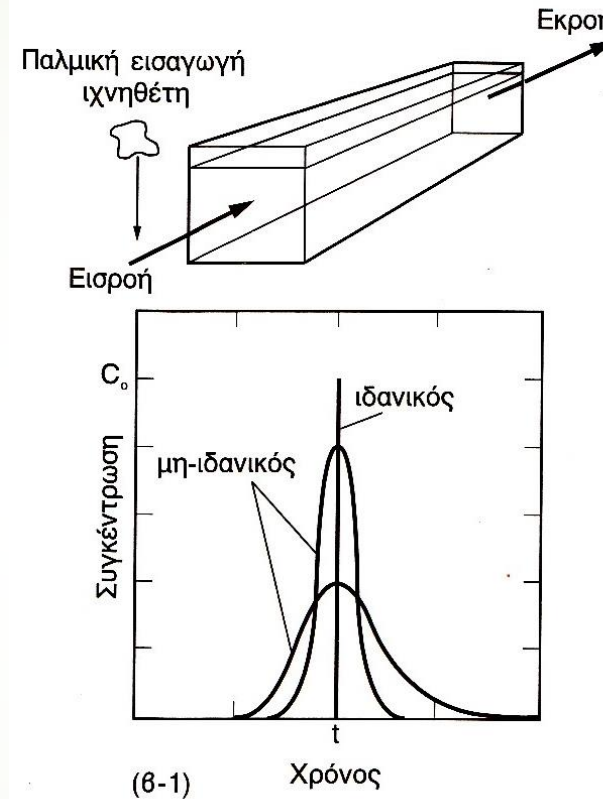
Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των καμπυλών απόκρισης ιχνηθέτη συγκέντρωσης – χρόνου



Καμπύλη απόκρισης της συγκέντρωσης του ιχνηθέτη ως προς το χρόνο σε μία επιμήκη στενή δεξαμενή επαφής χλωρίου

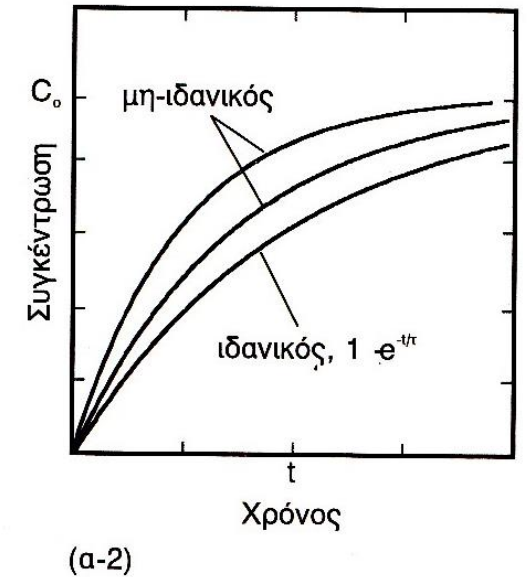
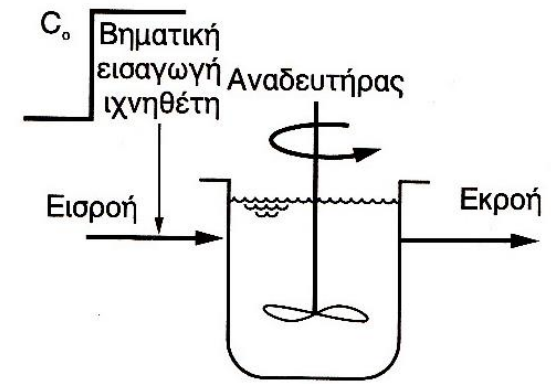
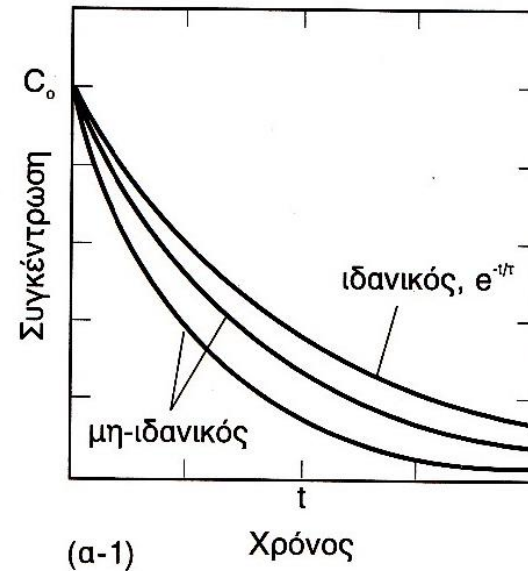
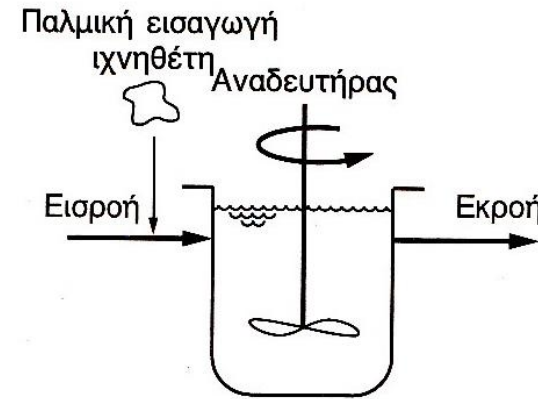
Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

- Ο χρόνος παραμονής των ατόμων μιας ένωσης σε έναν αντιδραστήρα είναι το χρονικό διάστημα το οποίο τα άτομα αυτά παραμένουν μέσα στον αντιδραστήρα.
- Σε έναν πρότυπο αυλωτό αντιδραστήρα (εμβολικής ροής), όλα τα άτομα που εξέρχονται από τον αντιδραστήρα έχουν παραμείνει μέσα σε αυτόν για το ίδιο ακριβώς χρονικό διάστημα.
- Το ίδιο ισχύει και για τον πρότυπο αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (πλήρους ανάμιξης).



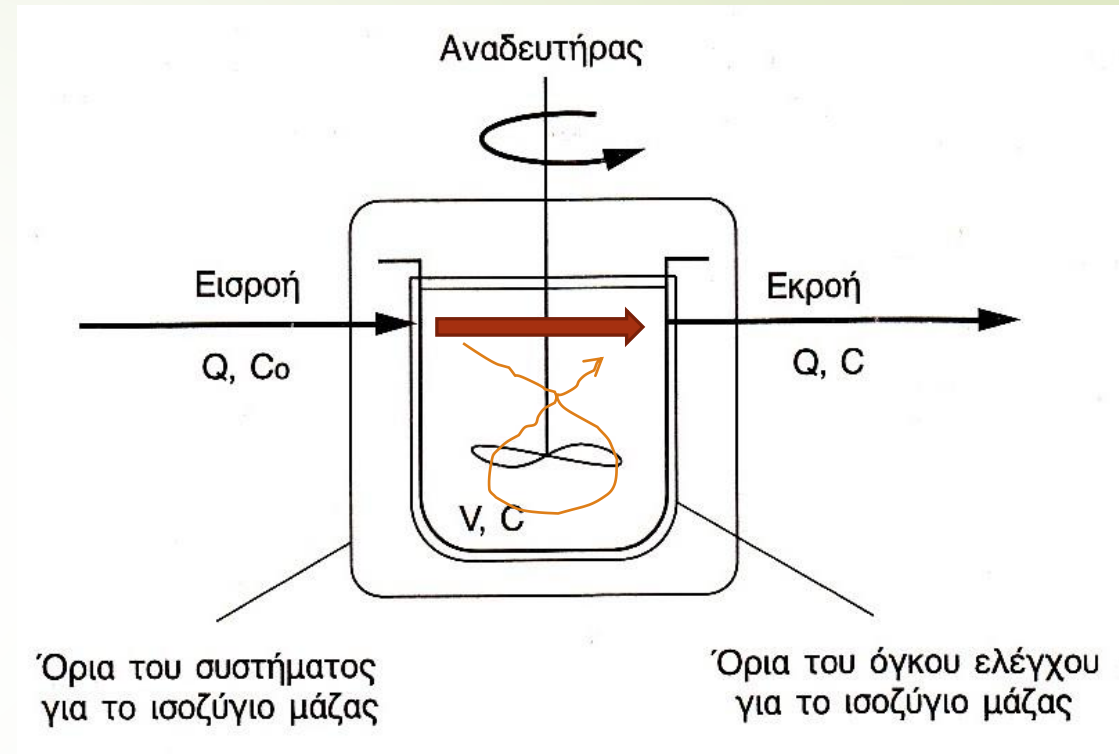
Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

- ▶ Αντίθετα, σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς έργου με ανάδευση, η τροφοδοσία σε κάθε χρονική στιγμή, αναμιγνύεται με το ρευστό που υπάρχει ήδη στον αντιδραστήρα.



Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

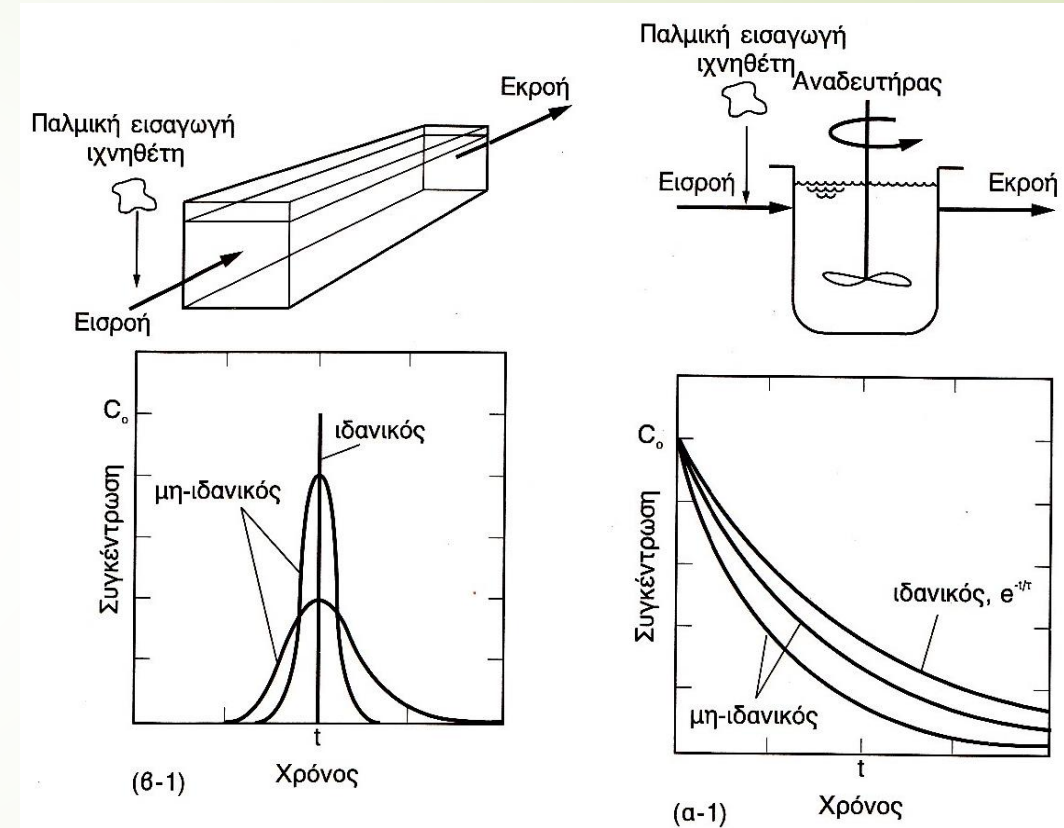
- ▶ Έτσι, κάποια από τα άτομα που εισέρχονται στον αντιδραστήρα, θα εξέλθουν σχεδόν αμέσως από αυτόν (καθώς το ρευστό απομακρύνεται συνεχώς από τον αντιδραστήρα), ενώ άλλα άτομα θα παραμείνουν για σχεδόν απεριόριστο χρονικό διάστημα στον αντιδραστήρα (καθώς το ρευστό ποτέ δεν απομακρύνεται με μιας από τον αντιδραστήρα).
- ▶ Φυσικά, πολλά από τα άτομα θα εξέρθουν από τον αντιδραστήρα αφού παραμείνουν σε αυτόν για χρονικό διάστημα περίπου ίσο με το μέσο χρόνο παραμονής.



Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

Για την κατανόηση των ανωτέρω, ας θεωρήσουμε ότι, σε χρόνο $t=0$, εισάγεται ακαριαία μια μικρή ποσότητα χρωστικής ουσίας, στο ρεύμα εισόδου ενός αυλωτού αντιδραστήρα εμβολικής ροής.

- ▶ Τα μόρια της χρωστικής, θα διατρέξουν τον αντιδραστήρα (ως ένας «χρωματισμένος» στοιχειώδης όγκος ΔV) και θα εξέλθουν από αυτόν σε χρόνο, t , ίσο με το μέσο χρόνο παραμονής, τ .
- ▶ Αντίθετα, σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς έργου πλήρους αναμίξεως, τα μόρια της χρωστικής θα κατανεμηθούν ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα του ρευστού στον αντιδραστήρα και θα εξέλθουν από αυτόν σε χρόνους που κυμαίνονται από 0 ως ∞ .



Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

- Η μαθηματική περιγραφή των ανωτέρω γίνεται με τη συνάρτηση κατανομής του χρόνου παραμονής $E(t)$, και την αθροιστική συνάρτηση κατανομής $F(t)$, που ορίζονται ως εξής:

$$(1) E(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{N}{N_0} \right)$$

$$(2) F(t) = \int_0^t E(t) dt$$

- Από τον ορισμό των συναρτήσεων προκύπτει ότι:
 - $E(t)dt$ είναι το ποσοστό των μορίων dN/N_0 που θα έρθουν από τον αντιδραστήρα μετά από χρόνο παραμονής μεταξύ t και $t+dt$, όπου N_0 η ποσότητα του ιχνηθέτη.
 - $F(t)$ είναι το ποσοστό των μορίων $(N_0-N)/N_0$ με χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα $\leq t$

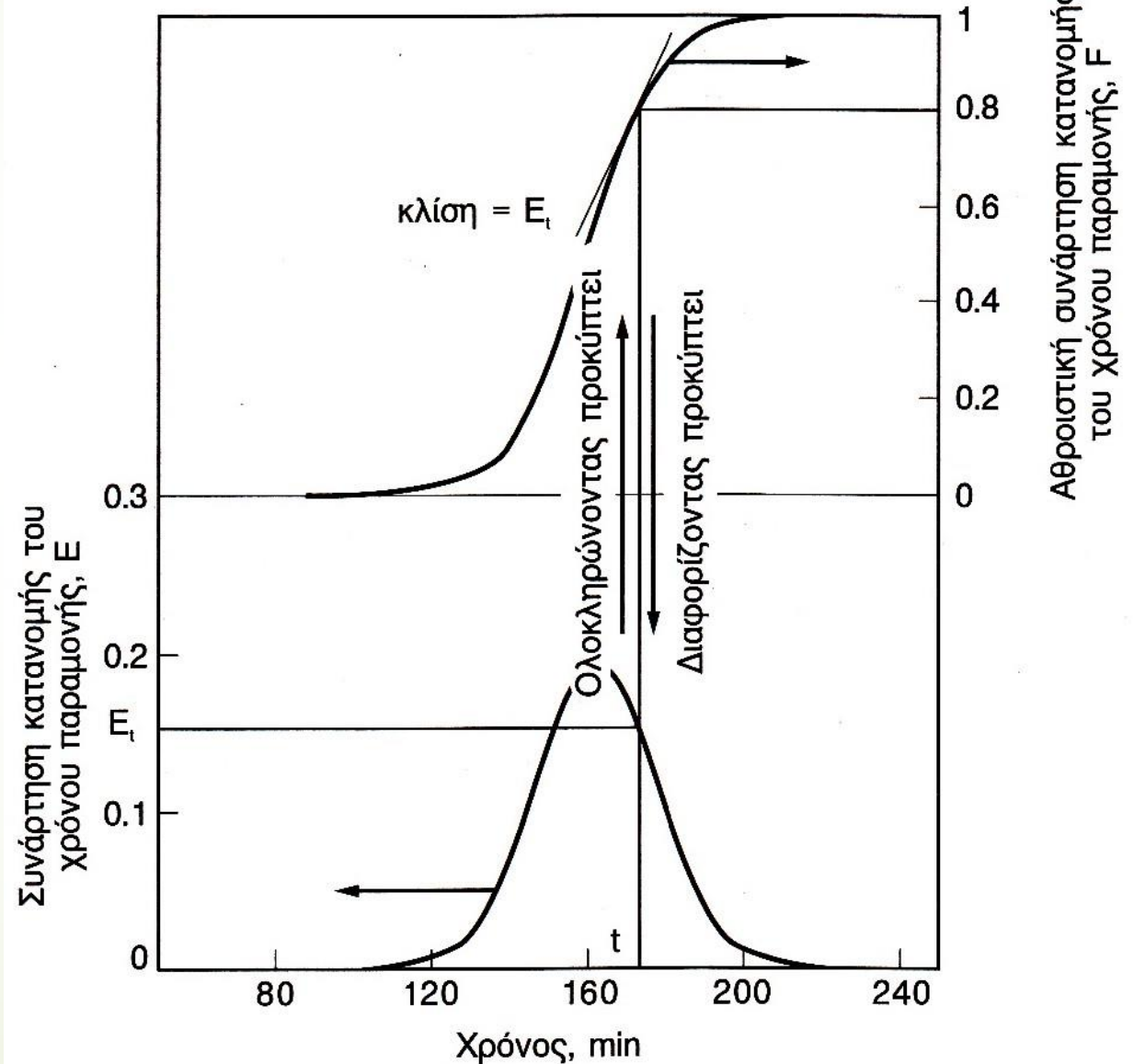
Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

Συνάρτηση κατανομής του χρόνου

$$\text{παραμονής } E(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{N}{N_0} \right),$$

Αθροιστική συνάρτηση κατανομής

$$F(t) = \int_0^1 E(t) dt$$



Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

- Για τους πρότυπους αντιδραστήρες ιδανικής ροής, οι συναρτήσεις κατανομής μπορεί να προσδιοριστούν θεωρητικά. Έστω ότι σε χρόνο $t=0$, εισάγεται ακαριαία στην είσοδο ενός αντιδραστήρα συνεχούς έργου πλήρους αναμίξεως (CSTR), ποσότητα ιχνηθέτη N_0 (moles). Τη χρονική στιγμή t , μέσα στον αντιδραστήρα θα βρίσκεται ποσότητα N και θα έχει εξέλθει από αυτόν ποσότητα N_0-N . Το ισοζύγιο μάζας για τον αδρανή ιχνηθέτη για $t>0$ γράφεται ως εξής:

$$(3) 0 - Q(N/V) = dN/dt$$

- όπου Q η ογκομετρική παροχή και V ο όγκος του ρευστού στον αντιδραστήρα. Αντικαθιστώντας $\tau = V/Q$ (ο μέσος χρόνος παραμονής στον αντιδραστήρα) προκύπτει:

$$(4) N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$$

Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

- Το ποσοστό των μορίων $F(t) = (N_0 - N) / N_0$ με χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα μικρότερο από t , ισούται με

$$(5) F(t) = 1 - \exp(-t/\tau)$$

- Η συνάρτηση της κατανομής $E(t) = dF(t)/dt$ δίνεται από τη σχέση

$$(6) E(t) = (1/\tau) \exp(-t/\tau)$$

- Με τον ίδιο τρόπο, μπορεί να υπολογιστούν οι συναρτήσεις κατανομής για μια συστοιχία αντιδραστήρων CSTR ίδιου μεγέθους (και ίδιου χρόνου παραμονής τ)

$$(7) F(t) = 1 - e^{-t/\tau} \left\{ 1 + \frac{1}{t} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} \right\}$$

$$(8) E(t) = \frac{e^{-t/\tau}}{\tau(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1}$$

Θεωρία – Κατανομή χρόνου παραμονής

- ▶ Για έναν αυλωτό αντιδραστήρα εμβολικής ροής, η αθροιστική συνάρτηση κατανομής $F(t)$, δίνεται από τη σχέση

$$(9) F(t)=0 \text{ για } t < \tau, \text{ και } F(t)=1, \text{ για } t > \tau$$

- ▶ Η συνάρτηση κατανομής $E(t)$ δίνεται από τη συνάρτηση Dirac, $E(t)=\delta(t-\tau)$, δηλαδή μια στενή «κορυφή» σε χρόνο τ , ίσο με το μέσο χρόνο παραμονής, όπου:

$$(10) E(t)=1 \text{ για } t=\tau, \text{ και, } E(t)=0 \text{ για } t \neq \tau$$

- ▶ Η παραπάνω ανάλυση δείχνει ότι η κατανομή του χρόνου παραμονής σε έναν αντιδραστήρα είναι αντιπροσωπευτική του μοντέλου ροής και χαρακτηριστική του βαθμού ανάμιξης στον αντιδραστήρα.

Θεωρία – Μέτρηση κατανομής χρόνου παραμονής

Η κατανομή του χρόνου παραμονής σε έναν αντιδραστήρα, μπορεί να προσδιοριστεί με πειράματα δυναμικής απόκρισης.

Στα πειράματα αυτά μεταβάλλεται με ένα ορισμένο τρόπο, η συγκέντρωση ενός αδρανούς ιχνηθέτη στην είσοδο του αντιδραστήρα, και καταγράφεται η απόκριση στο ρεύμα εξόδου.

Συνήθεις τρόποι μεταβολής είναι η παλμική, η βηματική και η ημιτονοειδής επιβολή.

Η συσχέτιση της πειραματικής καμπυλης (συγκέντρωση ως προς χρόνο) με την κατανομή, εξετάζεται παρακάτω για τις περιπτώσεις της παλμικής και βηματικής επιβολής.

Θεωρία – Μέτρηση κατανομής χρόνου παραμονής

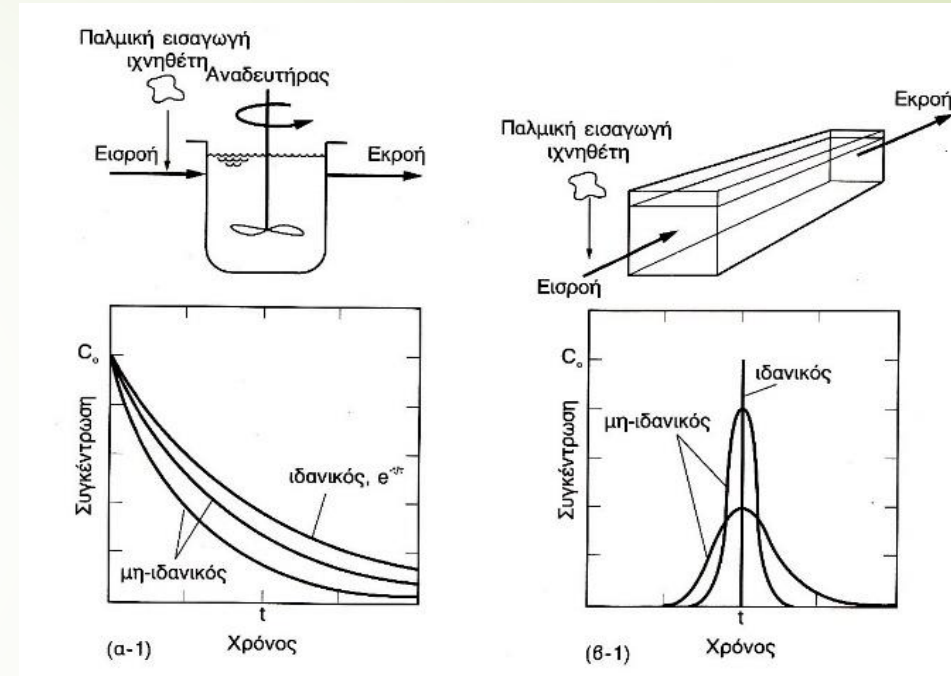
α) Παλμική επιβολή ιχνηθέτη

- Η συνάρτηση της κατανομής $E(t)$, μπορεί να βρεθεί πειραματικά με τη μέθοδο της παλμικής επιβολής ιχνηθέτη. Στην πράξη, η ποσότητα ιχνηθέτη N_0 εισάγεται με τη μορφή παλμού χρονικής διάρκειας Δt , ώστε

$$(11) N_0 = C_0 Q \Delta t$$

- Στην έξοδο του αντιδραστήρα καταγράφεται η συγκέντρωση του ιχνηθέτη σε συνάρτηση με το χρόνο (Σχήμα 1). Το σχήμα της καμπύλης εξαρτάται από τό βαθμό ανάμιξης στον αντιδραστήρα. Η συνάρτηση κατανομής $E(t)$, υπολογίζεται από:

$$(12) E(t) = \frac{C(t)}{\frac{N_0}{Q}}$$



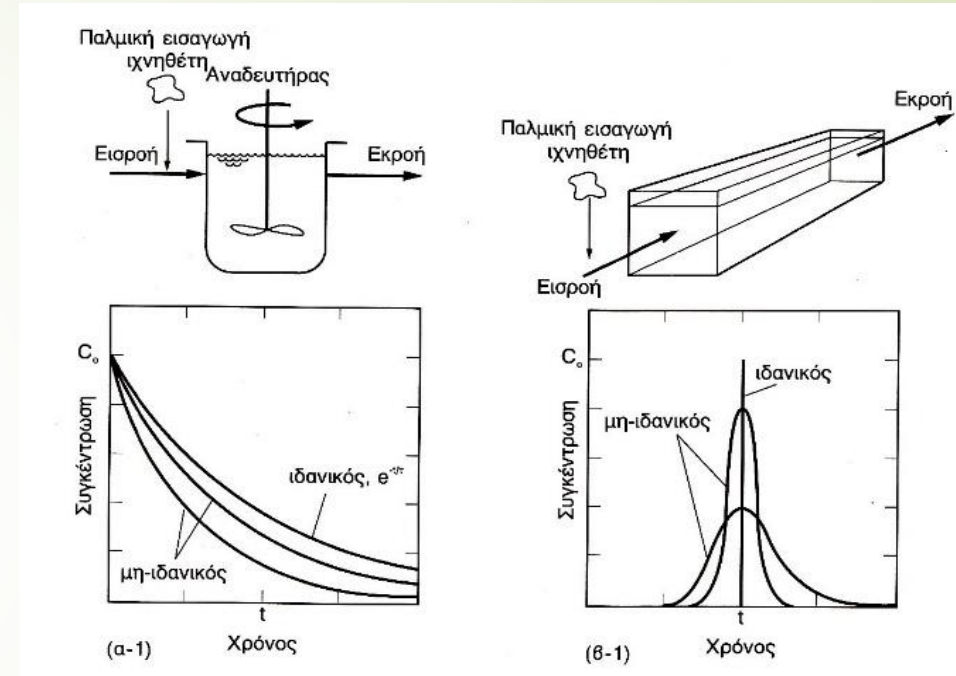
Σχήμα. Παλμική επιβολή ιχνηθέτη και απόκριση στην έξοδο του αντιδραστήρα (α) πλήρους ανάμιξης και (β) εμβολικής ροής

Θεωρία – Μέτρηση κατανομής χρόνου παραμονής

α) Παλμική επιβολή ιχνηθέτη

- Η ποσότητα του ιχνηθέτη μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (11) ή, με πιο μεγάλη ακρίβεια, από το εμβαδό της καμπύλης απόκρισης

$$(13) E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$



Σχήμα. Παλμική επιβολή ιχνηθέτη και απόκριση στην έξοδο του αντιδραστήρα (α) πλήρους ανάμιξης και (β) εμβολικής ροής

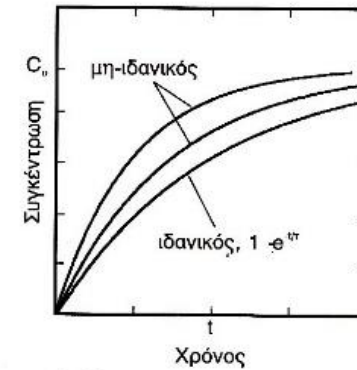
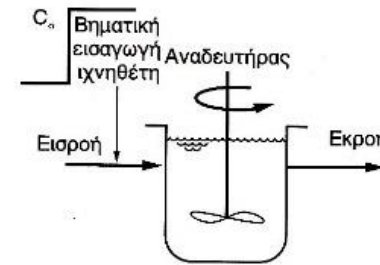
Θεωρία – Μέτρηση κατανομής χρόνου παραμονής

β) Βηματική επιβολή ιχνηθέτη

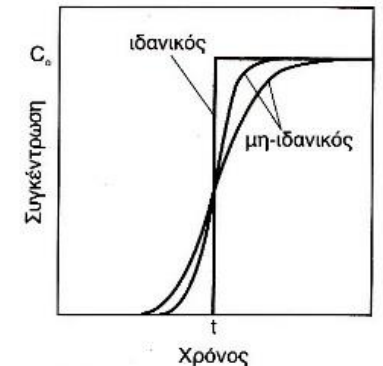
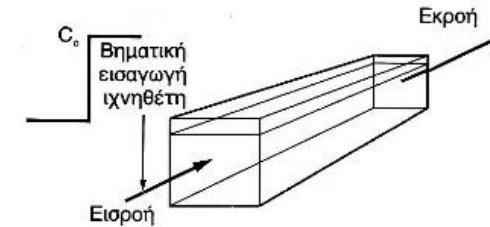
Η συνάρτηση της κατανομής μπορεί να προσδιοριστεί, συχνά με μεγαλύτερη ακρίβεια, με τη μέθοδο της βηματικής επιβολής ιχνηθέτη.

Σε χρόνο $t=0$, η συγκέντρωση του ιχνηθέτη μεταβάλλεται από 0 σε C_0 , ενώ η ογκομετρική παροχή Q , παραμένει σταθερή.

Στην έξοδο του αντιδραστήρα, μετράται συνεχώς η συγκέντρωση της χρωστικής ουσίας C , σε συνάρτηση με το χρόνο.



(α-2)



(β-2)

Σχήμα. Βηματική επιβολή ιχνηθέτη και απόκριση στην έξοδο του αντιδραστήρα (α) πλήρους ανάμιξης και (β) εμβολικής ροής

Θεωρία – Μέτρηση κατανομής χρόνου παραμονής

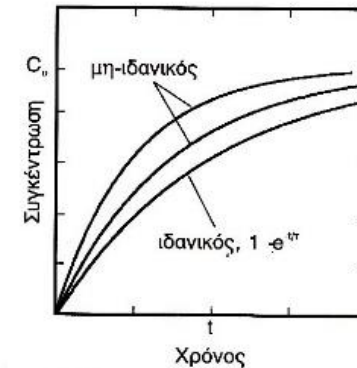
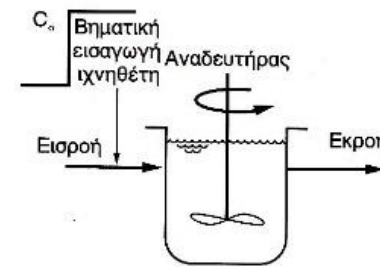
β) Βηματική επιβολή ιχνηθέτη

- Σε κάθε χρονική στιγμή t , η εκροή του ιχνηθέτη παριστά τα μόρια του ιχνηθέτη που έχουν παραμείνει στον αντιδραστήρα για χρόνο μικρότερο από t .

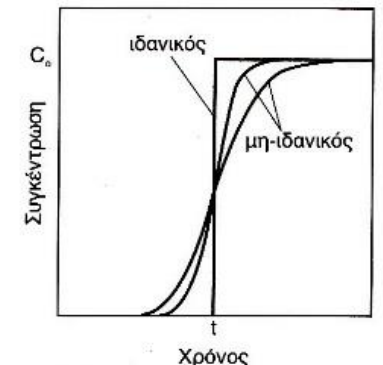
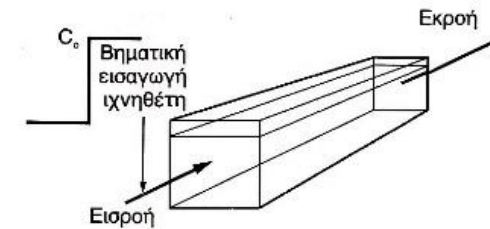
$$(14) CQ = C_0 Q F(t)$$

- Επομένως, η πειραματική καμπύλη του λόγου των συγκεντρώσεων C/C_0 , δίνει απευθείας την αθροιστική συνάρτηση κατανομής,

$$(15) F(t) = C/C_0$$



(α-2)



(β-2)

Σχήμα. Βηματική επιβολή ιχνηθέτη και απόκριση στην έξοδο του αντιδραστήρα (α) πλήρους ανάμιξης και (β) εμβολικής ροής

Περιγραφή πειράματος - Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- συστοιχία τριών δοχείων αναδέυσεως σε σειρά, συμπληρωμένα με νερό όγκου 0,8 L, το καθένα.
- σωλήνα όγκου 2,4 L, σε παράλληλη σύνδεση με τη συστοιχία των δοχείων
- δοχείο αποθήκευσης νερού
- δοχείο αποθήκευσης με διάλυμα NaOH 0,1M
- αντλία για την τροφοδοσία του νερού ή του διαλύματος NaOH από τα δοχεία αποθήκευσης προς τα δοχεία ανάδευσης ή το σωλήνα
- σύστημα ροής που περιλαμβάνει βάνες απομόνωσης ώστε να επιτυγχάνεται ανεξάρτητη λειτουργία α) του ενός δοχείου αναδέυσεως β) της συστοιχίας των δοχείων και γ) του σωλήνα
- αγωγιμόμετρο
- χρονόμετρο

Περιγραφή πειράματος – Εκτέλεση πειράματος

- Σε χρόνο $t < 0$, η συστοιχία των δοχείων αναδεύσεων λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση με σταθερή παροχή νερού, μέσω της αντλίας από το δοχείο αποθήκευσης, ίση με 30 L/h και σταθερή αγωγιμότητα στην έξοδο.
- Τη χρονική στιγμή $t = 0$, διακόπτεται η παροχή νερού, και η συστοιχία τροφοδοτείται με διάλυμα NaOH 0,1M από το δοχείο αποθήκευσης, με ρυθμό επίσης 30 L/h. Η αγωγιμότητα στο ρεύμα εξόδου καταγράφεται, ανά 30s με τη βοήθεια του χρονομέτρου. Το πείραμα ολοκληρώνεται όταν η αγωγιμότητα σταθεροποιηθεί. Η τελική τιμή πρέπει να είναι ίση με την αγωγιμότητα του NaOH στο δοχείο αποθήκευσης.
- Το πείραμα επαναλαμβάνεται κατά τον ίδιο τρόπο, για τις περιπτώσεις του σωλήνα και του ενός δοχείου ανάδευσης.

Περιγραφή πειράματος – Συζήτηση των αποτελεσμάτων

Να προσδιοριστούν οι πειραματικές και θεωρητικές αθροιστικές κατανομές του χρόνου παραμονής $F(t)$, για καθένα από τους τρεις τύπους αντιδραστήρων:

- Με βάση τα πειραματικά δεδομένα αγωγιμότητας ως προς χρόνο, να κατασκευαστεί το διάγραμμα του λόγου των συγκεντρώσεων του ιχνηθέτη C/C_0 ως προς το χρόνο t/τ για κάθε τύπο αντιδραστήρα. Στο ίδιο διάγραμμα, να αποτυπωθεί και η θεωρητική καμπύλη $F(t)$, με βάση τις εξισώσεις (5), (7) ή (9).
- Να συγκριθούν και να συζητηθούν τα αποτελέσματα

Να υπολογιστούν οι πειραματικές και θεωρητικές κατανομές του χρόνου παραμονής $E(t)$, για καθένα από τους τρεις τύπους αντιδραστήρων:

- Από την πειραματική καμπύλη $F(t)$, να κατασκευαστεί η καμπύλη της κατανομής $E(t)$. Στο ίδιο διάγραμμα, να αποτυπωθεί και η θεωρητική καμπύλη $E(t)$, με βάση τις εξισώσεις (6), (8) ή (10).
- Να σχολιαστούν τα αποτελέσματα και η μέθοδος προσδιορισμού της $E(t)$.

Να κατασκευαστούν διαγράμματα που παρουσιάζουν συνολικά τις καμπύλες κατανομής $F(t)$ και $E(t)$ και για τους τρεις τύπους αντιδραστήρων, και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα.