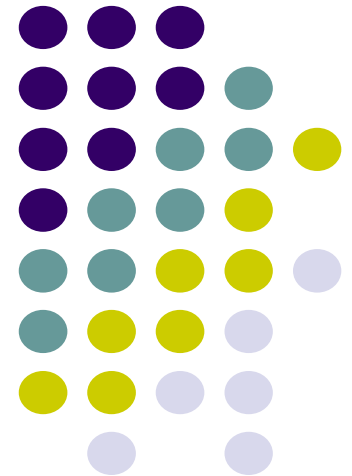


Δυναμική & Ρύθμιση Διεργασιών

Διάλεξη 3:
Εισαγωγή στην Δυναμική Ανάλυση

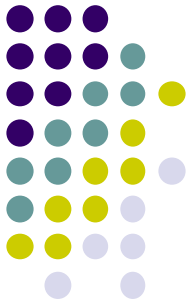


Εισαγωγή στη δυναμική



- Τα μαθήματα Χημικής Μηχανικής γενικά διδάσκονται βασιζόμενα στην υπόθεση **σταθερής κατάστασης**.
- Αντίθετα, **δυναμική είναι η μελέτη της χρονικά μεταβαλλόμενης (δυναμικής) συμπεριφοράς των διεργασιών**.
- Στην χημική βιομηχανία πολλές διεργασίες είναι συνεχούς έργου (**σταθερές συνθήκες**) αλλά και διαλείποντος έργου (**μεταβαλλόμενες συνθήκες**).
- Οι χημικές διεργασίες αλλάζουν δυναμικά συνεχώς.
 - Αλλαγή σταθερής κατάστασης υποδεικνύει πού καταλήγει η διεργασία και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της υποδεικνύουν τη διαδρομή που θα ακολουθήσει.
 - Οι διαταραχές (ακόμη και ο θόρυβος) προκαλούν δυναμική απόκριση της διεργασίας (διεγείρουν την διεργασία).

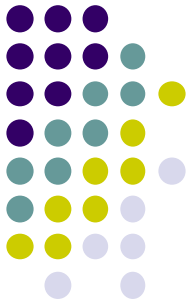
Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών



1. Καθορισμός της διεργασίας που εξετάζεται
2. Ανάλυση Διεργασίας
3. Σύνθεση δομής συστήματος αυτομάτου ελέγχου
4. Έκδοση μελέτης και εγχειριδίου λειτουργίας

} A. δυναμική
} B. ρύθμιση

Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Α



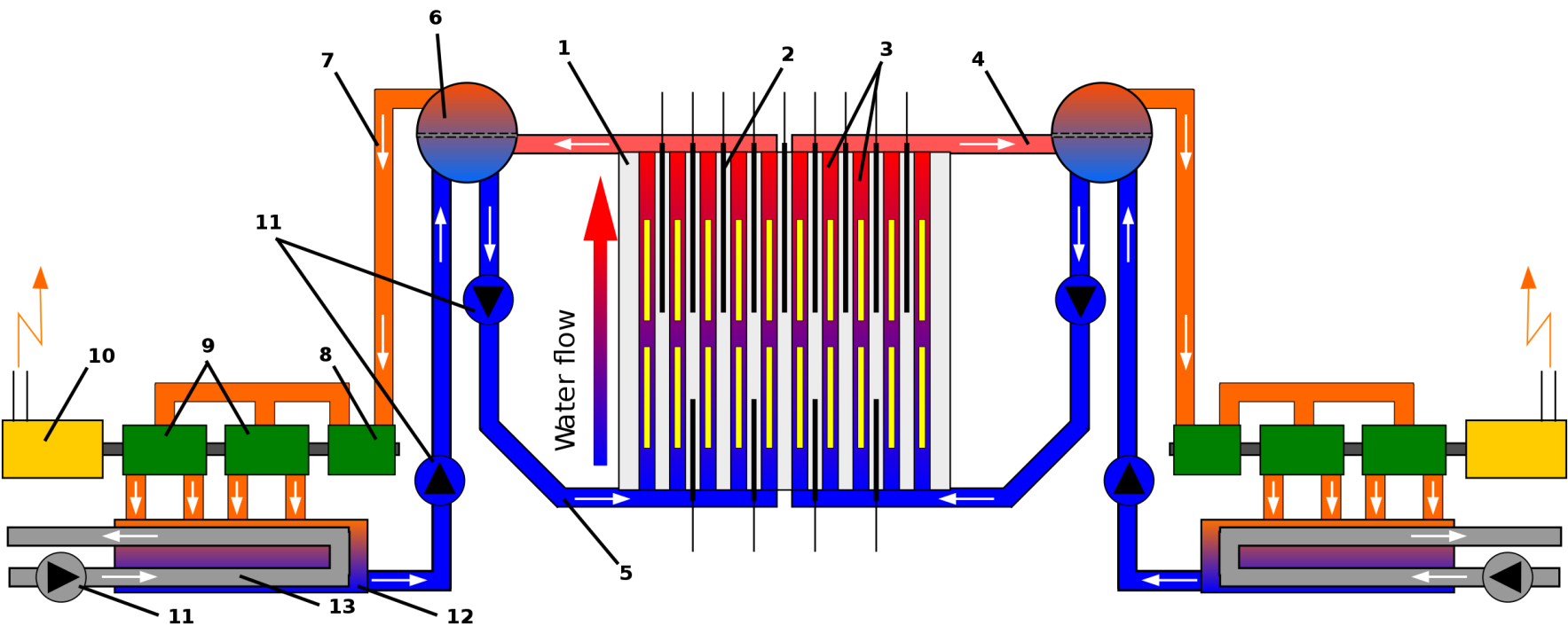
1. Καθορισμός της διεργασίας που εξετάζεται

- a. Διατύπωση υποθέσεων
- b. Ταξινόμηση μεταβλητών (χειριζόμενες, διαταραχές, εσωτερικές, ελεγχόμενες, μετρούμενες)
- c. **Διατύπωση μοντέλου διεργασίας**
- d. Προσδιορισμός του επιθυμητού σημείου λειτουργίας
- e. Διατύπωση περιγραφής χώρου κατάστασης
- f. Διατύπωση περιγραφής συναρτήσεων μεταφοράς
- g. Αναγνώριση διεργασιών (αν χρειάζεται)

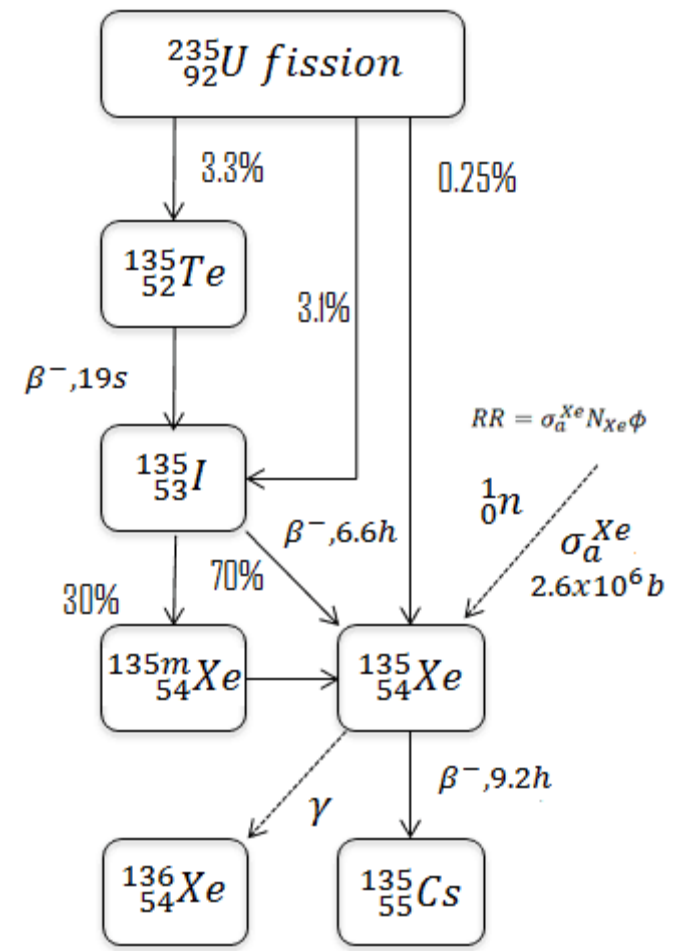
2. Ανάλυση Διεργασίας

- a. Ανάλυση παρατηρησιμότητας
- b. Ανάλυση ελεγχιμότητας / ρυθμισιμότητας
- c. Ανάλυση ευστάθειας
- d. Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς
 - a. Απόκριση σε παλμική αλλαγή
 - b. Απόκριση σε ημιτονική αλλαγή

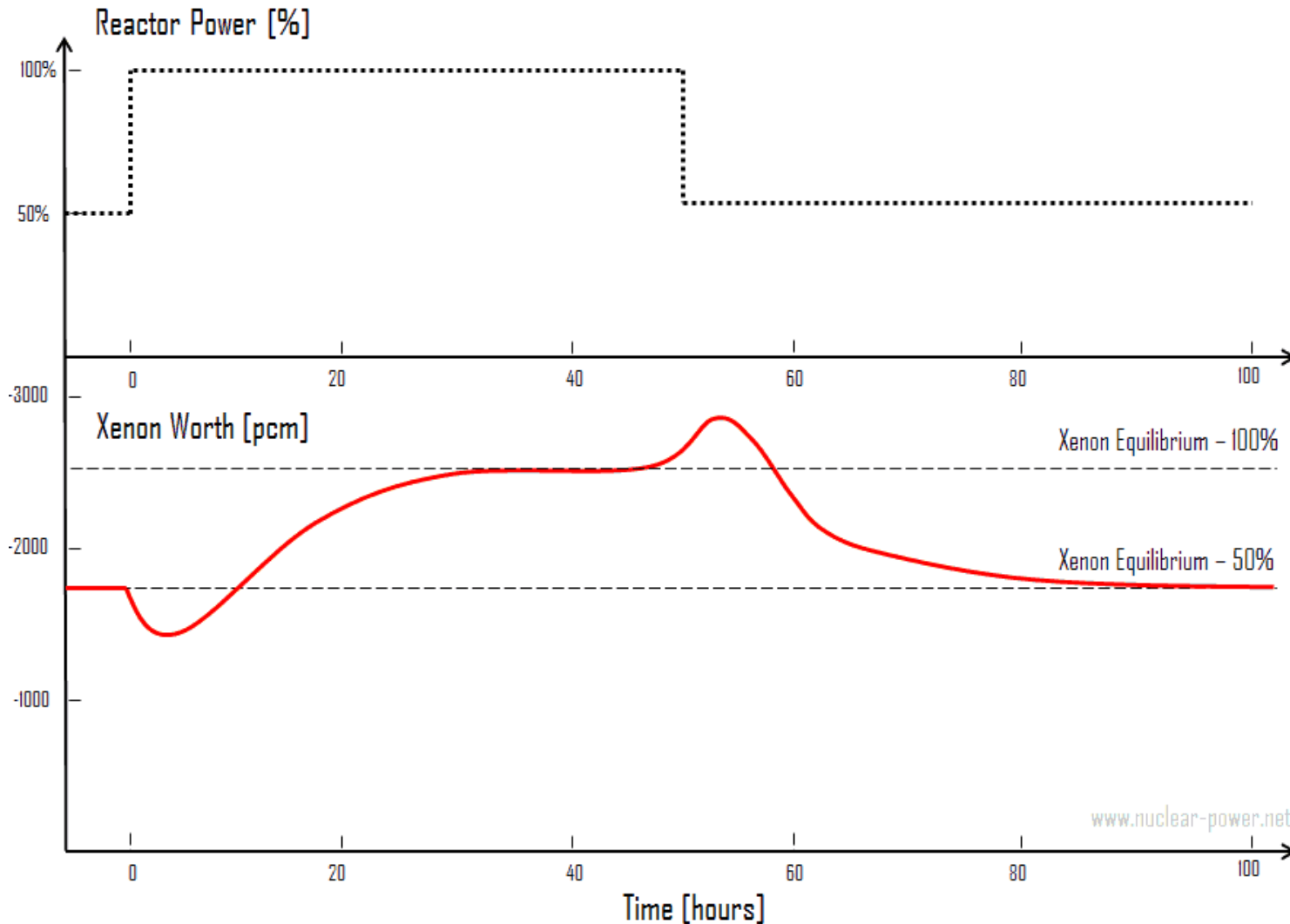
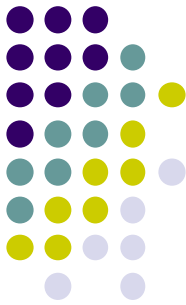
Παράδειγμα: Πως θα αποκριθεί ο RBMK;



- Legend :**
- 1. Graphite moderated reactor core
 - 2. Control rods
 - 3. Pressure channels with fuel rods
 - 4. Water/steam mixture
 - 5. Water
 - 6. Water/steam separator
 - 7. Steam inlet
 - 8. High-pressure steam turbine
 - 9. Low-pressure steam turbine
 - 10. Generator
 - 11. Pump
 - 12. Steam condenser
 - 13. Cooling water (from river, sea, etc.)



Απόκριση σε αλλαγή σημείου λειτουργίας



Τράβηγμα ράβδου ελέγχου οδηγεί σε

- **Αρχική μείωση** της συγκέντρωσης του Xe που καίγεται από τα έξτρα νετρόνια
- **Τελική αύξηση** συγκέντρωσης Xe στην νέα ισορροπία λόγω των αντιδράσεων U

Τι σημαίνει αυτό

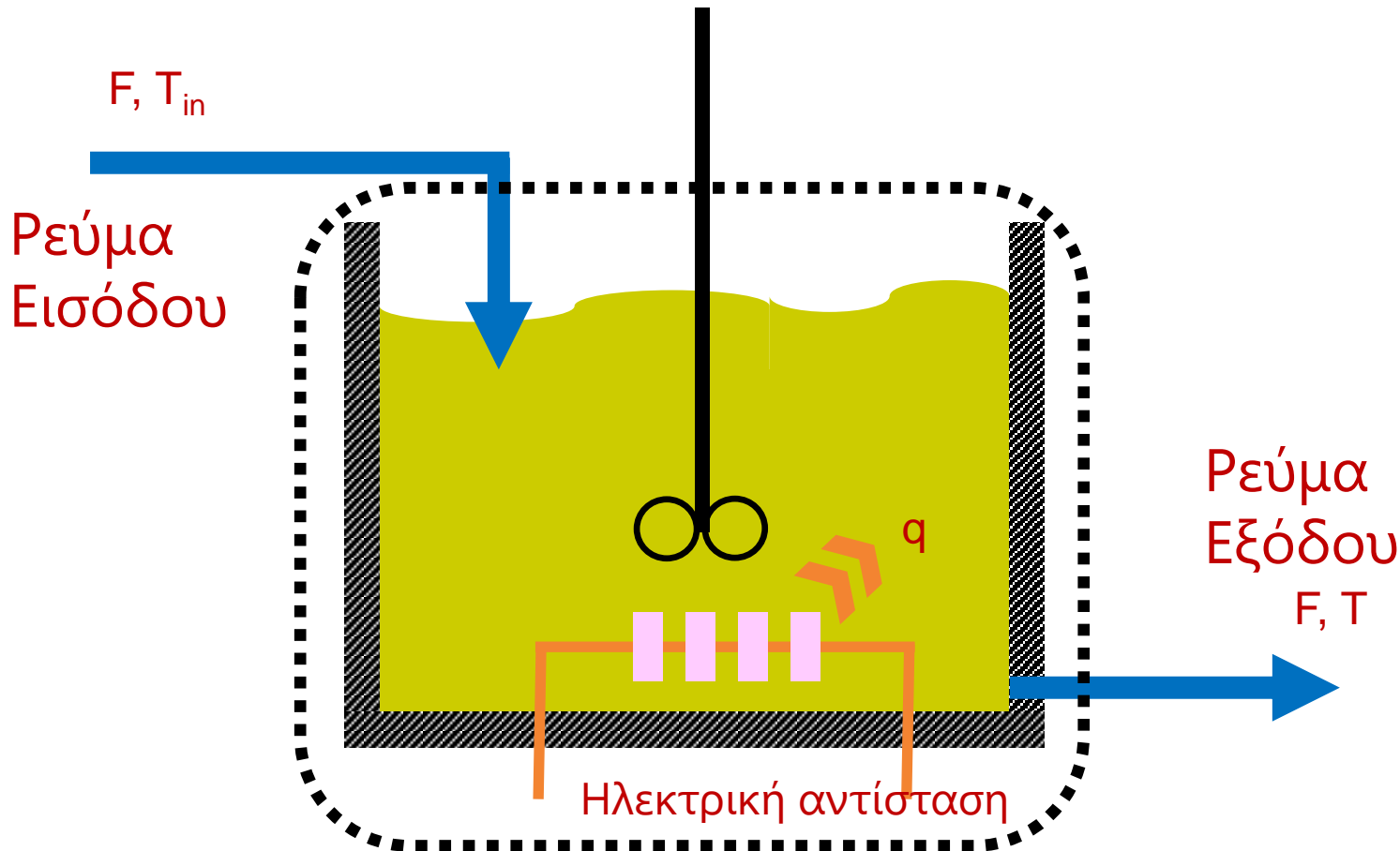
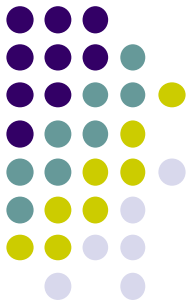
- Η αύξηση παραγωγής ΗΕ αρχικά **είναι πιο αργή!**

Η ανάποδη πράξη; Πρόσθεση ράβδου ελέγχου

- Η μείωση παραγωγής αρχικά **είναι πιο γρήγορη!**
- Η παραγωγή ατμού μειώνεται **απότομα!**
- Σε χαμηλή παραγωγή μπορεί να σβήσει ο RBMK (παγίδα Xe)

www.nuclear-power.net

Παράδειγμα: Εναλλαγή θερμότητας σε ΑΣΑ



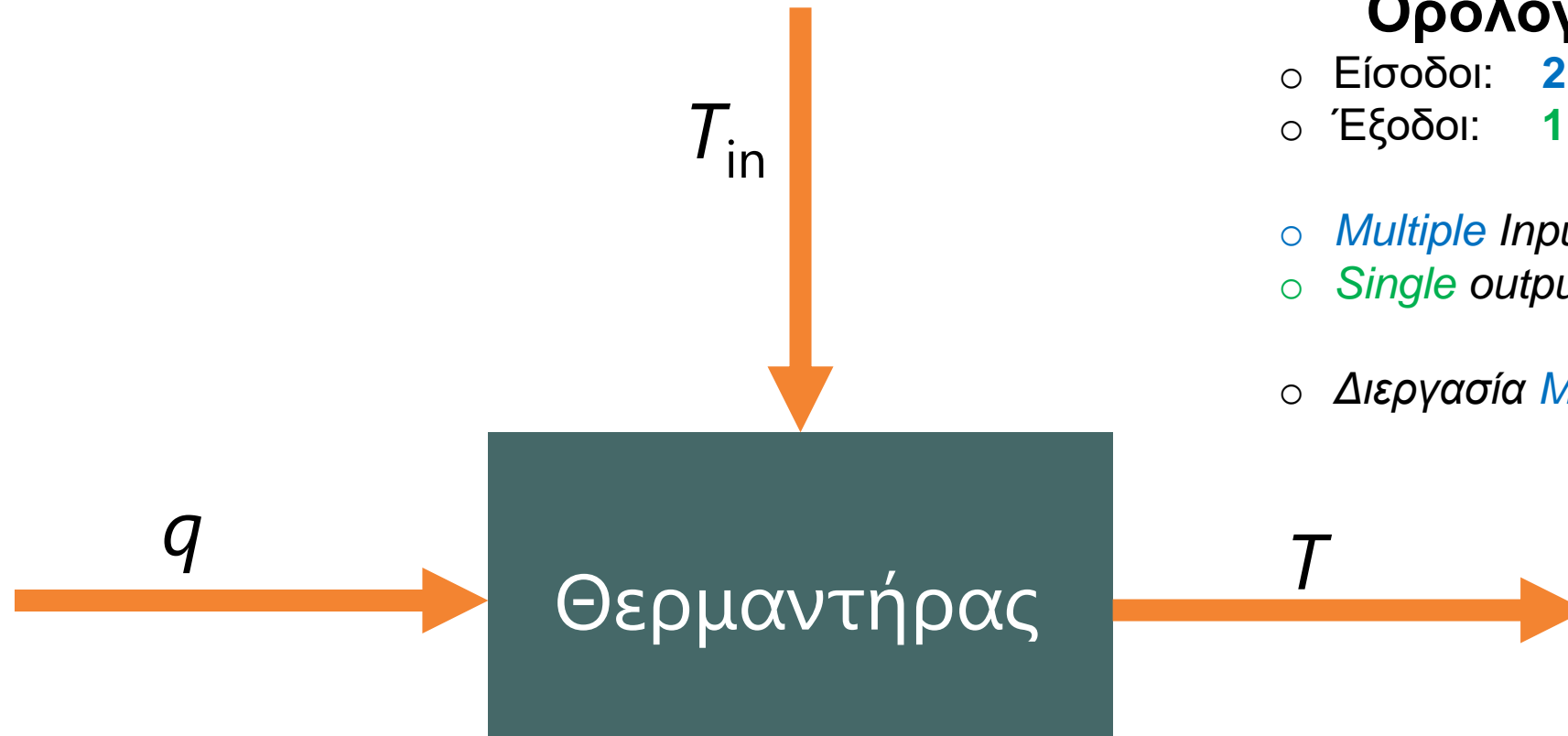
- Παράμετροι: F, ρ, c, V
- Μεταβλητές:
 - Χειριζόμενες: q
 - Διαταραχές: T_{in}
 - Μετρούμενες: T
 - Ρυθμιζόμενες: T

} εισόδου
} εξόδου

- Μοντέλο:
 - Ισοζύγιο θερμότητας

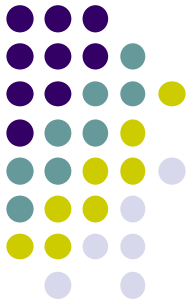
$$V\rho c \frac{dT}{dt} = F\rho c (T_{in} - T) + q$$

Διάγραμμα βαθμίδων

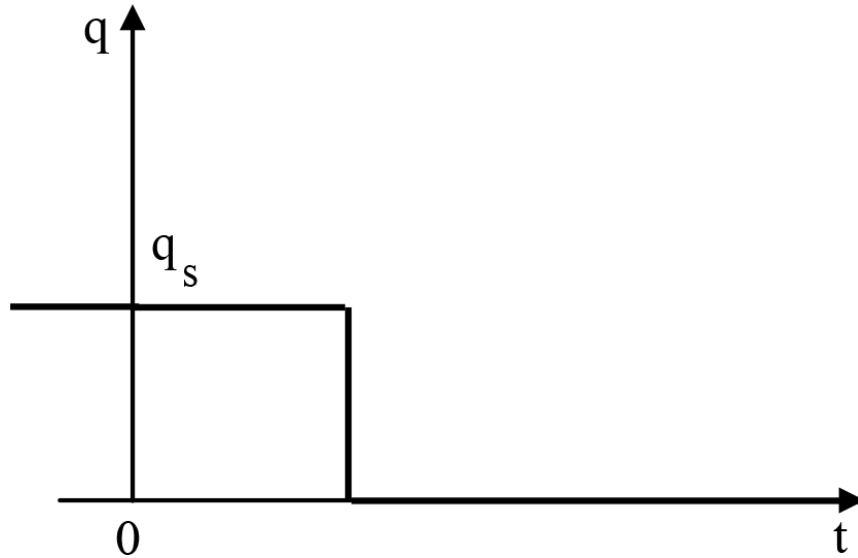


Ορολογία

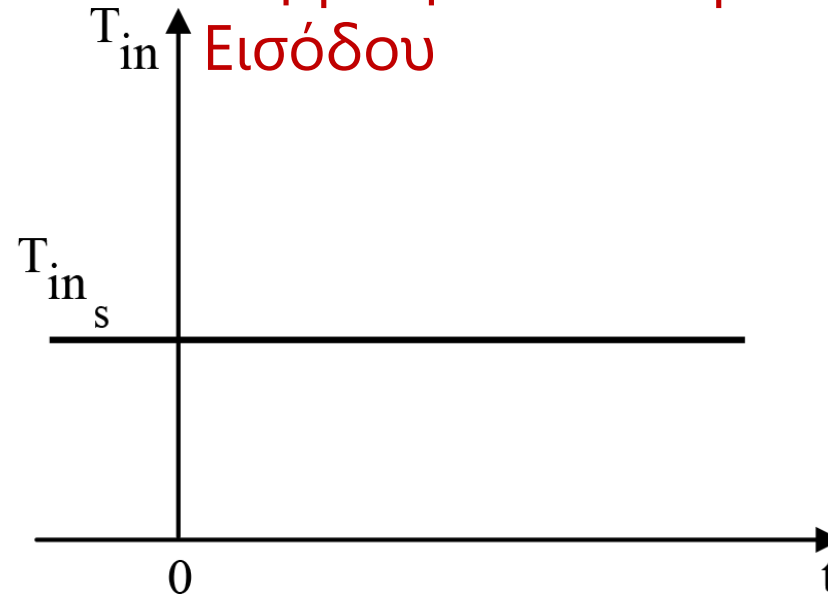
- Είσοδοι: **2**
- Έξοδοι: **1**
- *Multiple Input*
- *Single output*
- Διεργασία *MISO*



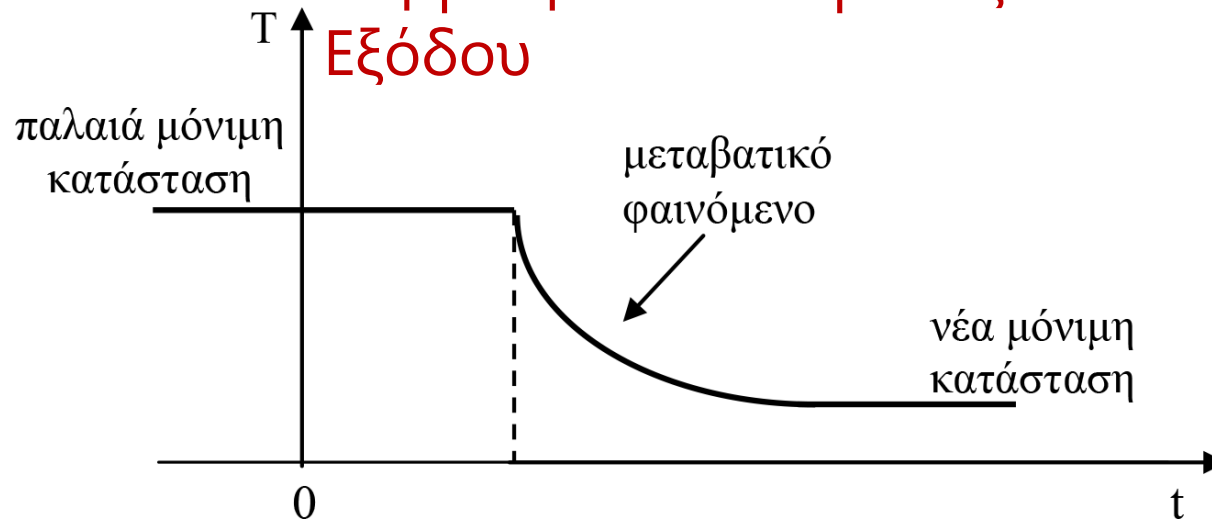
Εισερχόμενη Θερμότητα



Θερμοκρασία Ρεύματος Εισόδου



Θερμοκρασία Ρεύματος Εξόδου



Μεταβολή της
Θερμοκρασίας
μέσα στο σύστημα



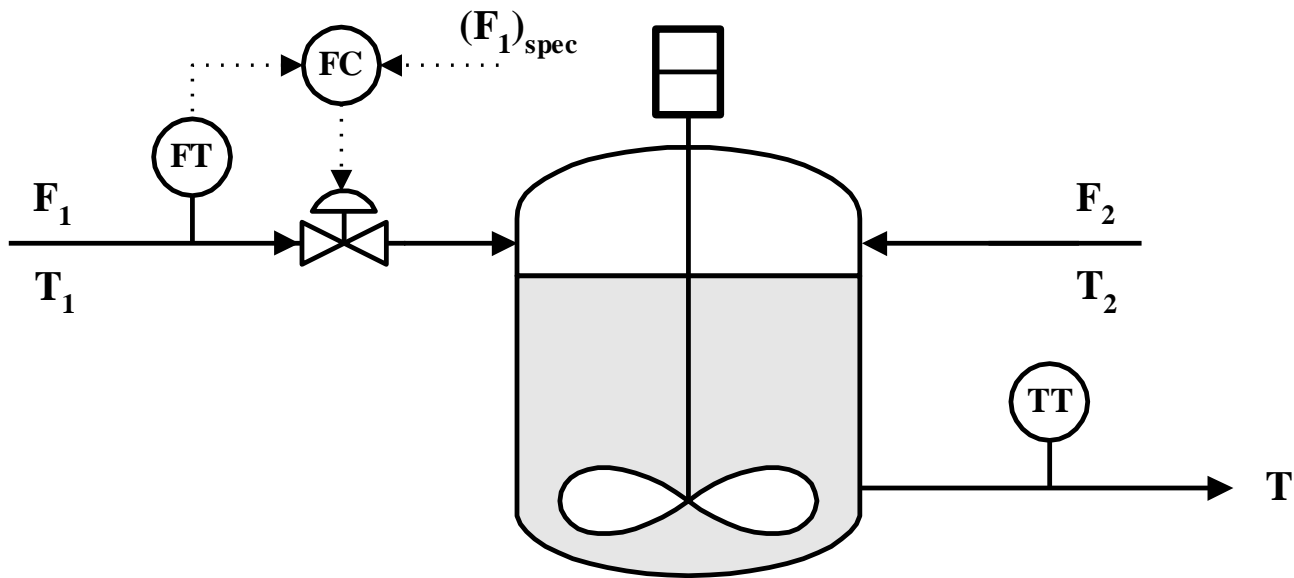
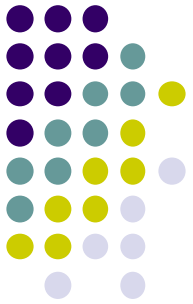
Χρήσεις δυναμικών μοντέλων διεργασιών

- Σχεδιασμός διεργασιών (συνεχούς και διαλειπτού) έργου
- Ανάπτυξη στρατηγικής εκκίνησης/παύσης λειτουργίας
- Ανάλυση ασφάλειας της (υπάρχουσας ή νέας) διεργασίας
- Αξιολόγηση αρχιτεκτονικών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου της διεργασίας
- Εκπαίδευση χειριστών

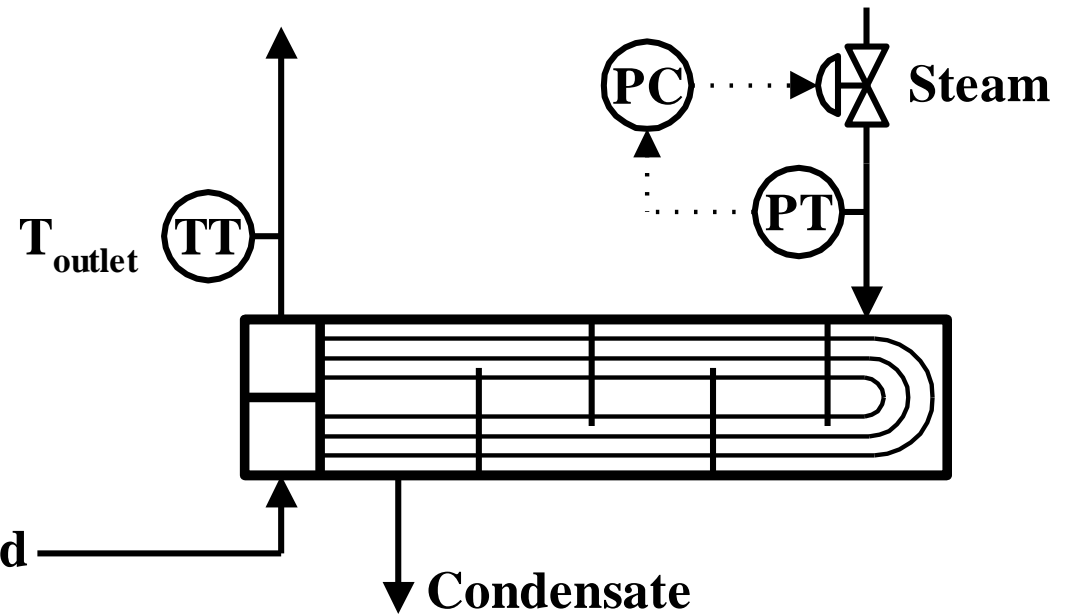
Κατάταξη μοντέλων

- **Μοντέλα ομοιόμορφων μεταβλητών-** υποθέτουμε ότι η εξαρτημένη μεταβλητή δεν αλλάζει στο χώρο εντός της διεργασίας,
 - π.χ., ένα τέλεια αναμεμειγμένο δοχείο, ο αντιδραστήρας συνεχούς ανάδευσης
 - Συνήθεις διαφορικές εξισώσεις
- **Μοντέλα κατανεμημένων μεταβλητών-** θεωρούμε ότι η εξαρτημένη μεταβλητή αλλάζει στο χώρο εντός της διεργασίας,
 - π.χ. ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο αντιδραστήρας εμβολικής ροής
 - Μερικές διαφορικές εξισώσεις

Παράδειγμα διεργασιών



Μοντέλο ομοιόμορφων μεταβλητών



Μοντέλο κατανεμημένων μεταβλητών

Ισοζύγια διατήρησης ιδιοτήτων

- Ισοζύγια μάζας, ενέργειας, ορμής, εντροπίας
 - Ορισμός όγκου ελέγχου
 - Υποθέσεις εργασίας
 - Ισοζύγια

$$\left[\begin{array}{l} \text{Rate of} \\ \text{Accumulation} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Rate Entering} \\ \text{the System} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Rate Leaving} \\ \text{the System} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Rate of Generation by} \\ \text{Reaction within the System} \end{array} \right]$$



Ολικό/στοιχειακό ισοζύγιο μάζας



$$\left[\begin{array}{l} \text{Rate of accumulation} \\ \text{of mass in the system} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Rate of mass} \\ \text{entering the} \\ \text{system} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Rate of mass} \\ \text{leaving the} \\ \text{system} \end{array} \right]$$

Όρος συσσώρευσης

Total mass balance : $\frac{dm}{dt}$ or $\frac{d(\rho V)}{dt}$

Component mass balance: $\frac{dm_i}{dt}$ or $\frac{d(x_i m)}{dt}$

Άλλοι όροι: (ροές εισόδου/εξόδου)

Mass entering or leaving the system:

$x_i F$ (component balance) or

F (overall mass balance)

Ισοζύγιο μάζας συστατικών



$$\left[\begin{array}{l} \text{Rate of accumulation} \\ \text{of moles in the system} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Rate of moles} \\ \text{entering the} \\ \text{system} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Rate of moles} \\ \text{leaving the} \\ \text{system} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Rate of generation} \\ \text{of moles by reaction} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Rate of consumption} \\ \text{of moles by reaction} \end{array} \right]$$

Όρος συσσώρευσης

Component mole balance:

$$\frac{dn_i}{dt} \quad \text{or} \quad \frac{d(VC_i)}{dt}$$

Άλλοι όροι στο ισοζύγιο

Moles of component i entering or leaving the system:

$x_i N$ (based on molar flow rate, N) or $C_i F_V$ (based on volumetric flow rate (F_V))

Generation or consumption of component i by reaction:

$$Vr_i = V\gamma_i r$$

Ισοζύγιο ενέργειας



$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{l} \text{Rate of accumulation} \\ \text{of thermal energy} \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{l} \text{Rate of convective} \\ \text{heat transfer} \\ \text{entering the system} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Rate of convective} \\ \text{heat transfer} \\ \text{leaving the system} \end{array} \right] \\ &+ \left[\begin{array}{l} \text{Net rate of} \\ \text{heat generation} \\ \text{by reaction} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Net rate of heat transfer} \\ \text{through the boundaries} \\ \text{of the system} \end{array} \right] \end{aligned}$$

Όρος συσσώρευσης

Energy Balance Equation :

$$MC_v \frac{dT}{dt}$$

Άλλοι όροι στο ισοζύγιο

Convective Heat Transfer :

$$FC_p (T_s - T_{ref})$$

Heat Generation by reaction :

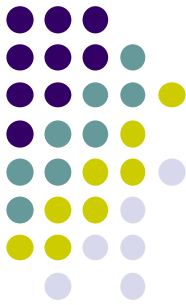
$$-Vr_i \Delta H_{rxn} (T)$$

Εμπειρικές σχέσεις



- Συνήθως στη μορφή αλγεβρικών εξισώσεων.
- Χρησιμοποιούνται με τις εξισώσεις ισοζυγίων για τη μοντελοποίηση διεργασιών χημικής μηχανικής.
- Παραδείγματα:
 - Συνάρτηση ρυθμού αντίδρασης
 - Σχέσεις ισορροπίας ατμού/υγρού
 - Συνάρτηση μεταφοράς θερμότητας

Κατηγορίες μεταβλητών στις εξισώσεις



- **Εξαρτημένες μεταβλητές** υπολογίζονται από τη λύση των εξισώσεων του μοντέλου.
- **Ανεξάρτητες μεταβλητές** λαμβάνουν τιμές από προδιαγραφές, από τον χρήστη (ή το σύστημα ελέγχου) ή από έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης και αντιπροσωπεύουν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας.
- **Παράμετροι**, όπως οι πυκνότητες ή οι σταθερές ρυθμού αντίδρασης, είναι σταθερές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις του μοντέλου.



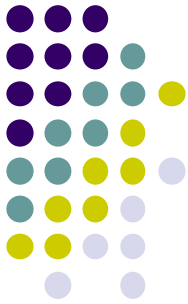
Δυναμικά μοντέλα: Μην ξεχνάτε τον εξοπλισμό

- Τα συστήματα ελέγχου θα επηρεάζουν τη διαδικασία μέσω του ενεργοποιητή που έχει και αυτός τη δική του δυναμική.
- Η διεργασία ανταποκρίνεται δυναμικά στην αλλαγή της μεταβλητής που χειρίζεται.
- Η απόκριση της διαδικασίας μετριέται με αισθητήρα που έχει τη δική του δυναμική.
- Υπάρχουν πολλά συστήματα για τα οποία η δυναμική του ενεργοποιητή και του αισθητήρα είναι σημαντική.

Διάγραμμα βαθμίδων:



Δημιουργία δυναμικού συστήματος



Περιγραφή του μοντέλου ως **γενικό σύστημα** εξισώσεων

- Μεταβλητές και συναρτήσεις ορίζονται ως διανύσματα
- Κομψή περιγραφή αλλά χρειάζεται προσοχή για να αποφευχθούν λάθη
- Βασίζεται σε τυπική σημειογραφία
- Οι μαθηματικές πράξεις γράφονται ως βήματα αλγορίθμου

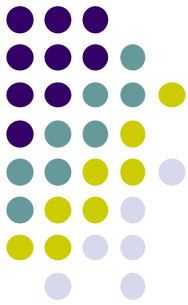
• **Μεταβλητές:**

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_M \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix} \quad y_m = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix}$$

- Διαταραχή (d)
- Χειριζόμενη μετ. (u)
- Ρυθμιζόμενη μετ. (y_c)
- Μετρούμενη μετ. (y_m)
- Μετ. Κατάστασης (x)

• **Συναρτήσεις:**

$$f(x, u, d) = \begin{bmatrix} f_1(x, u, d) \\ f_2(x, u, d) \\ \vdots \\ f_N(x, u, d) \end{bmatrix} \quad g_c(u, c) = \begin{bmatrix} g_1(u, c) \\ g_2(u, c) \\ \vdots \\ g_M(u, c) \end{bmatrix} \quad h_m(x, u, d) = \begin{bmatrix} h_1(x, u, d) \\ h_2(x, u, d) \\ \vdots \\ h_L(x, u, d) \end{bmatrix}$$



Δημιουργία δυναμικού συστήματος

Περιγραφή του μοντέλου ως **γενικό σύστημα** εξισώσεων

- Μεταβλητές και συναρτήσεις ορίζονται ως διανύσματα
- Κομψή περιγραφή αλλά χρειάζεται προσοχή για να αποφευχθούν λάθη
- Βασίζεται σε τυπική σημειογραφία
- Οι μαθηματικές πράξεις γράφονται ως βήματα αλγορίθμου

- **Μεταβλητές:**
 - Διαταραχή (d)
 - Χειριζόμενη μετ. (u)
 - Ρυθμιζόμενη μετ. (y_c)
 - Μετρούμενη μετ. (y_m)
 - Μετ. Κατάστασης (x)

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_M \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix} \quad y_c = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix} \quad y_m = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix}$$

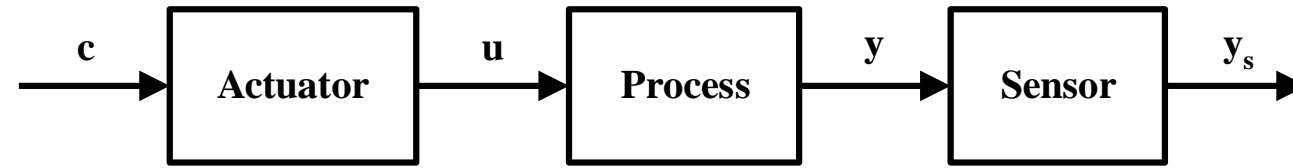
- **Συναρτήσεις:**

$$f(x, u, d) = \begin{bmatrix} f_1(x, u, d) \\ f_2(x, u, d) \\ \vdots \\ f_N(x, u, d) \end{bmatrix} \quad g_c(u, c) = \begin{bmatrix} g_1(u, c) \\ g_2(u, c) \\ \vdots \\ g_M(u, c) \end{bmatrix} \quad h_m(x, u, d) = \begin{bmatrix} h_1(x, u, d) \\ h_2(x, u, d) \\ \vdots \\ h_L(x, u, d) \end{bmatrix}$$

Δυναμικό σύστημα στο χώρο κατάστασης



Σύστημα με εξοπλισμό:



$$\frac{du}{dt} = g_c(u, c)$$

- Δυναμική ενεργοποιητή

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, d)$$

- Δυναμική διεργασίας

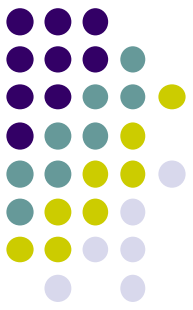
$$\frac{dy_m}{dt} = h_m(y_m, x, u, d)$$

- Δυναμική αισθητήρα

$$y_c = h_c(x, u, d)$$

- Αν και το μη γραμμικό ODE μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας, είναι προχωρημένο θέμα
- Σ' αυτό το εισαγωγικό μάθημα θα επικεντρωθούμε στις εξής απλοποιήσεις
 - Μία χειριζόμενη μεταβλητή
 - Μία διαταραχή
 - Μία μετρούμενη μεταβλητή
 - Μία ρυθμιζόμενη μεταβλητή. **Αρχικά ρυθμιζόμενη \equiv Μετρούμενη**

Δυναμικό σύστημα στο χώρο κατάστασης



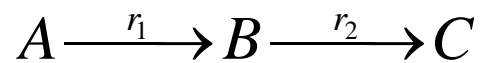
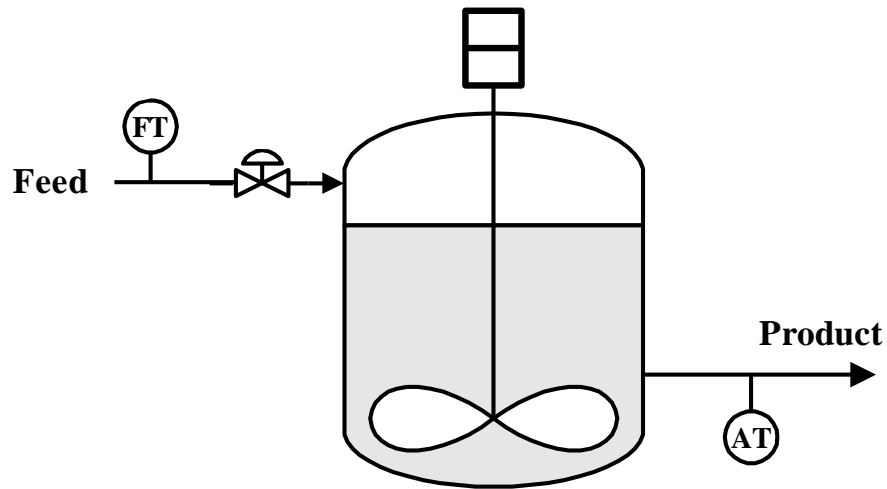
Δυναμικό σύστημα (κοιτάμε μόνο την διεργασία εδώ):

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, d)$$

$$y_c = h_c(x, u, d)$$

- Το μη γραμμικό σύστημα δεν θα χρησιμοποιηθεί
- Γραμμικοποιούμε το δυναμικό σύστημα
- **Το σημείο γραμμικοποίησης πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά!**
 - Συνήθως είναι το σημείο λειτουργίας
 - Συνήθως είναι σημείο ισορροπίας (από τον σχεδιασμό)

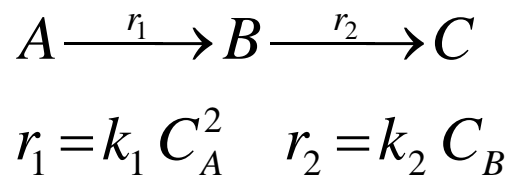
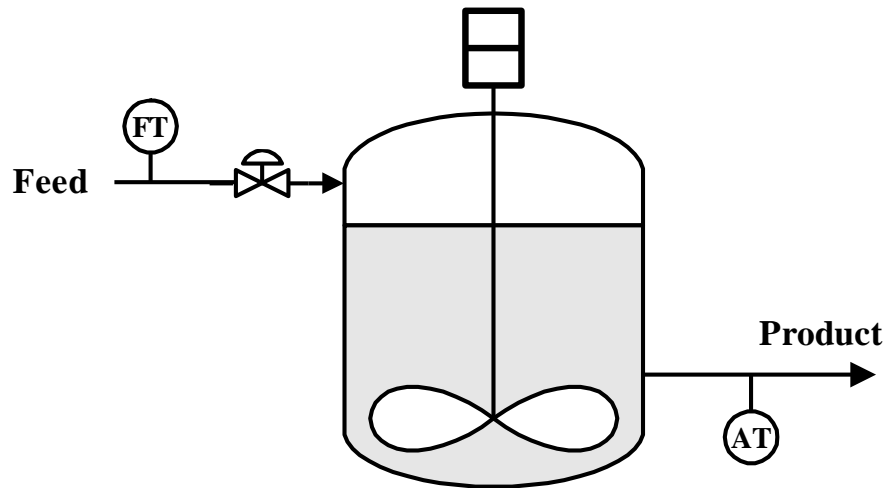
Παράδειγμα: Ισοθερμοκρασιακός ΑΣΑ



$$r_1 = k_1 C_A^2 \quad r_2 = k_2 C_B$$

- Θέλουμε να παράγουμε οικονομικά συστατικό B
- Έχουμε δοθεί την T από βελτιστοποίηση
- Έχουμε δοθεί την βέλτιστη παραγωγή: C_B
- Γνωρίζουμε τον μηχανισμό των αντιδράσεων
- Η συγκέντρωση στο ρεύμα εισόδου ταλαντώνεται
- Γνωρίζουμε τον εξοπλισμό
 - Διαταραχή (d) _____
 - Χειριζόμενη μετ. (u) _____
 - Ελεγχόμενη μετ. (y_c) _____
 - Μετρούμενη μετ. (y_m) _____
 - Μετ. Κατάστασης (x) _____

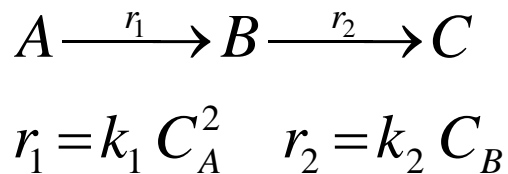
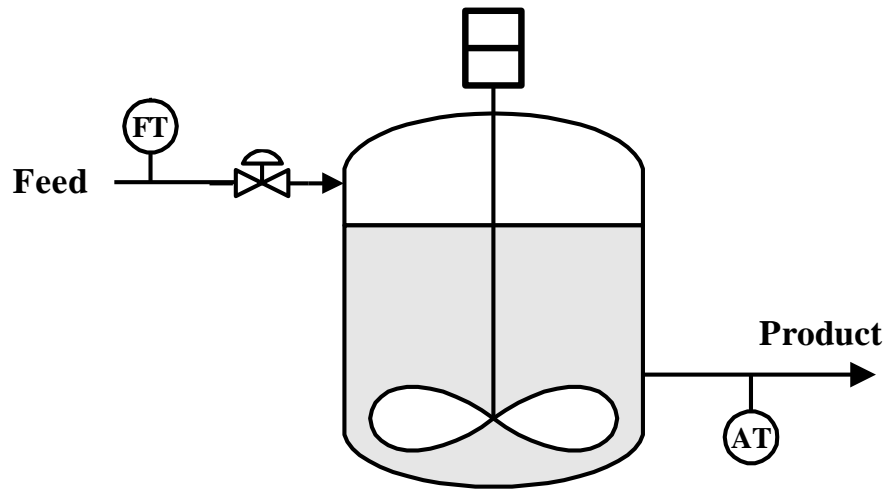
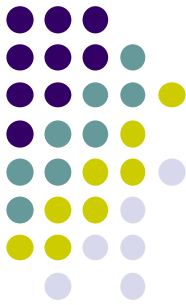
Παράδειγμα: ισοθερμοκρασιακός ΑΣΑ



- Θέλουμε να παράγουμε οικονομικά συστατικό B
- Έχει δοθεί η T από βελτιστοποίηση
- Έχει δοθεί η βέλτιστη παραγωγή C_B
- Γνωρίζουμε τον μηχανισμό των αντιδράσεων
- Η συγκέντρωση στο ρεύμα εισόδου ταλαντώνεται
- Ο εξοπλισμός είναι «ιδανικός»

- Διαταραχή (d) C_{A0}
- Χειριζόμενη μετ. (u) F
- Ρυθμιζόμενη μετ. (y_c) C_B
- Μετρούμενη μετ. (y_m) C_B
- Μετ. Κατάστασης (x) C_A, C_B

Παράδειγμα: ισοθερμοκρασιακός ΑΣΑ



- Ισοζύγιο μάζας (μοριακό) συστατικού A

$$V_r \frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{\rho} [C_{A0} - C_A] - V_r k_1 C_A^2$$

- Ισοζύγιο μάζας (μοριακό) συστατικού B

$$V_r \frac{dC_B}{dt} = -\frac{FC_B}{\rho} + V_r k_1 C_A^2 - V_r k_2 C_B$$

- Ολικό ισοζύγιο;

δεν δίνει νέα πληροφορία

- Ισοζύγιο θερμοκρασίας;

δεν δίνει νέα πληροφορία