

# Φυσικές Διεργασίες Ι

- ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΉ ΑΠΟΣΤΑΞΗ

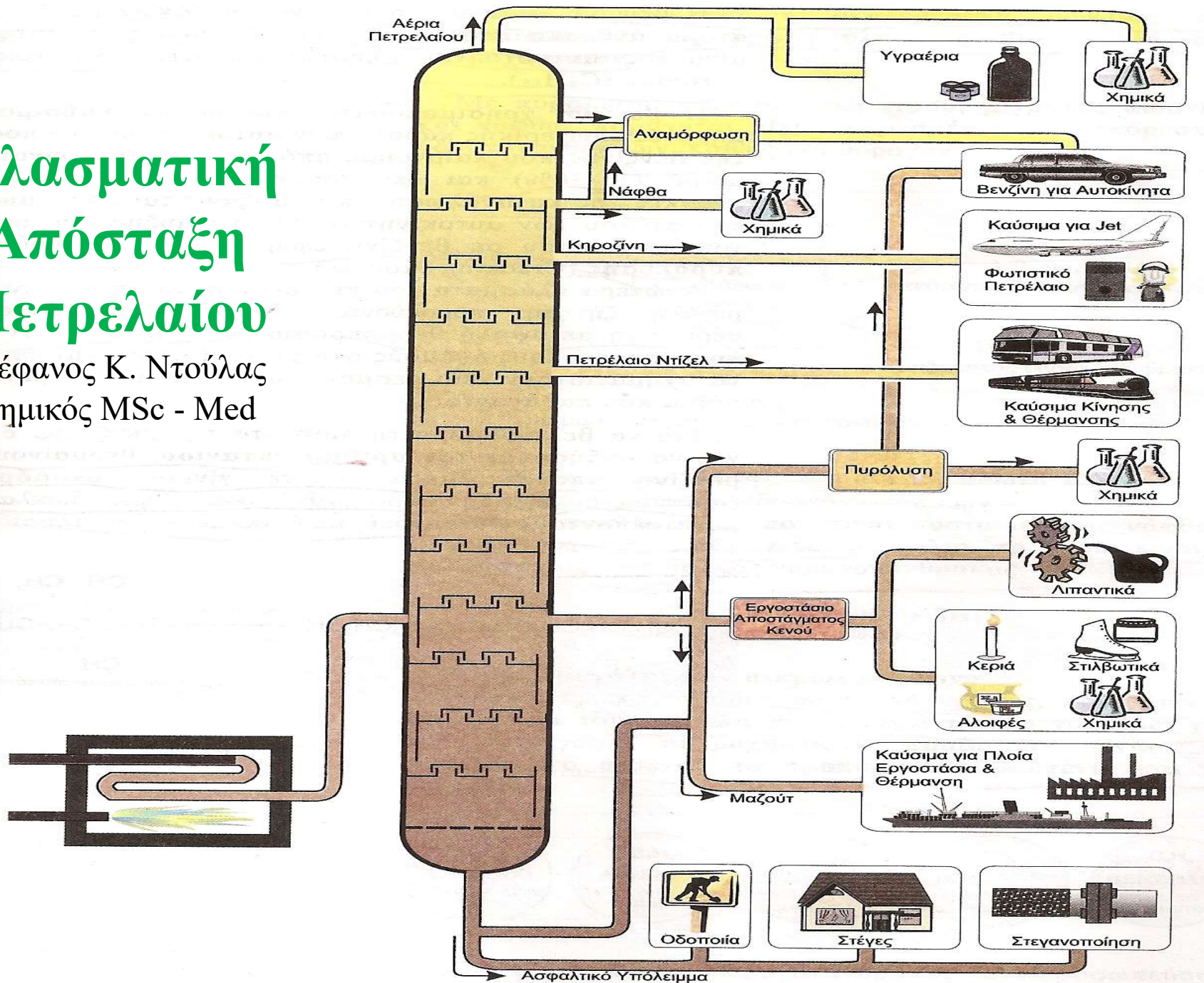
ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

# Κλασματική Απόσταξη

- Είναι η διεργασία διαχωρισμού μίγματος σε στήλη **επαφής ατμών-υγρού**, όπου οι ατμοί ρέουν κατ' αντιστροφή προς το υγρό και επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων καθ' όλο το ύψος της στήλης.
- Η κατεύθυνση του ατμού-υγρού είναι προς τα πάνω και η συγκέντρωση των πτητικών αυξάνεται προς την κατεύθυνση ροής του ατμού
- Η επαφή ατμών-υγρού επιτυγχάνεται με ειδικούς δίσκους (**στάδια ή βαθμίδες**), εξ' ου και η ονομασία «Αποστακτικές στήλες με δίσκους»

# Κλασματική Απόσταξη Πετρελαίου

Στέφανος Κ. Ντούλας  
Χημικός MSc - Med



# Κλασματική Απόσταξη

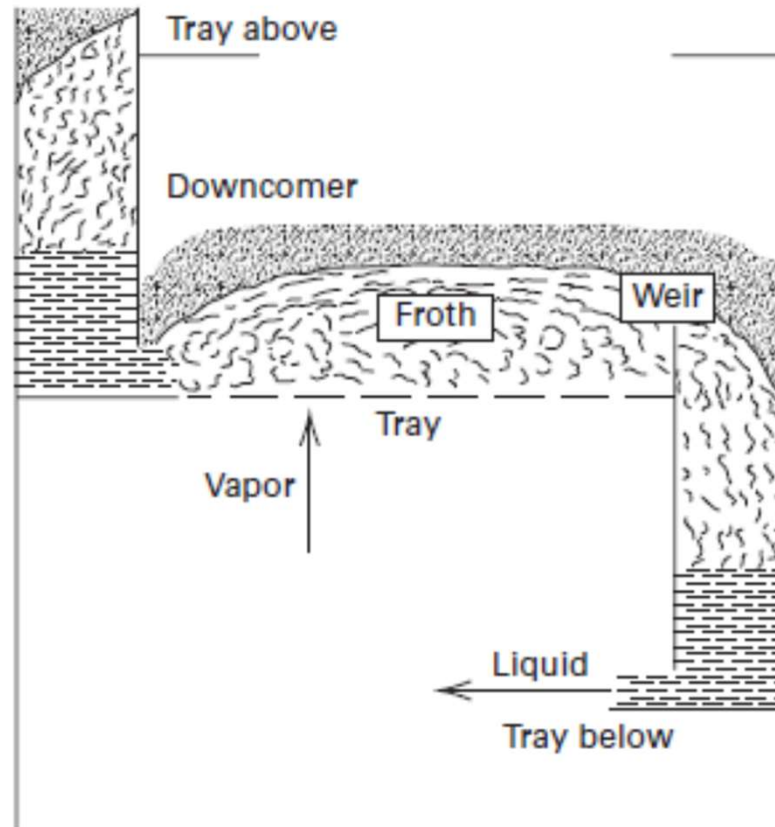


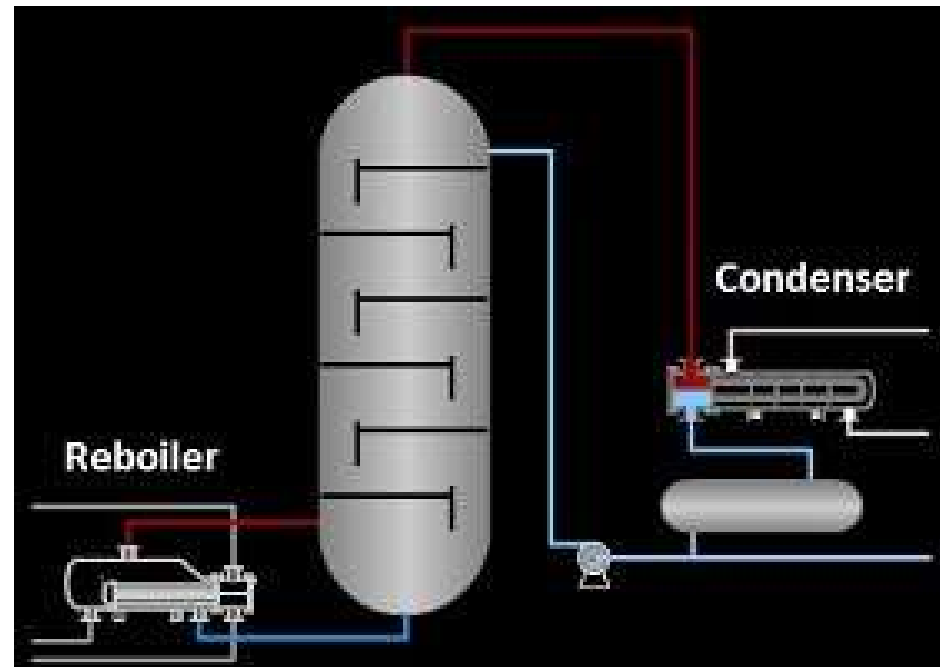
Figure 5.8 Typical vapor-liquid contacting tray.

# Κλασματική Απόσταξη

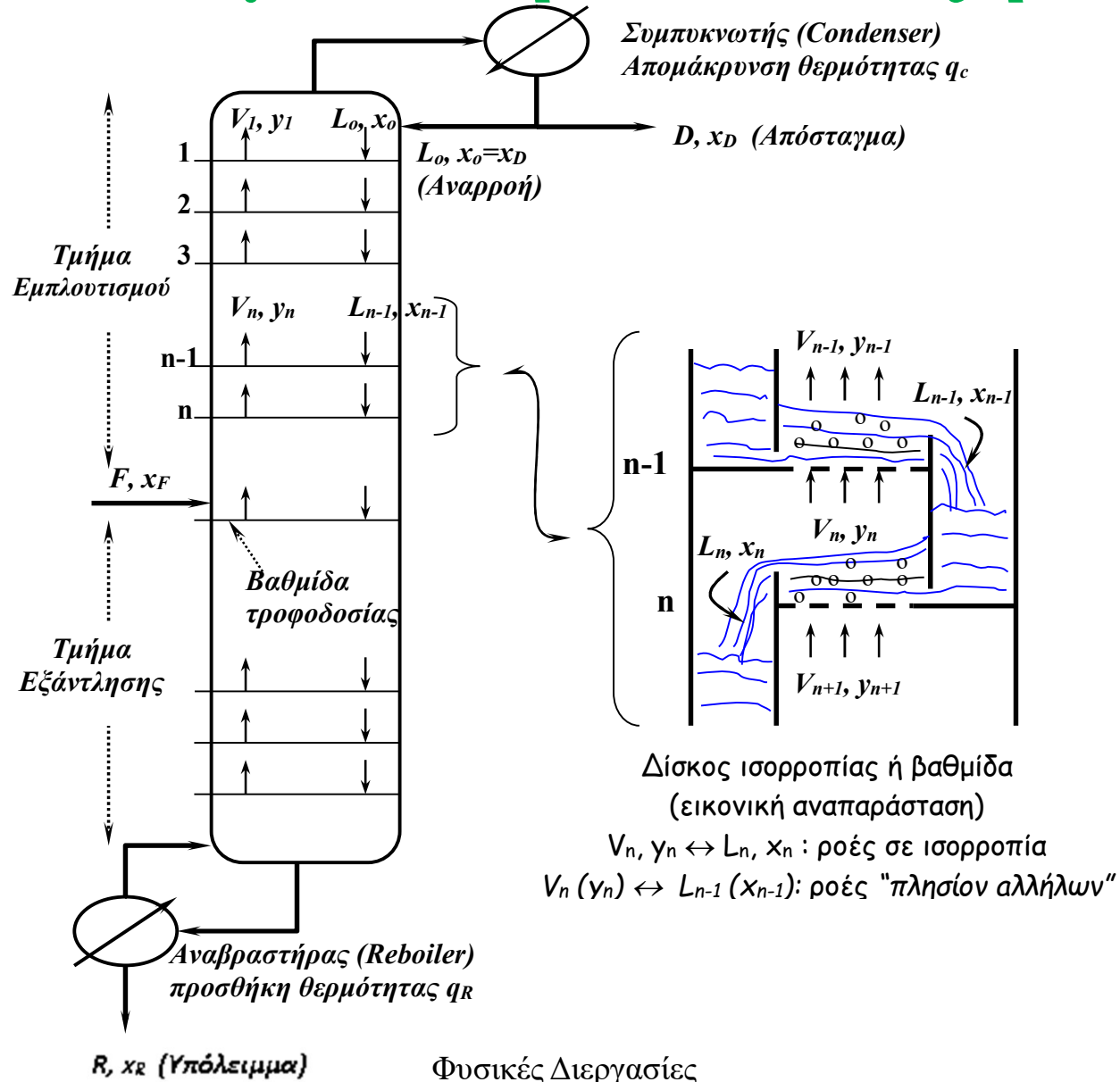
- Η **κλασματική απόσταξη** σε βαθμίδες μπορεί να θεωρηθεί σαν μια σειρά απλών «αποστάξεων ισορροπίας», όπου τα προϊόντα μιας βαθμίδας είναι τροφοδοσίες των προσκειμένων, άνω και κάτω, βαθμίδων.
- Η αποστακτική στήλη συνοδεύεται από ένα **Αναβραστήρα** (στον πυθμένα) και ένα **συμπυκνωτήρα** (στην κορυφή)
- Η τροφοδότηση (F) είναι εισάγεται συνήθως κοντά στο μέσον της στήλης χωρίζοντας την σε τμήμα εμπλουτισμού και εξάντλησης
- Η πίεση λειτουργίας θεωρείται σταθερή σε όλο μήκος της στήλης

# Κλασματική Απόσταξη

## Αναβραστήρας- Συμπυκνωτής



# Κλασματική Απόσταξη



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

- Μεταβλητές
  - (1) Πίεση λειτουργίας της στήλης ( $P$ )
  - (2) Ρυθμός τροφοδότησης ( $F$ )
  - (3) Σύσταση τροφοδότησης ( $x_F$ )
  - (4) Ενθαλπία (θερμική κατάσταση) τροφοδότησης  $h_F$  ή  $q$
  - (5) Σύσταση αποστάγματος ( $x_D$ )
  - (6) Σύσταση υπολείμματος ( $x_R$ )
  - (7) Ενθαλπία αναρροής ( $h_L$ )
  - (8) Λόγος αναρροής ( $R_D=L/D$ )

Τα  $x_F$ ,  $x_D$  και  $x_R$  αναφέρονται στο πτητικότερο συστατικό)

*Ζητούμενο: Ο υπολογισμός των απαιτούμενων θεωρητικών βαθμίδων για ένα δεδομένο διαχωρισμό.*



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Ολικό Ισοζύγιο μάζας (υλικών)

$$F = D + R$$

Παροχή Τροφοδοσίας =  
παροχή αποστάγματος +  
παροχή υπολείμματος

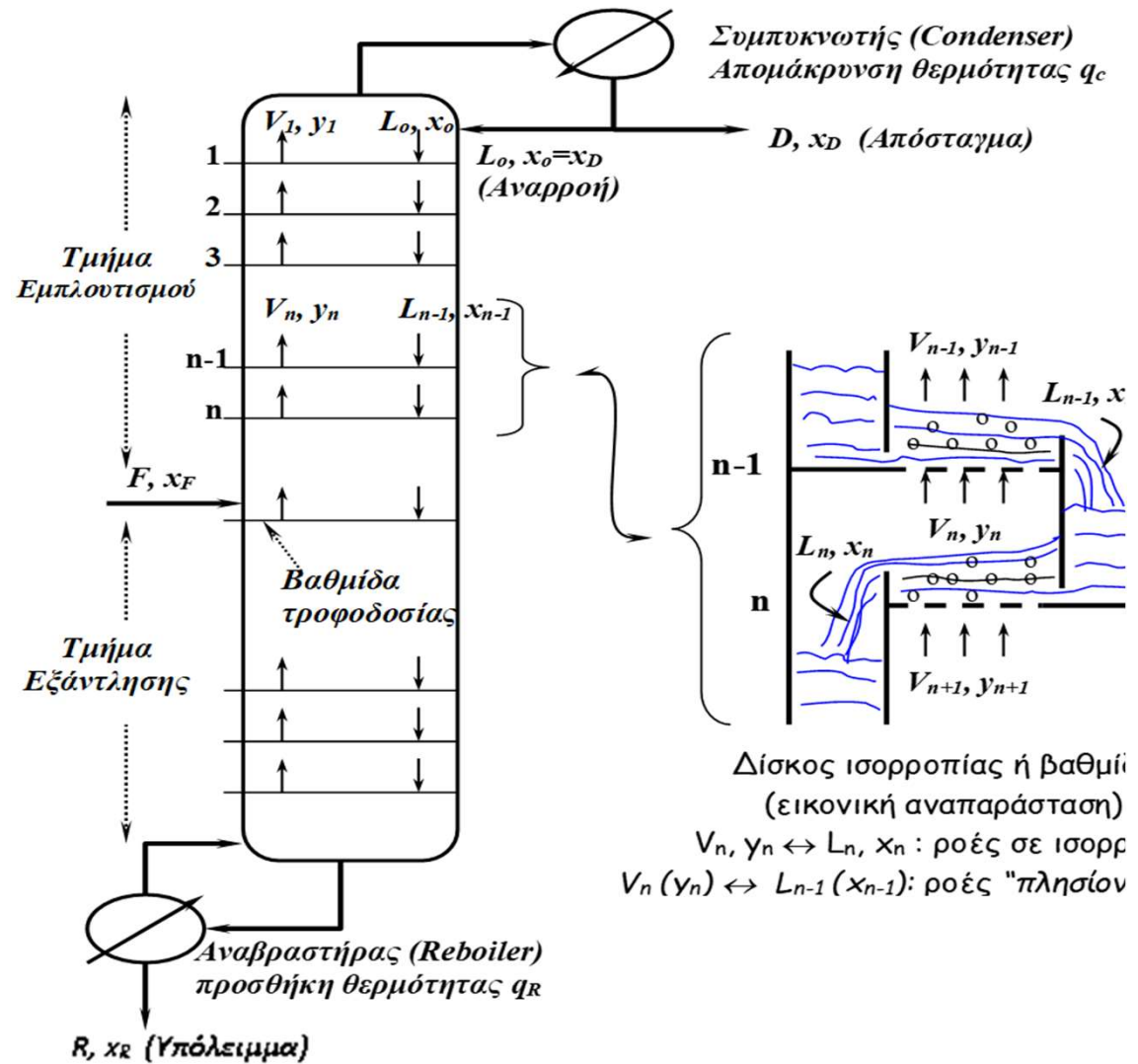
## Ισοζύγιο Πτητικού (Α)

$$F x_F = D x_D + R x_R$$

$$R = F \frac{(x_D - x_F)}{(x_D - x_R)}$$

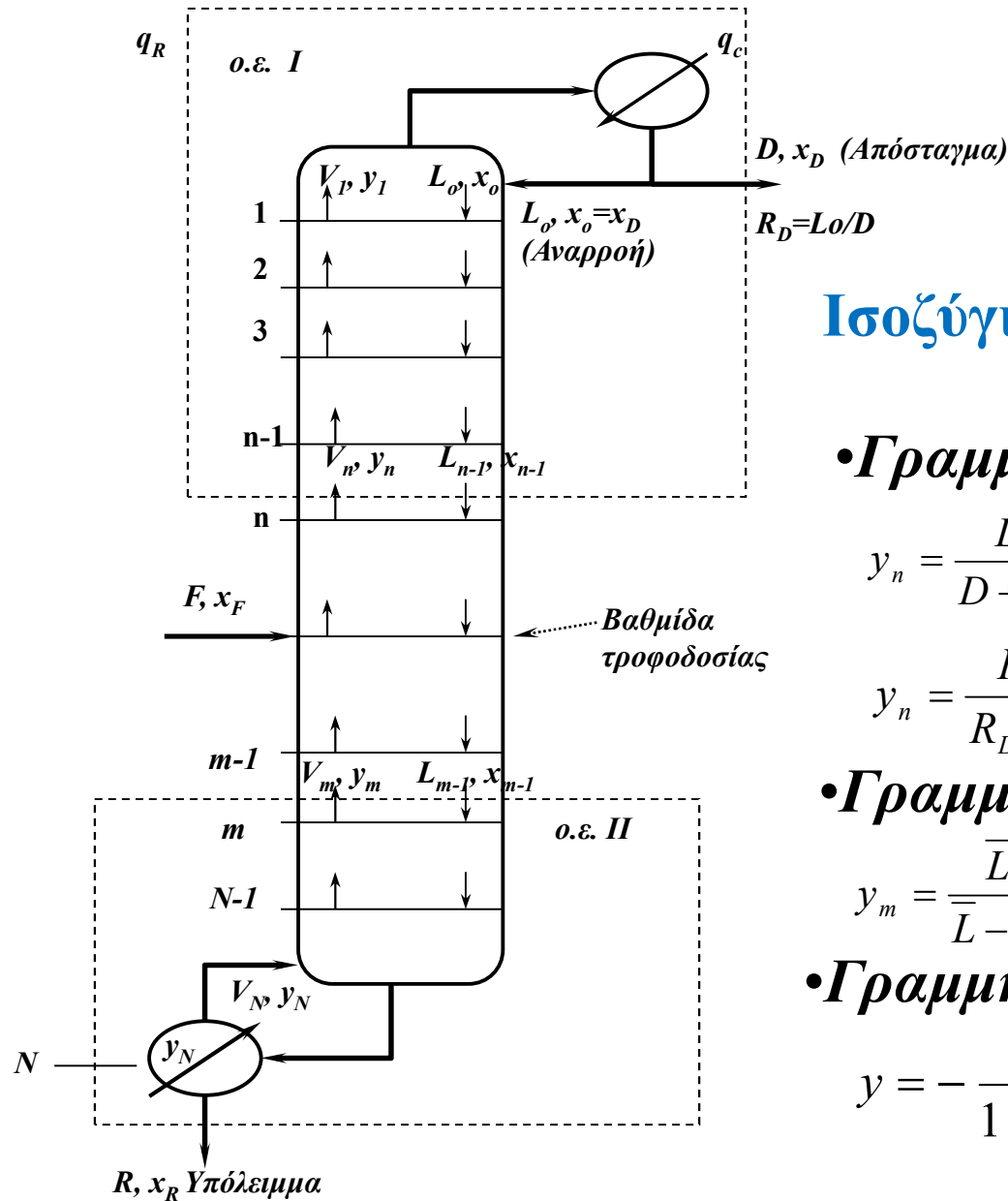
$$D = F \frac{(x_F - x_R)}{(x_D - x_R)}$$

04/11/2021



Φυσικές Διεργασίες

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



## Ισοζύγια μάζας στους Ο.Ε.

### • Γραμμή εμπλουτισμού:

$$y_n = \frac{L}{D+L} x_{n-1} + \frac{D}{D+L} x_D$$

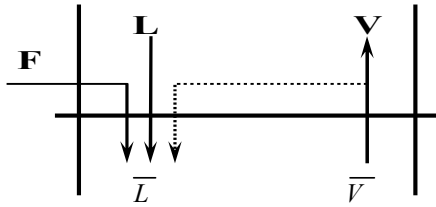
$$y_n = \frac{R_D}{R_D+1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D+1}$$

### • Γραμμή εξάντλησης:

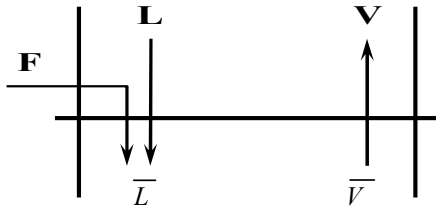
$$y_m = \frac{\bar{L}}{\bar{L}-R} x_{m-1} - \frac{R}{\bar{L}-R} x_R$$

### • Γραμμή τροφοδοσίας ή *q-line*:

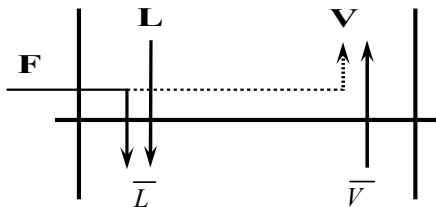
$$y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}$$



(i) Τροφοδοσία υπόψυκτου υγρού ( $T_F < T_{\sigma.\beta.}$ ): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται στο τμήμα εξάντλησης αυξάνοντας το  $\bar{L}$  ενώ συγχρόνως υγροποιεί και συμπαρασύρει κάποιο ποσοστό των ατμών  $V$ :  
 $q > 1 \rightarrow q = 1 + C_{pL} (T_{\sigma.\beta.} - T_F) / \lambda$

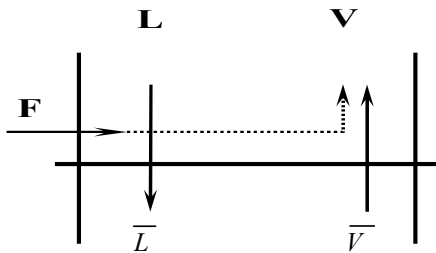


(ii) Τροφοδοσία κορεσμένου υγρού ( $T_F = T_{\sigma.\beta.}$ ): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται στο τμήμα εξάντλησης αυξάνοντας το  $\bar{L}$ , χωρίς όμως να επηρεάζει την ροή των ατμών  $V$ :  $q = 1 \rightarrow \bar{L} - L = F$

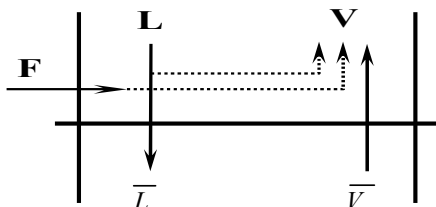


(iii) Τροφοδοσία ατμού-υγρού σε ισορροπία (μερικώς εξατμισμένο υγρό): μέρος της τροφοδοσίας αυξάνει την ποσότητα υγρού στο τμήμα εξάντλησης, ενώ το υπόλοιπο αυξάνει τον ατμό  $V$  του τμήματος εμπλουτισμού:

$$0 < q < 1 \rightarrow \{ \bar{L} = L + qF \quad \text{και} \quad V = \bar{V} + (1 - q)F$$



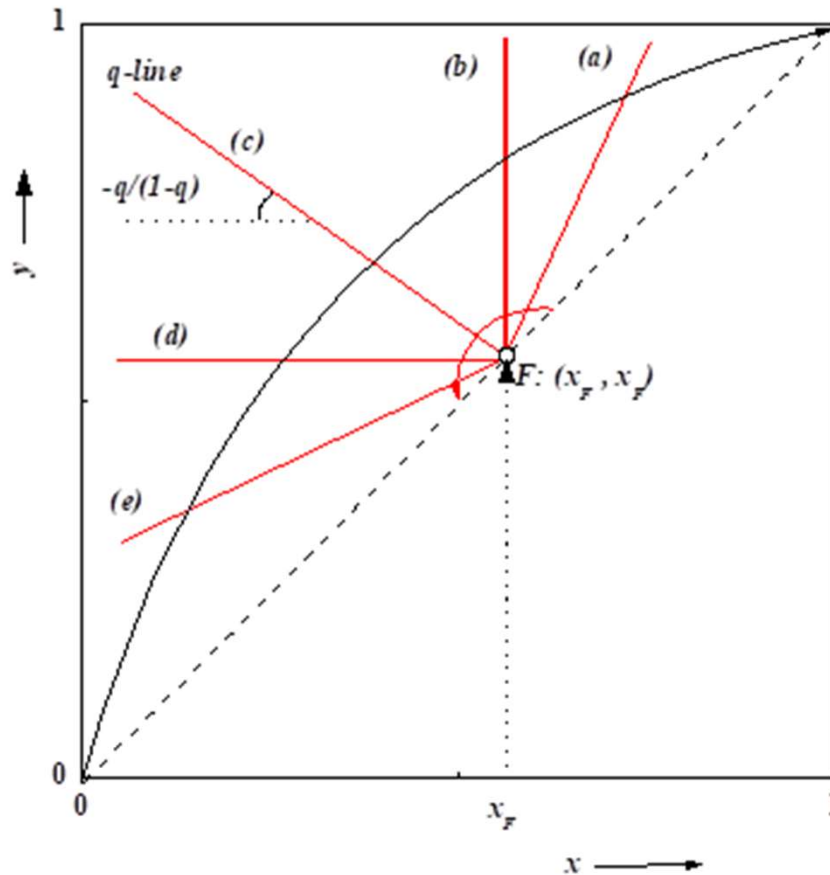
(iv) Τροφοδοσία κορεσμένου ατμού (ατμού στο σημείο δρόσου,  $T_F = T_{\sigma.\delta\rho.}$ ): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται ως ατμός στο τμήμα εμπλουτισμού, αφήνοντας ανεπηρέαστη την ροή υγρού  $L$ :  
 $q = 0 \rightarrow (V = \bar{V} + F)$



(v) Τροφοδοσία υπέρθερμου ατμού ( $T_F > T_{\sigma.\delta\rho.}$ ): Όλη η τροφοδοσία κατευθύνεται στο τμήμα εμπλουτισμού, ενώ συγχρόνως εξατμίζει και παρασύρει κάποιο ποσοστό του υγρού  $L$ :  
 $q < 0 \rightarrow q = C_{pV} (T_{\sigma.\delta\rho.} - T_F) / \lambda$

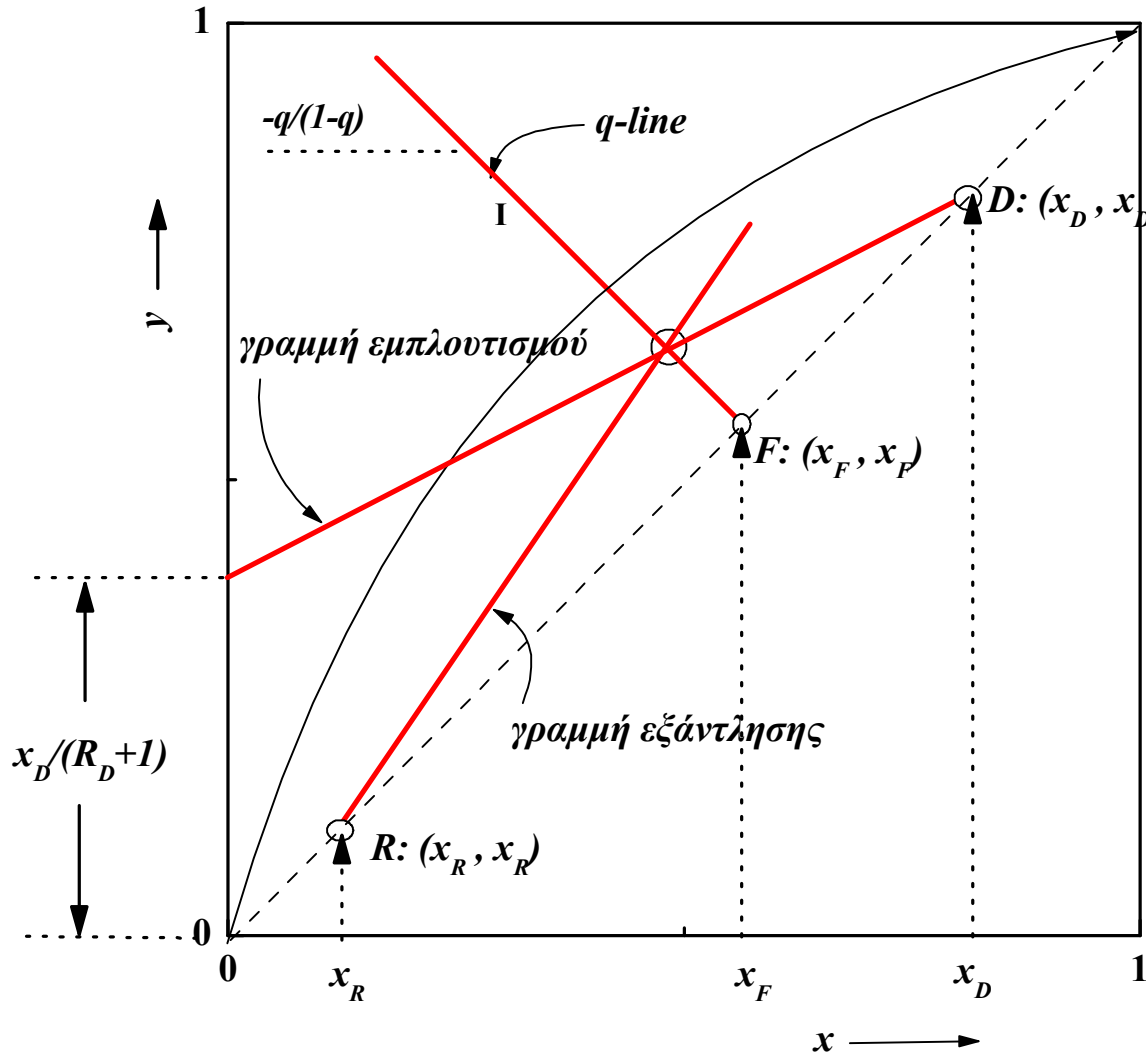
# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Ανάλυση Τμήματος Τροφοδοσίας



- (a):  $q > 1$ , υπόψυκτο υγρό
- (b):  $q = 1$ , κορεσμένο υγρό
- (c):  $0 < q < 1$ , υγρό + ατμός
- (d):  $q = 0$ , κορεσμένος ατμός
- (e):  $q < 0$ , υπέρθερμος ατμός

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



$$y_n = \frac{R_D}{R_D + 1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

- (α) διέρχεται από το σημείο  $(x_D, x_D)$  της διαγωνίου
- (β) έχει κλίση:  $-R_D/(R_D-1)$

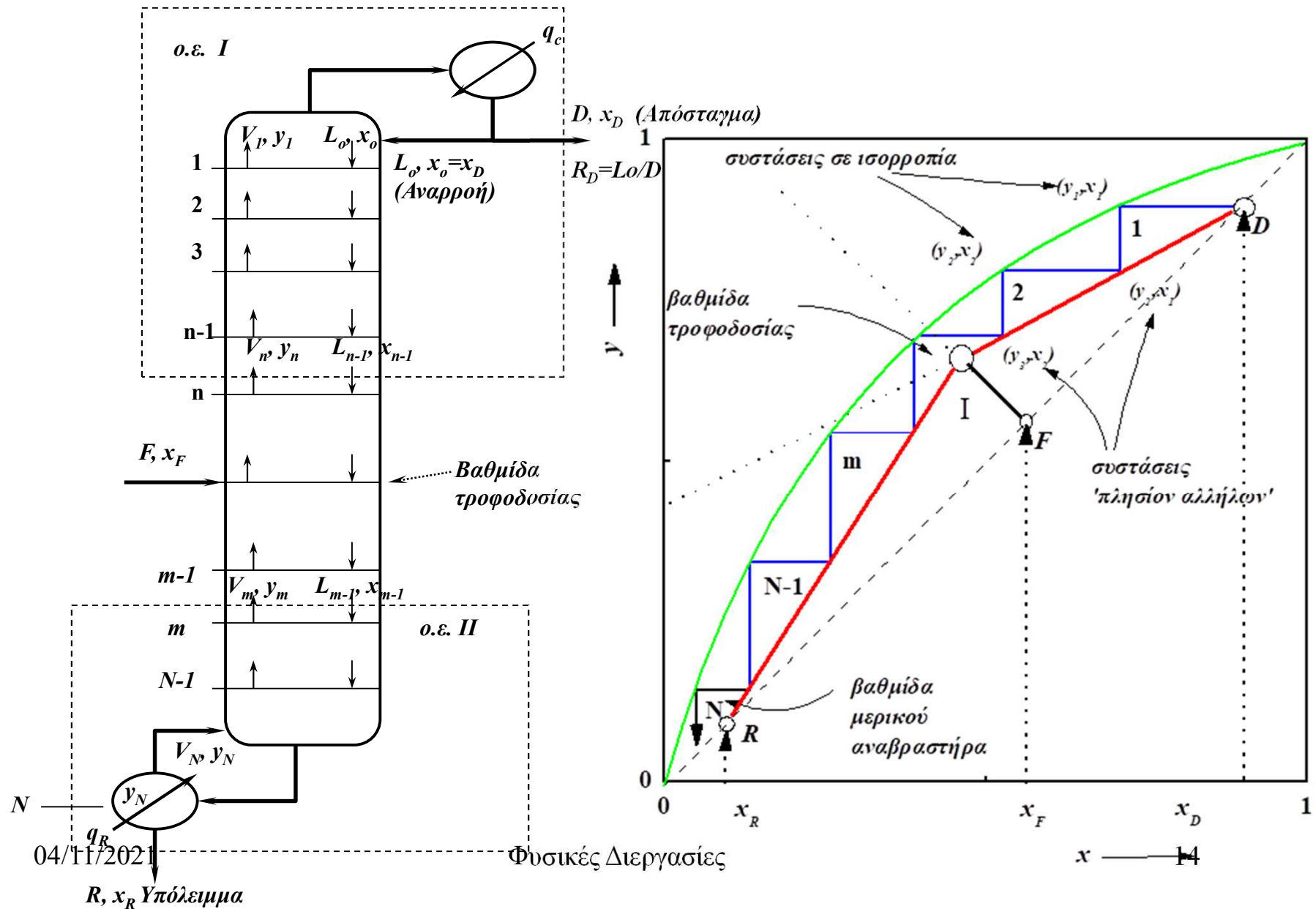
$$y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}$$

- (α) διέρχεται από το σημείο  $(x_F, x_F)$  της διαγωνίου
- (β) έχει κλίση:  $-q/(1-q)$

$$y_m = \frac{L_{m-1}}{L_{m-1} - R} x_{m-1} - \frac{R}{L_{m-1} - R} x_R$$

- (α) διέρχεται από το σημείο  $(x_R, x_R)$  της διαγωνίου
- (β) έχει κλίση:  $L_{m-1}/(L_{m-1}-R)$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Η ροή του αποστάγματος  
μηδενίζεται, η αναρροή  
μεγιστοποιείται

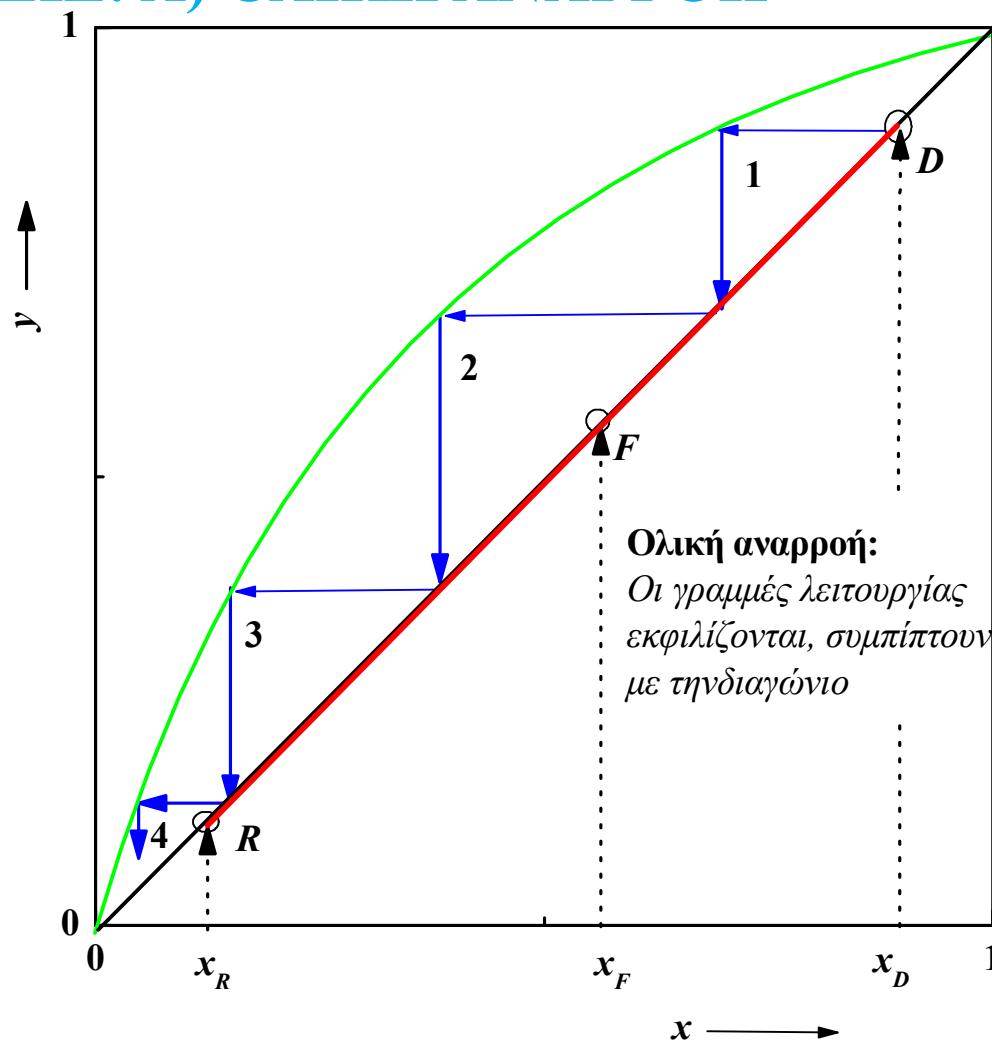
$L_o \rightarrow V_1$ ,  $L/V = 1$ ,  $D \rightarrow 0$ ,  $R_D = L_o/D$ ,  
 $R_D \rightarrow \infty$

$$\rightarrow y_n = x_{n-1}$$

ευθεία γραμμή εμπλουτισμού:

Επί της διαγωνίου, αποτέμνουσα:

$$x_D/(R_D+1) = 0$$



**Ολική αναρροή και ελάχιστος αριθμός βαθμίδων.**

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Από τον ορισμό της σχετικής πτητικότητας παίρνουμε:

$$a_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} = \frac{y_A x_B}{y_B x_A} = \frac{y_A(1-x_A)}{(1-y_A)x_A} \Rightarrow \frac{y_A}{1-y_A} = a_{AB} \frac{x_A}{1-x_A}$$

$$\frac{y_n}{1-y_n} = a_{AB} \frac{x_n}{1-x_n}, \quad \frac{x_{n-1}}{1-x_{n-1}} = a_{AB} \frac{x_n}{1-x_n} \quad y_n = x_{n-1}, \text{ Εξίσωση λειτουργίας εμπλουτισμού για ολική αναρροή}$$

$$(n=1): \frac{x_D}{1-x_D} = a_{AB} \frac{x_1}{1-x_1}$$

$$(n=2): \frac{x_1}{1-x_1} = a_{AB} \frac{x_2}{1-x_2}$$

⋮

⋮

⋮

$$(n=n): \frac{x_{n-1}}{1-x_{n-1}} = a_{AB} \frac{x_n}{1-x_n}$$

$$\xrightarrow{+} \frac{x_D}{1-x_D} = (a_{AB})^n \frac{x_n}{1-x_n} \quad (2.96)$$

$$N \equiv N_{\min} = \frac{\log[x_D(1-x_R)/x_R(1-x_D)]}{\log a_{AB}} - 1$$

$$\frac{x_D}{1-x_D} = (a_{AB})^{N+1} \frac{x_R}{1-x_R}$$

Εξίσωση Fenske- Underwood



## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Ελάχιστος αριθμός βαθμίδων,  $N_{\min}$   $\rightarrow$  Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων,  $N$

Εξίσωση Fenske ( $N_{\min}$ )  $N \equiv N_{\min} = \frac{\log[x_D(1-x_R)/x_R(1-x_D)]}{\log a_{AB}} - 1$

Εξισώσεις Underwood ( $R_{D, \min}$ )  $\frac{\alpha x_F}{a-\theta} + \frac{1-x_F}{1-\theta} = 1-q, \rightarrow$  υπολ.  $\theta$

$R_{D, \min} + 1 = \frac{\alpha x_D}{a-\theta} + \frac{1-x_D}{1-\theta} \rightarrow$  υπολ.  $R_{D, \min}$

$$\sum \frac{a_i x_{F,i}}{a_i - \varphi} = 1 - q, \rightarrow \text{υπολ. } \varphi$$

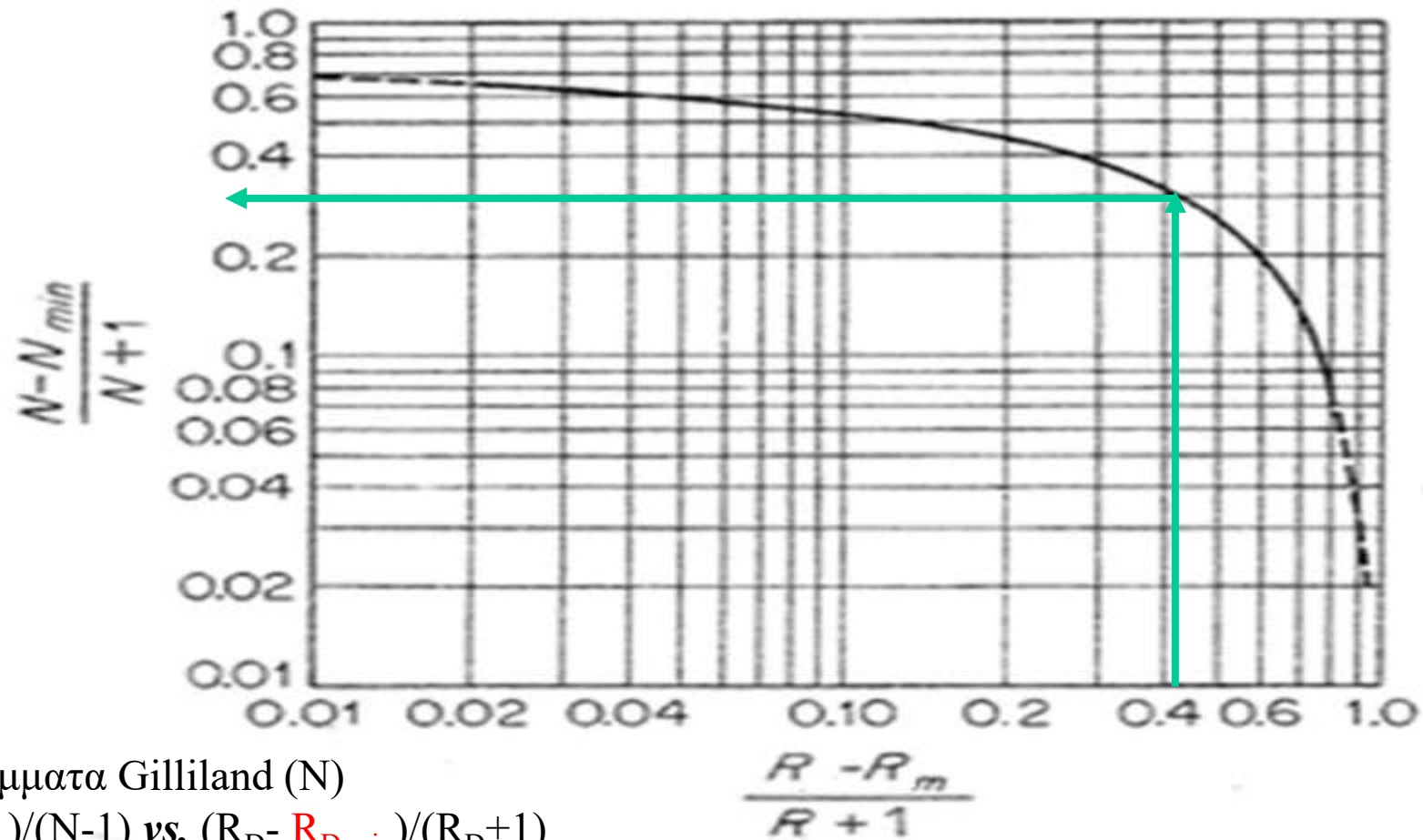
$$R_{D, \min} + 1 = \sum \frac{a_i x_{D,i}}{a_i - \varphi}, \rightarrow \text{υπολ. } R_{D, \min}$$

Διαγράμματα Gilliland ( $N$ )

$(N - N_{\min}) / (N - 1)$  vs.  $(R_D - R_{D, \min}) / (R_D + 1)$

### 3- Shortcut Methods:

b) Gilliland, Fenske , Underwood Method  
(Gilliland Chart to use instead of equation)



Διαγράμματα Gilliland (N)  
 $(N - N_{min}) / (N + 1)$  vs.  $(R_D - R_{D,min}) / (R_D + 1)$

## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, **N- Μέθοδος Smoker**

$$N_{\text{εμπλ. ή εξάντλ.}} = \frac{x'_D [1 - mc(a-1)x'_N / (a - mc^2)]}{x'_N [1 - mc(a-1)x'_D / (a - mc^2)] \log(a / mc^2)}$$

m: η κλίση της εκάστοτε γραμμής λειτουργίας (εμπλουτισμού ή εξάντλησης)

$$x'_D = x_D - \kappa$$

$$x'_N = x_N - \kappa$$

$$c = 1 + (\alpha - 1)\kappa$$

$\kappa$ : σημείο τομής της γραμμής λειτουργίας με την καμπύλη ισορροπίας, δηλ. η κοινή ρίζα (x) των εξισώσεων:

$$y = ax / [1 + (\alpha - 1)x] \text{ (ισορροπίας)}$$

$$y = mx + b \text{ (γραμμή λειτουργίας)}$$

$x_N$ : Εάν η εξίσωση Smoker εφαρμόζεται για το τμήμα εμπλουτισμού, τότε  $x_N$  είναι η τομή της γραμμής εμπλουτισμού με την q-line.

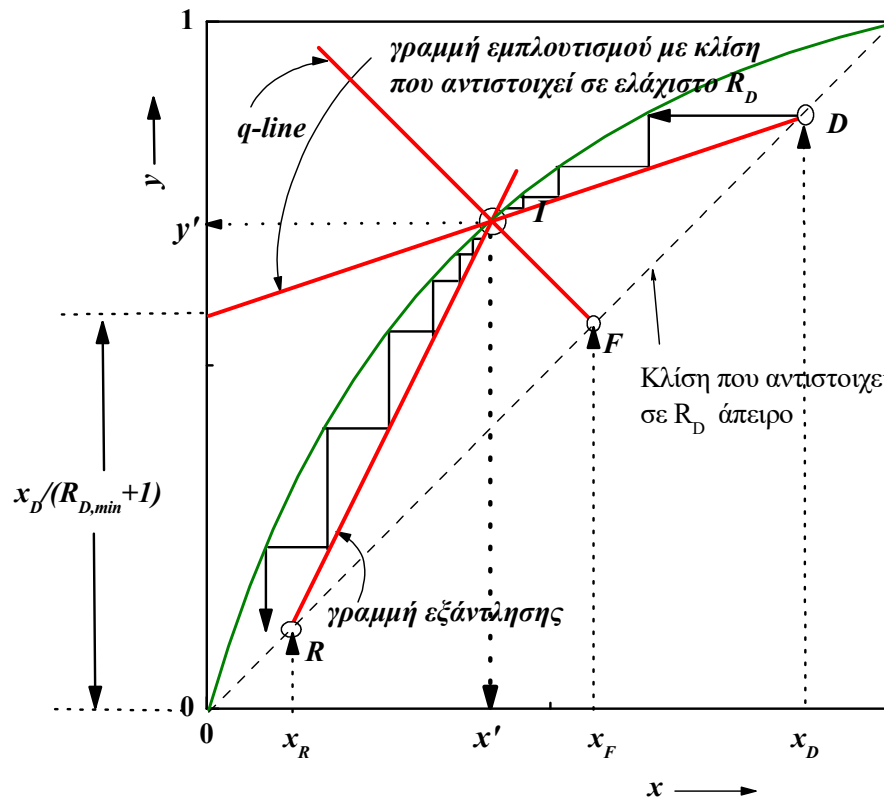
Εάν εφαρμόζεται για το τμήμα εξάντλησης τότε  $x_N = x_R$  αλλά το  $x_D$  αντιστοιχεί στο προηγουμένως αναφερθέν σημείο τομής.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Β) ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΝΑΡΡΟΗ, $R_{D,\min}$

➤ **Ελάχιστος Λόγος Αναρροής - Άπειρος Αριθμός Βαθμίδων:**

Ελαττωμένου του λόγου αναρροής  $R_D$ , ελαττώνεται η κλίση  $R_D/(1+R_D)$  της γραμμής εμπλουτισμού. Για δοθέντα διαχωρισμό, ο ελάχιστος λόγος αναρροής, αντιστοιχεί στην περίπτωση που η γραμμή εμπλουτισμού και τροφοδοσίας τέμνονται επί της καμπύλης ισορροπίας\*. Στην περίπτωση ελάχιστου λόγου αναρροής απαιτείται άπειρος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.26.



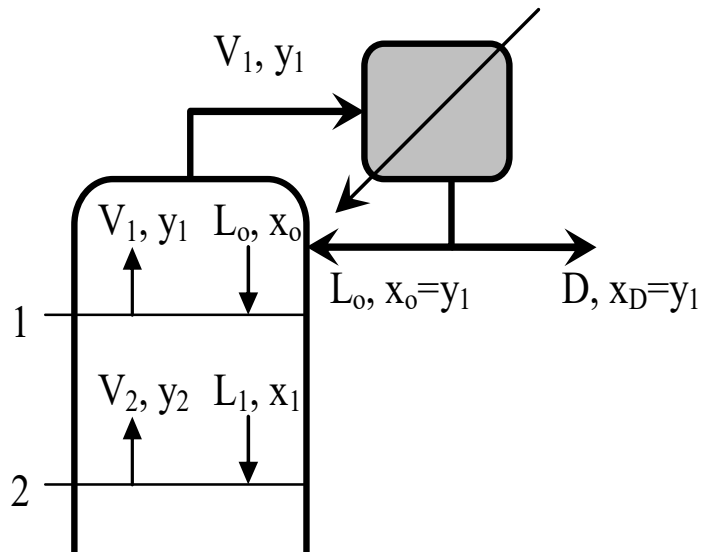
$$y_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} x_{n-1} + \frac{D}{V_n} x_D$$

$$R_{D,\min} = (x_D - y') / (y' - x')$$

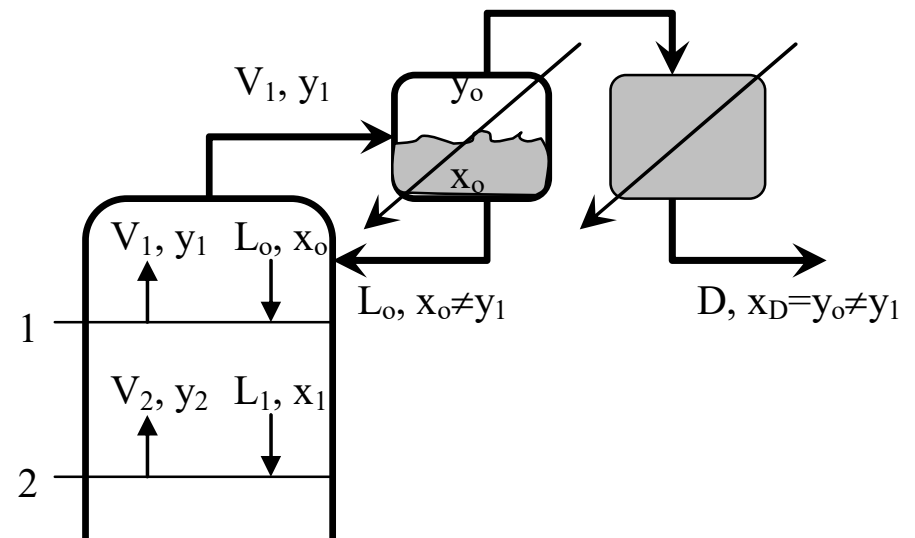
$$R_D = (1.1-1.5) R_{D,\min}$$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Μερικός και ολικός Συμπυκνωτής



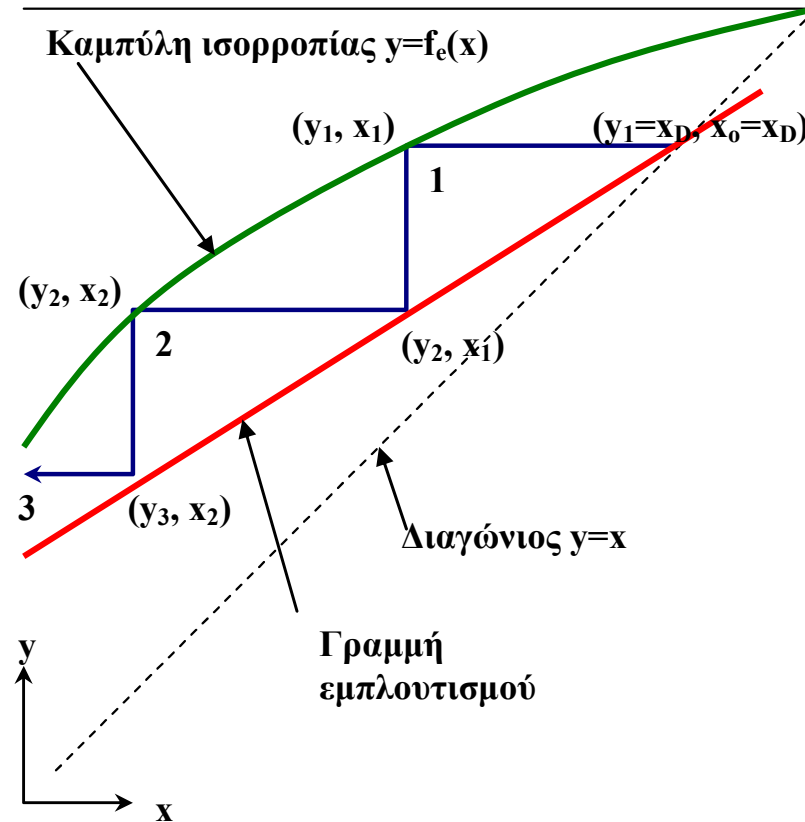
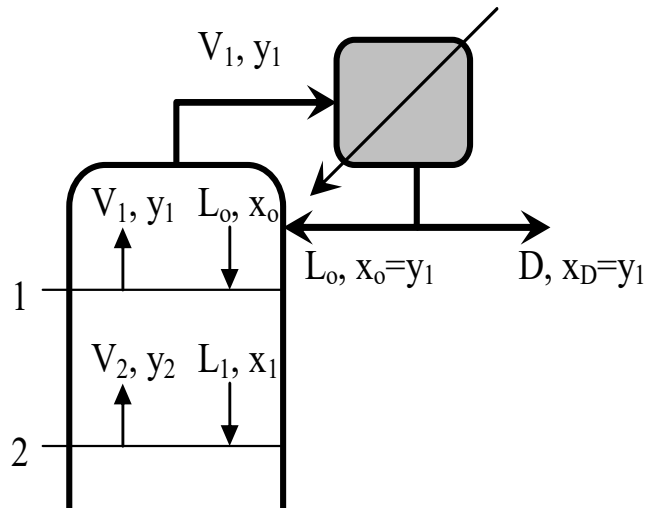
Ολικός συμπυκνωτής



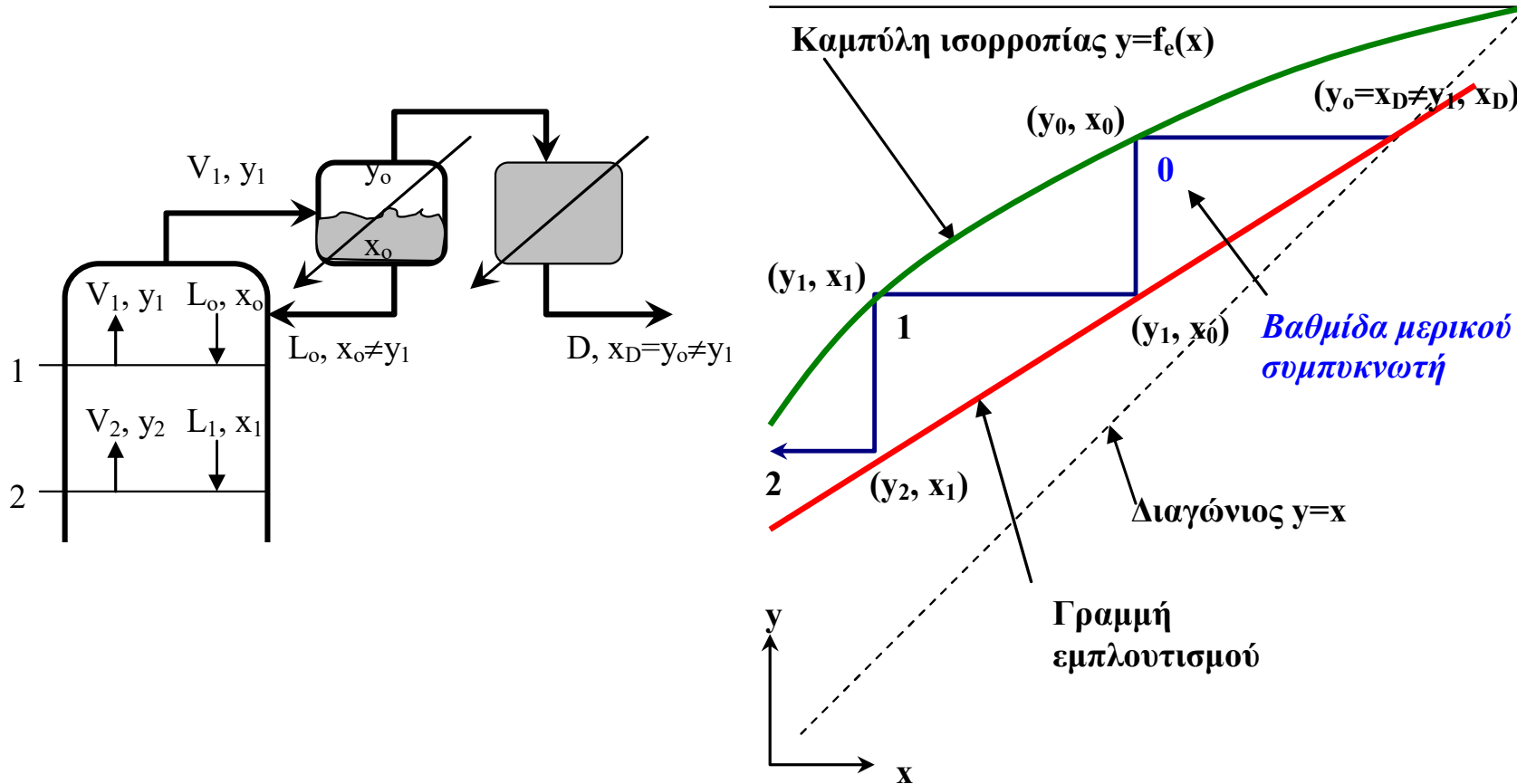
Μερικός συμπυκνωτής

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Ολικός Συμπυκνωτής

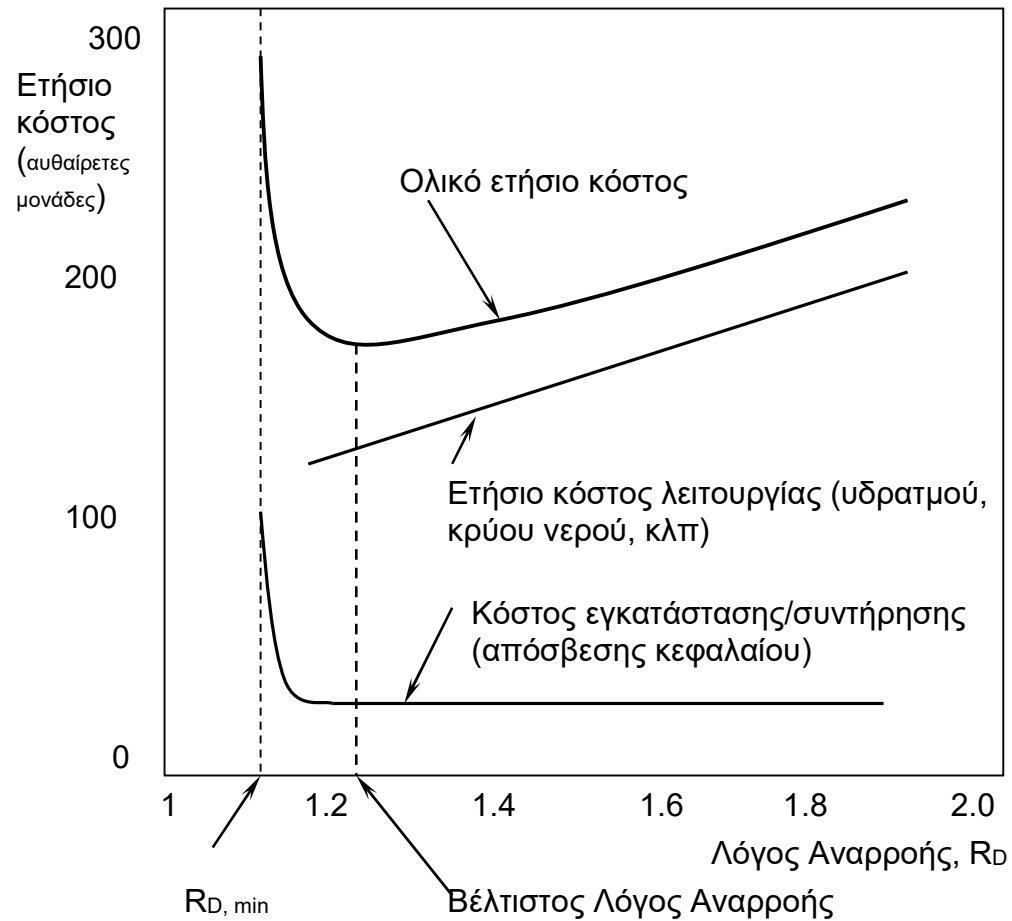


# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης Μερικός Συμπυκνωτής



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Βέλτιστος λόγος αναρροής,  $R_D = (1.1-1.5) R_{D,MIN}$   
 Θεωρητικός αριθμός βαθμίδων  $N = (1.5 \text{ μέχρι } 2) N_{min}$



04/11/2021 **Σχήμα 2.27:** Βέλτιστος λόγος αναρροής για μια τυπική αποστακτική στήλη.



# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

### Απόδοση βαθμίδας Murphree

#### Βαθμός Απόδοσης Δίσκων και Στήλης

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης στήλης ( $\eta_0$ ), ορίζεται ως:

$$\eta_0 = \frac{N}{N_T} = \frac{\text{αριθμός θεωρητικών βαθμίδων}}{\text{αριθμός πραγματικών βαθμίδων}}$$

Το  $\eta_0$  κυμαίνεται από **0.5-0.8**, χρειαζόμαστε περισσότερες βαθμίδες για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή για την καθαρότητα του αποστάγματος,  $x_D$

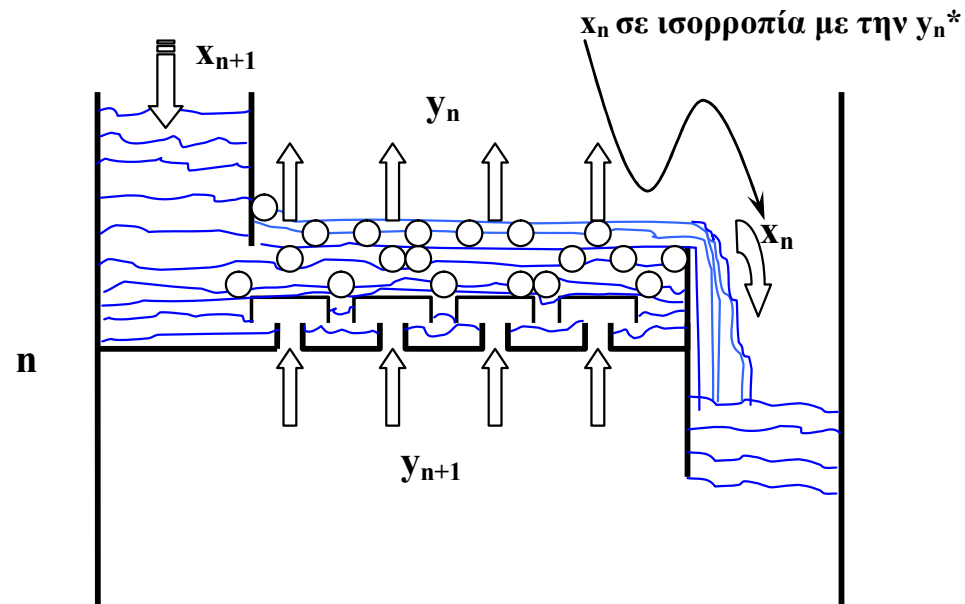
#### Βαθμός απόδοσης Murphree, $\eta_M$

Ο λόγος της μεταβολής της σύστασης των ατμών των διερχόμενων από ένα δίσκο, δια της μεταβολής που θα επερχόταν αν οι ατμοί έφθαναν σε ισορροπία με το υγρό του εξερχόμενου του δίσκου.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

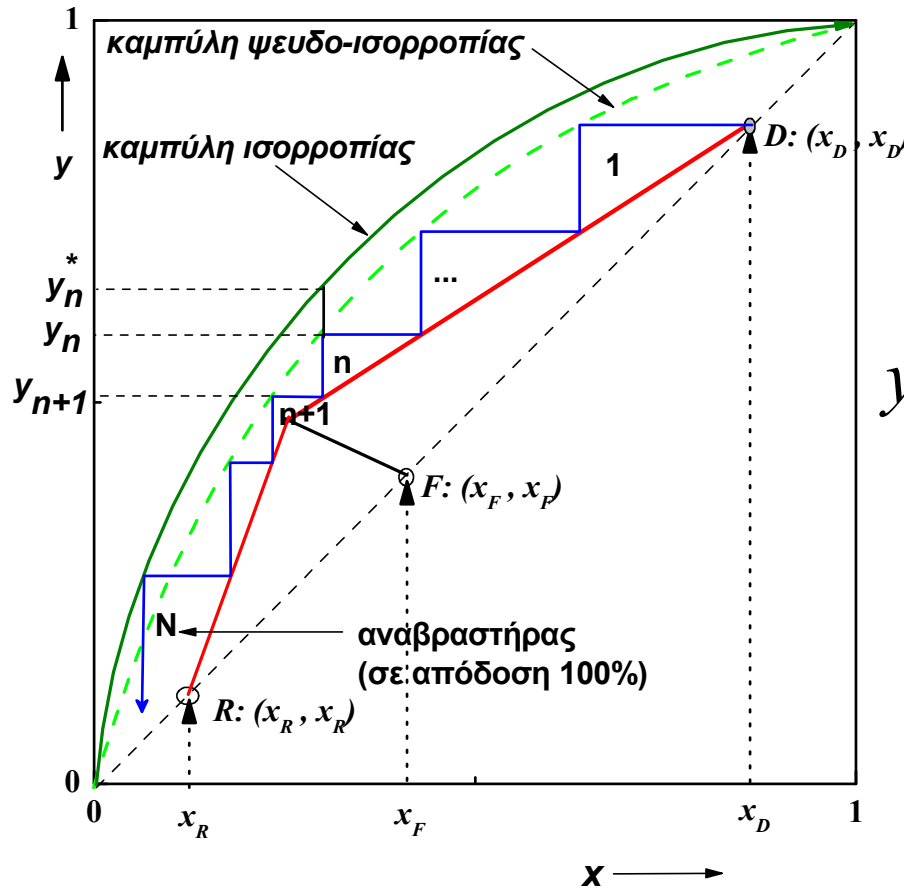
### Απόδοση βαθμίδας Murphree



$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

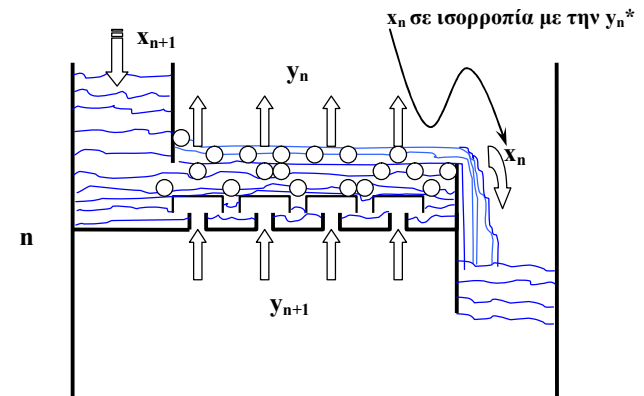
# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

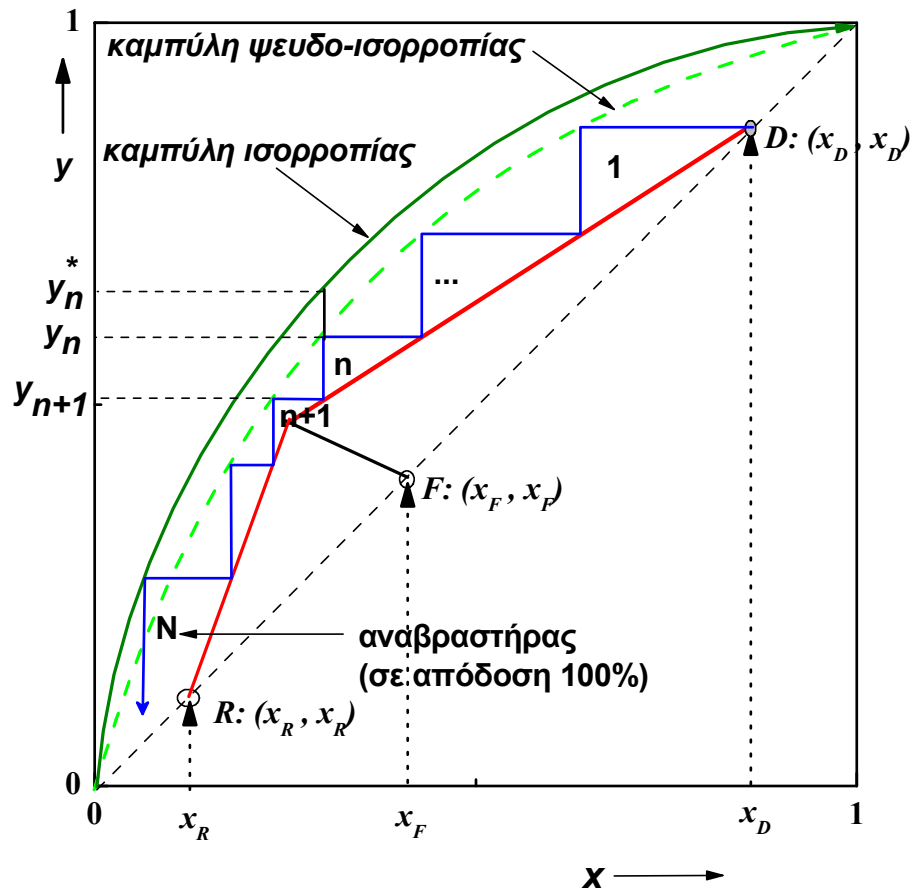
Απόδοση βαθμίδας Murphree



$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

$$y_n = \eta_M (y_n^* - y_{n+1}) + y_{n+1}$$



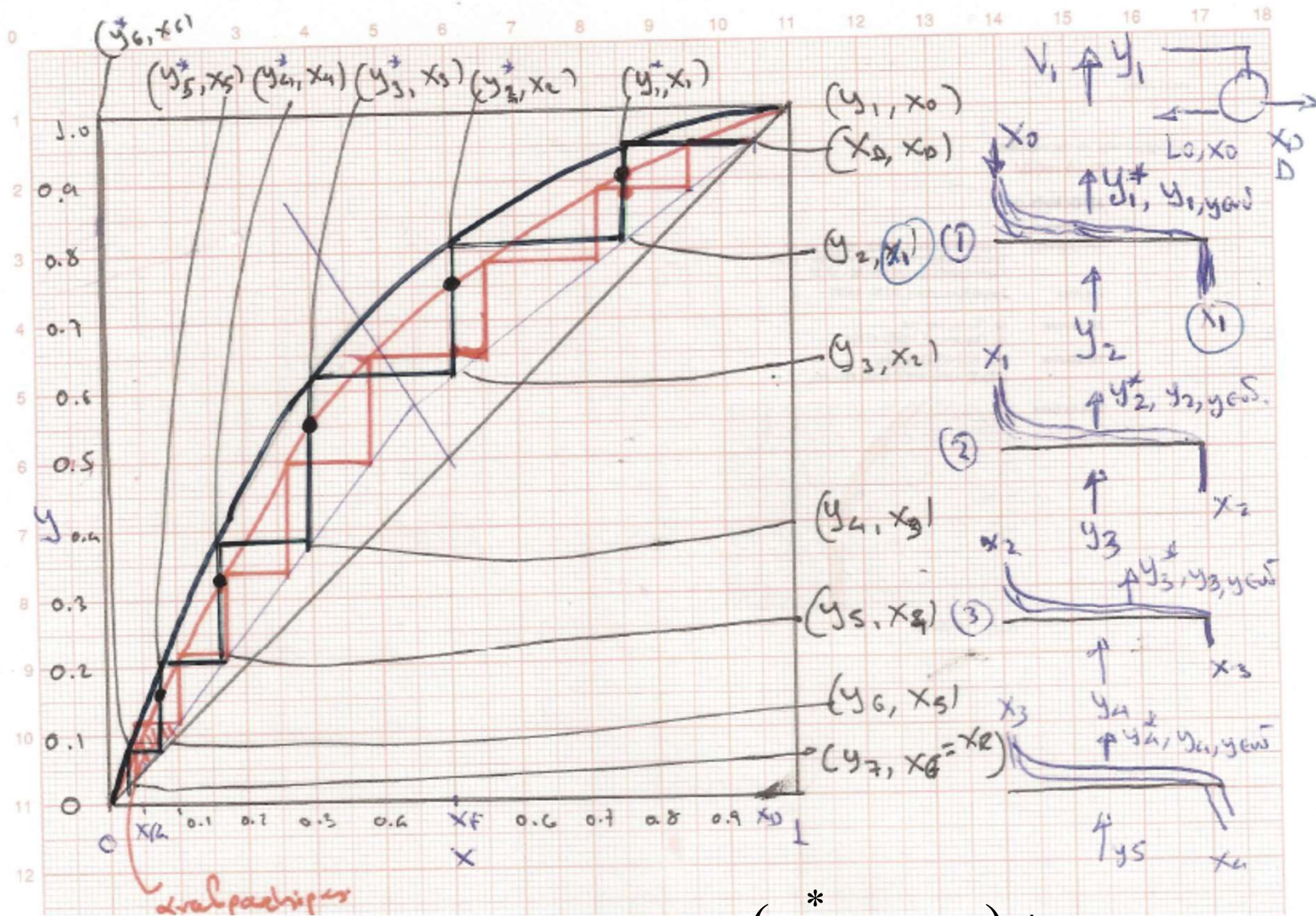


## Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

### Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

### Απόδοση βαθμίδας Murphree

$y_1^* = x_D = 0.800$	$\rightarrow y_2 = 0.77 \Rightarrow y_1(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.793$
$y_2^* = y_2 = 0.770$	$\rightarrow y_3 = 0.74 \Rightarrow y_2(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.763$
$y_3^* = y_3 = 0.740$	$\rightarrow y_4 = 0.708 \Rightarrow y_3(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.732$
$y_4^* = y_4 = 0.708$	$\rightarrow y_5 = 0.675 \Rightarrow y_4(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.700$
$y_5^* = y_5 = 0.675$	$\rightarrow y_6 = 0.638 \Rightarrow y_5(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.666$
$y_6^* = y_6 = 0.638$	$\rightarrow y_7 = 0.595 \Rightarrow y_6(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.627$
$y_7^* = y_7 = 0.595$	$\rightarrow y_8 = 0.495 \Rightarrow y_7(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.570$
$y_8^* = y_8 = 0.495$	$\rightarrow y_9 = 0.240 \Rightarrow y_8(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.431$
$y_9^* = y_9 = 0.240$	$\rightarrow y_{10} = 0.02 \Rightarrow y_9(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.185$



$$y_n = \eta_M (y_n^* - y_{n+1}) + y_{n+1}$$

Αριθμός θεωρητικών βαθμίδων,  $N = 6$  ,  $M_T = \frac{5}{8} = 75\%$   
 Βαθμός Ανοόδου: Βαθμίδων,  $M_M = \frac{y_u - y_{u+1}}{y_u^* - y_{u+1}}$   
 (Murphree)

$1^{\text{η}}$  Β,  $y_{1,yε.δ} = y_2 + M_M(y_1^* - y_2)$   $\rightarrow$   $M_M = 0.7$   $y_u = y_{u+1} + M_M(y_u^* - y_{u+1})$   
 $y_1^* = 0.95, y_2 = 0.82 \rightarrow y_{1,yε.δ} = 0.901$   
 $0.15$   $0.82$   $0.901$

$2^{\text{η}}$  Β,  $y_{2,yε.δ} = y_3 + M_M(y_2^* - y_3)$   $y_2^* = 0.82, y_3 = 0.63, y_{2,yε.δ} = 0.763$

$3^{\text{η}}$  Β,  $y_{3,yε.δ} = y_4 + M_M(y_3^* - y_4)$   $y_3^* = 0.63, y_4 = 0.39, y_{3,yε.δ} = 0.558$

$4^{\text{η}}$  Β,  $y_{4,yε.δ} = y_5 + M_M(y_4^* - y_5)$   $y_4^* = 0.39, y_5 = 0.21, y_{4,yε.δ} = 0.336$

$5^{\text{η}}$  Β,  $y_{5,yε.δ} = y_6 + M_M(y_5^* - y_6)$   $y_5^* = 0.21, y_6 = 0.09, y_{5,yε.δ} = 0.174$

$6^{\text{η}}$  Β,  $y_{6,yε.δ} = y_{7,ε} + M_M(y_6^* - y_{7,ε})$   $y_{6,yε.δ} = y_{7,ε} + y_6^* - y_{7,ε} = y_6^*$   
 $M_M = 100\%$  **8 βαθμίδες** ανάληψη

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θερμικά φορτία Αναβραστήρα και συμπυκνωτή

### Ρυθμός Παροχής θερμότητας στον αναβραστήρα

(Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κορεσμένο ατμό ως πηγή θερμότητας αντί ηλεκτρικής αντίστασης)

$$q_R = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \cdot \bar{V} \quad (\text{Watts}),$$

$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta}$  = λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης μίγματος

$$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B$$

•

$$m_{steam} = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V} / \lambda_{steam}$$

$\lambda_A$  και  $\lambda_B$  λανθάνουσες θερμοκρασίας εξάτμισης των καθαρών συστατικών Α και Β, αντίστοιχα

$\lambda_{steam}$ , λανθάνουσα θερμότητα ατμού

$\bar{V}$ , Παροχή ατμών στο τμήμα εξάντλησης,  $V_{\text{---}} \bar{V} = (1 - q)F$

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Θερμικά φορτία Αναβραστήρα και συμπυκνωτή

Ρυθμός 'απαγωγής' θερμότητας στο συμπυκνωτή

(Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κρύο νερό ως ψυκτικό υγρό)

$$q_c = -\lambda_{cond} \cdot V \quad (Watts)$$

$\lambda_{cond}$  = λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης μίγματος

$$\lambda_{cond} = x_D \lambda_A + (1 - x_D) \lambda_B$$

•

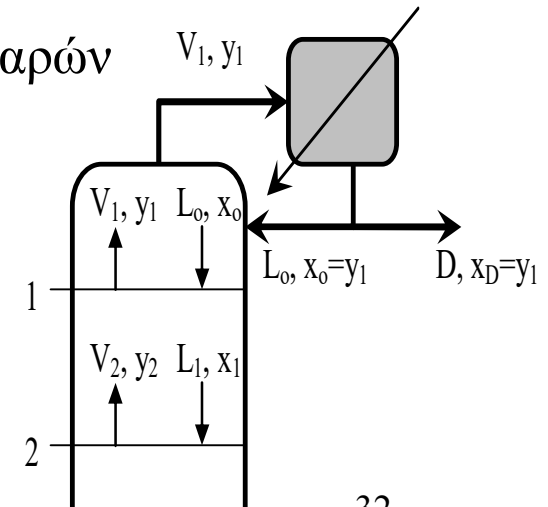
$$m_c = \lambda_{cond} V / [C_{p,V} (T_2 - T_1)]$$

$\lambda_A$  και  $\lambda_B$  λανθάνουσες θερμοκρασίας εξάτμισης των καθαρών συστατικών Α και Β, αντίστοιχα

$C_{p,V}$ , θερμοχωρητικότητα ατμών νερού

$T_2 - T_1$ , ανύψωση θερμοκρασίας κρύου νερού

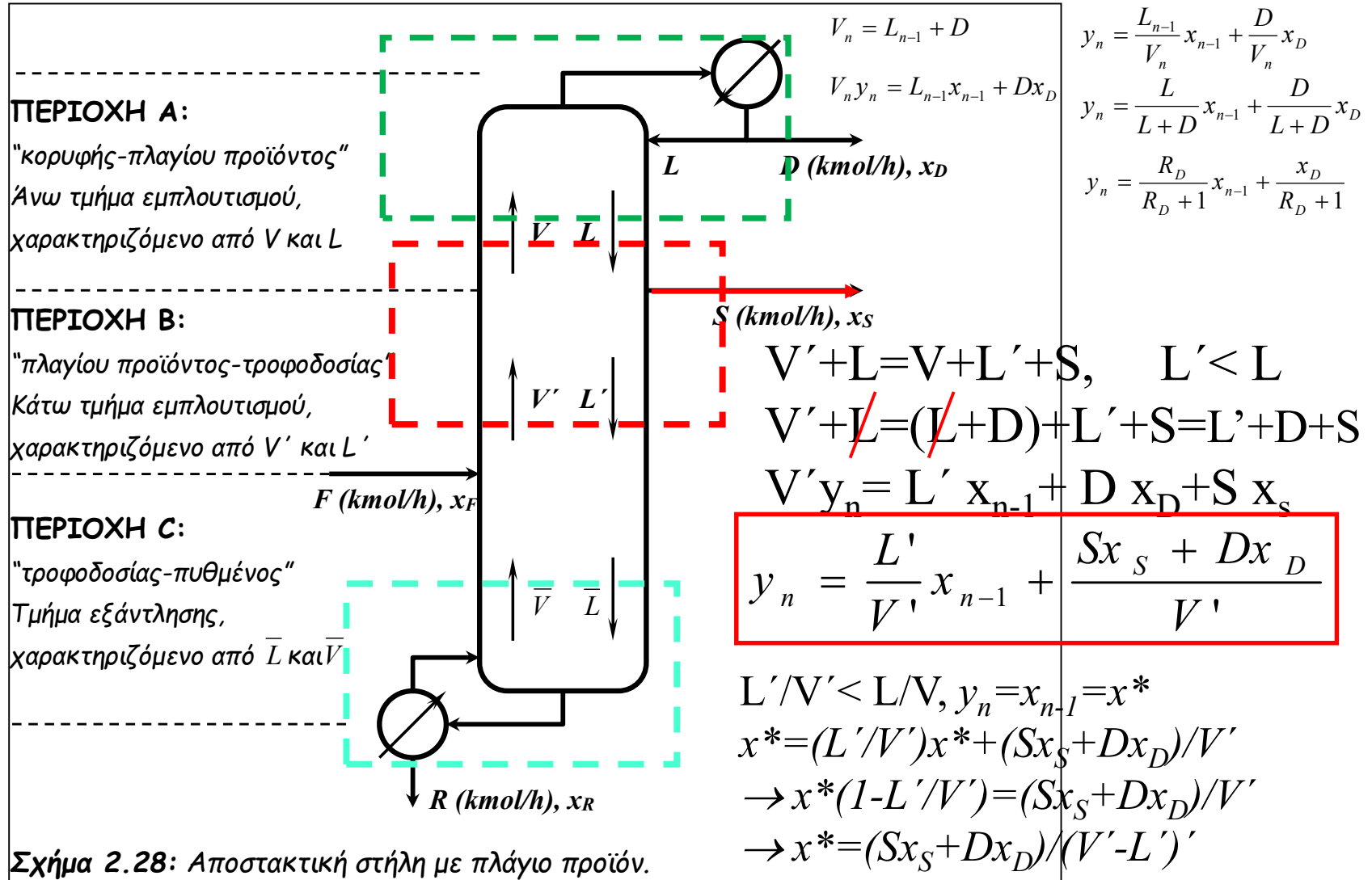
$V$ , Παροχή ατμών στο τμήμα εμπλουτισμού,  
 $V = L_o + D$ ,  $R_D = L_o / D$ ,  $V = R_D D + D = (R_D + 1) D$





# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

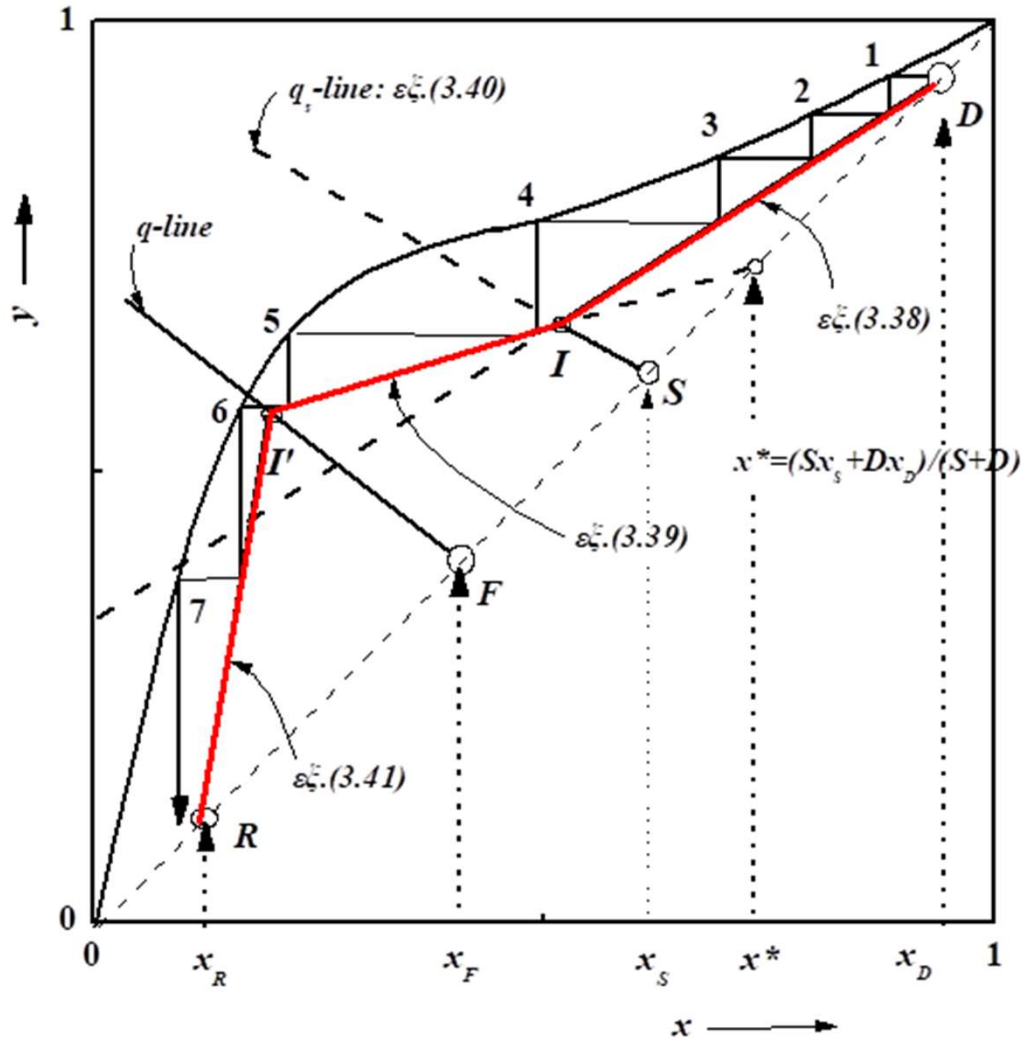
## Πλάγια Προϊόντα



Σχήμα 2.28: Αποστακτική στήλη με πλάγιο προϊόν.

# Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

## Πλάγια Προϊόντα



$$Vy = Lx + Dx_D \text{ και}$$

$$V'y = L'x + Sx_S + Dx_D$$

$$(V-V')y = (L-L')x - Sx_S$$

$$[(V-V')/S]y = [(L-L')/S]x - x_S$$

$$(L'-L)/S = -q_S,$$

$$(V'-V)/S = (1-q_S)$$

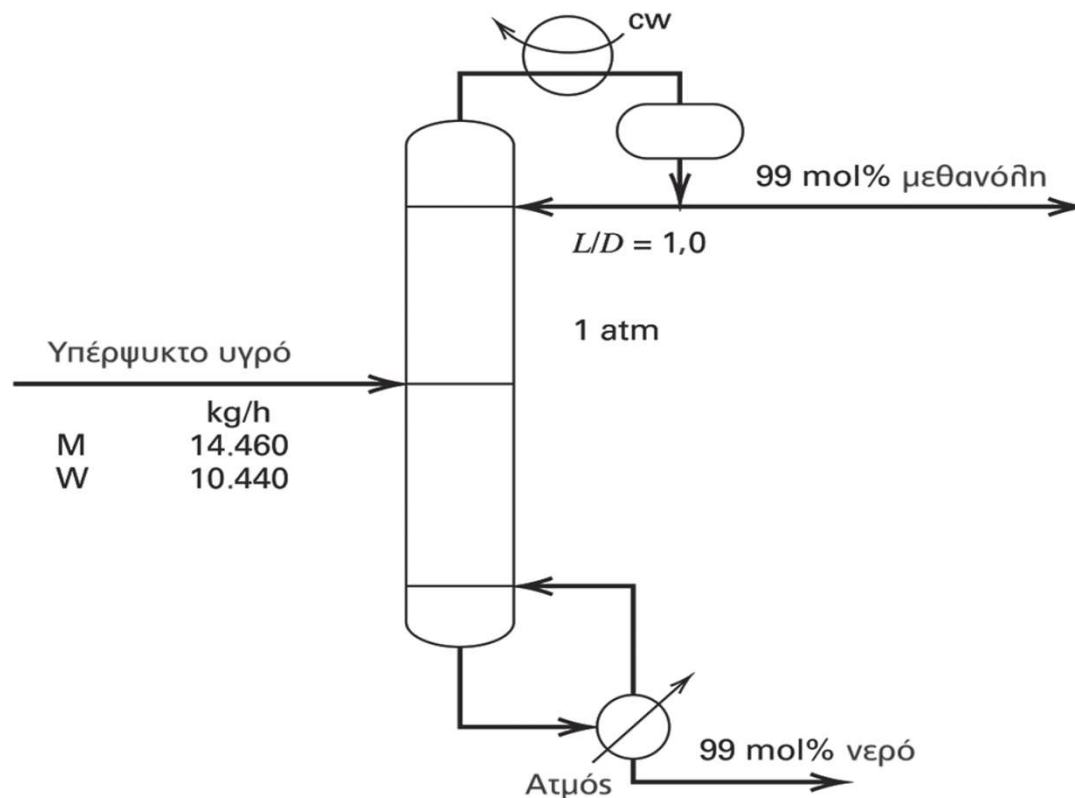
$$y = -\frac{q_S}{1-q_S}x + \frac{x_S}{1-q_S}$$

$$\text{για } x=x_S \rightarrow y=x_S$$

Διάγραμμα McCabe-Thiele για στήλη με πλάγιο προϊόν

**Απόσταξη με υπόψυκτη τροφοδοσία:** Η μεθανόλη (M) πρόκειται να διαχωριστεί από νερό (W) με απόσταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η τροφοδοσία είναι υπόψυκτη  $q= 1.12$ . Προσδιορίστε α) την παροχή του αποστάγματος και του υπολείμματος, β) τον ελάχιστο αριθμό βαθμίδων γραφικά και από την αναλυτική εξίσωση Fenske βρείτε το  $\alpha_{mw}$  γ) το  $R_{D,min}$  δ) τις γραμμές λειτουργίας, ε) τη θέση της βαθμίδας ισορροπία και τον αριθμό των απαιτούμενων βαθμίδων ισορροπίας και στ) τα ποσά ενέργειας που πρέπει να δαπανηθούν στον αναβραστήρα και στον συμπυκνωτή.

Δίνονται δεδομένα ισορροπίας ατμού-υγρού. Μετατρέψτε πρώτα τα kg σε kgmoles για την Μεθανόλη (M, CH<sub>3</sub>OH) και το Νερό (W, H<sub>2</sub>O) και υπολογίστε το  $x_F$  ( $\lambda_{methanol}= 1160$  kJ/kg,  $\lambda_{water}= 2265.705$  kJ/kg)



## Απόσταξη με υπόψυκτη τροφοδοσία

Δεδομένα Ισορροπίας:

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,9	1
y	0	0,42	0,58	0,67	0,73	0,781	0,825	0,845	0,871	0,895	0,915	0,96	1

$$q=1,12$$

Παροχή μεθανόλης, 14460 kg/h

Παροχή νερού, 10440 kg/h

$$x_D=0,99$$

$$x_R=0,01$$

$$R_D = L/D = 1,0$$

a)  $x_F, x_D, x_R, F, D, R$  (kmole/h)

b)  $N_{min}, \alpha_{mw}$

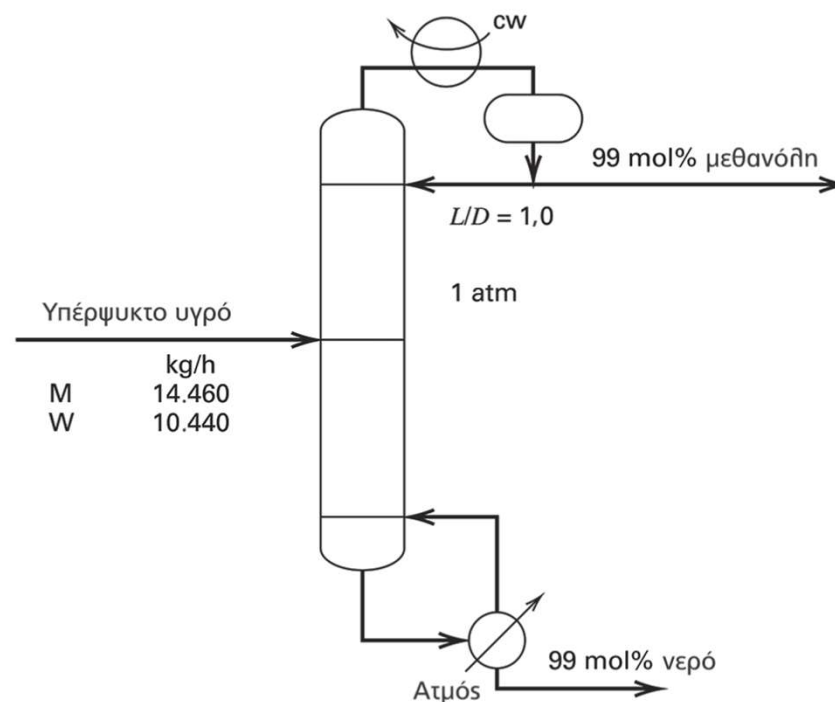
c)  $R_{D,min}$

d) τις γραμμές λειτουργίας

e)  $N, N_{εισ}$

f)  $q_R, q_C$

04/11/2021



## Απόσταξη με υπόψυκτη τροφοδοσία

a)  $x_F$ ,  $x_D$ ,  $x_R$ ,  $F$ ,  $D$ ,  $R$  (kmole/h)

**Από τα δεδομένα: MB methanol=32, MB water=18**

$M \text{ CH}_3\text{OH} = 14460 \text{ kg/h} = 14460/32 = 451,875 \text{ kgmole/hr}$

$M \text{ H}_2\text{O} = 10440 \text{ kg/h} = 10440/18 = 580 \text{ kgmole/hr}$

**$F = 451.8675 + 580 = 1031,88 \text{ kgmole/hr}$ ,**

**$x_{F,m} = 451,875 / (451,875 + 580) = 0,438$ ,**

**$x_{F,w} = 1 - 0,438 = 0,562$ ,  $x_D = 0,99$ ,  $x_R = 0,01$**

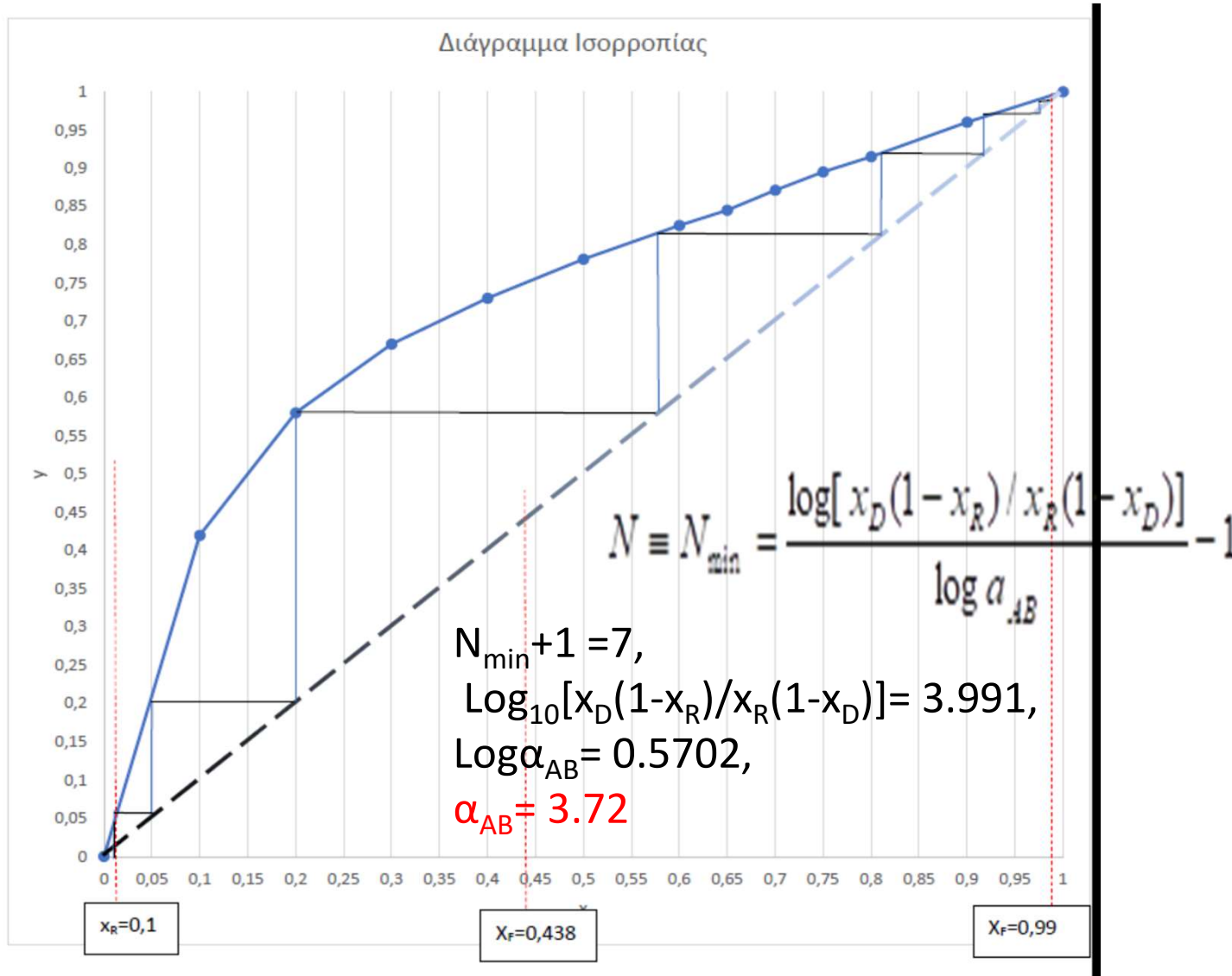
Από το ολικό ισοζύγιο και το ισοζύγιο για το πτητικό

$$R = F \frac{(x_D - x_F)}{(x_D - x_R)} \quad \mathbf{R = 581,307 \text{ kgmole/hr,}}$$
$$\mathbf{R_A = x_R R = 0,01 * 581,3 = 5,81 \text{ kmole/hr, } R_B = 575,19}$$

$$D = F \frac{(x_F - x_R)}{(x_D - x_R)} \quad \mathbf{D = 450,467 \text{ kgmole/hr,}}$$
$$\mathbf{D_A = x_D D = 0,99 * 450,47 = 445,9 \text{ kmole/hr, } D_B = 4,5 \text{ kmole/hr}}$$

## Απόσταση με υπόψυκτη τροφοδοσία

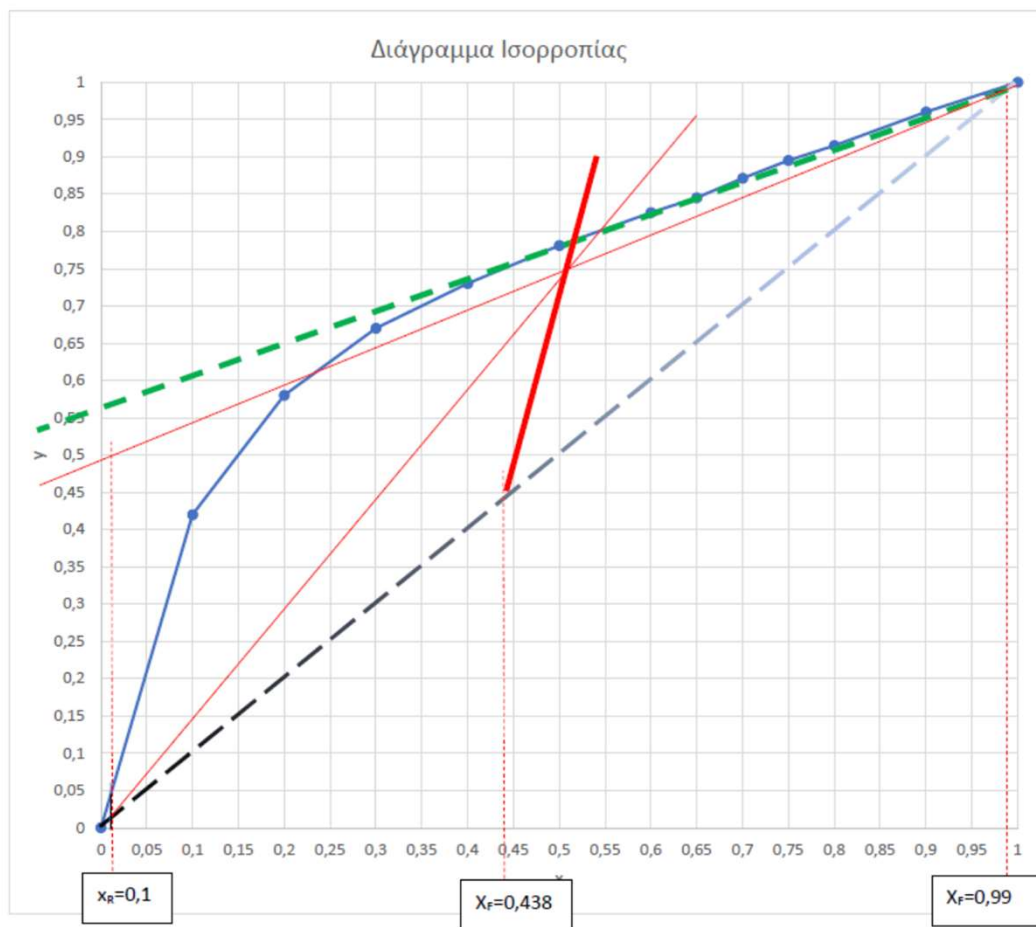
β)  $N_{\min}$ ,  $\alpha_{\text{mw}}$ , Ολική Αναρροή, γραμμές λειτουργίας επί της διαγωνίου  
 Από διάγραμμα  $\rightarrow$   **$N_{\min}=6 + 1$  αναβραστήρας**



## Απόσταση με υπόψυκτη τροφοδοσία

γ) Προσδιορισμός  $R_{D,\min}$  γραφικά, Τομή καμπύλης ισορροπίας με γραμμή τροφοδοσίας

$R_D = L_o/D \rightarrow L \rightarrow 0$ , κλίση Γραμμής εμπλουτισμού  $\rightarrow 0$



$$y_n = \frac{R_D}{R_D + 1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

Υπολογισμός γραμμής τροφοδοσίας

$$y = -\frac{q}{1-q} x + \frac{x_F}{1-q}$$

$$q = 1.12$$

Προσδιορισμός γραμμής τροφοδοσίας

$$y = 9,33 x - 3,65$$

$$x_D / (R_{D,\min} + 1) = 0,565,$$

$$\text{οπότε } R_{D,\min} = (x_D / 0,565) - 1$$

$$\text{και } R_{D,\min} = 0,752$$

## Απόσταση με υπόψυκτη τροφοδοσία

δ) τις γραμμές λειτουργίας

Υπολογισμός γραμμής **τροφοδοσίας**

$$y = -\frac{q}{1-q}x + \frac{x_F}{1-q}$$

$$y = 9,33x - 3,65$$

Υπολογισμός γραμμής λειτουργίας στο Τμήμα **Εμπλουτισμού**

$$y_n = \frac{R_D}{R_D + 1}x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D + 1} \quad R_D = 1,0$$

Προσδιορισμός γραμμής **τροφοδοσίας**  $y = [1/(1+1)]x + 0,99/[1+1]$

$$y = 0,5x + 0,495$$

Υπολογισμός γραμμής λειτουργίας στο Τμήμα **Εξάντλησης**

$$y_m = (L_{m-1}/V_m)x_{m-1} - (R/V_m)x_R$$

$$y_m = \frac{\bar{L}}{\bar{L} - R}x_{m-1} - \frac{R}{\bar{L} - R}x_R$$

$R = 581,307 \text{ kgmole/hr}$ ,  $R_D = L/D = 1$ ,  $L = D = 450,467 \text{ kgmole/hr}$ ,  $F = 1031,88 \text{ kgmole/hr}$

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F}, \bar{L} = L + qF = 450,467 + 1,12 * 1031,88 = 1606,17 \text{ kmole/hr}$$

$$\frac{\bar{L}}{\bar{L} - R} = \frac{1606,17}{1606,17 - 581,307} = 1,567, \quad \frac{R}{\bar{L} - R} = \frac{581,307}{1606,17 - 581,307} = 0,567$$

$$y = 1,567x + 0,567$$



# Απόσταση με υπόψυκτη τροφοδοσία

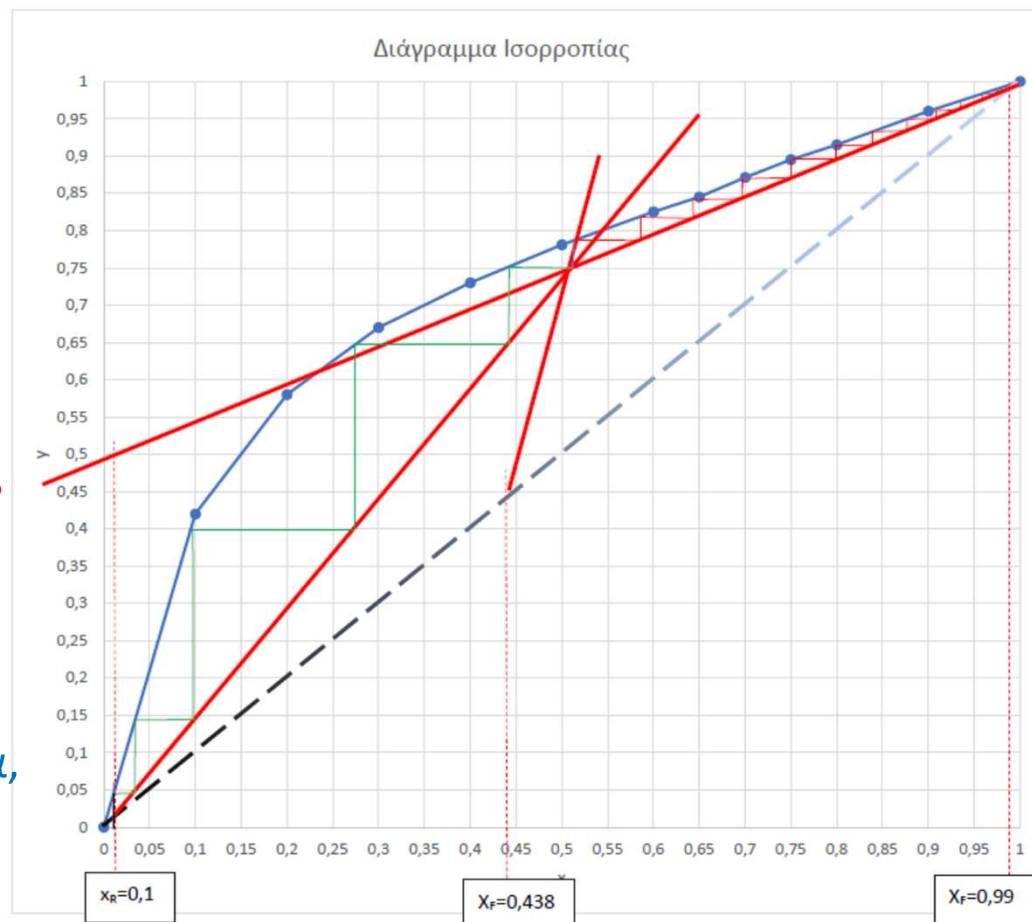
Γραμμή τροφοδοσίας,  $y = 9.33x - 3.65$

Εμπλουτισμού,  $y = 0.5x + 0.495$

Εξάντλησης,  $y = 1.567x + 0.567$

- Θέτουμε τα  $x_F$ ,  $x_D$ ,  $x_R$  στο διάγραμμα.
- Φέρουμε την γραμμή τροφοδοσίας που περνάει από το  $(x_F, x_F)$   $(0,438, 0,438)$  και κλίση  $+9,33$
- Η στήλη λειτουργεί με  $R_D = 1$  ( $=L/D$ ).
- Η κανονική γραμμή λειτουργίας περνάει από το σημείο  $(x_D, x_D)$  και έχει αποτέμνουσα  $x_D / (R_D + 1) = 0,99 / (1 + 1) = 0,495$
- Η γραμμή εξάντλησης περνάει από το σημείο  $(x_R, x_R)$   $(0,01, 0,01)$  και οφείλει να συναντήσει τις άλλες δύο γραμμές στο σημείο τομής τους
- Εφαρμόζουμε τη μέθοδο McCabe-Thiele

$N_{\text{εμπλ}} = 13$ ,  $N_{\text{εξαντλ}} = 4$ ,  $+1$  αναβραστήρα,  
Θέση  $N = 14$



## Απόσταξη με υπόψυκτη τροφοδοσία

### Θερμικά φορτία

$$\lambda_{\text{water}} = 2265.705 \text{ kJ/kg} = 125,8755 \text{ kJ/kgmole} = \lambda_B, \lambda_{\text{methanol}} = 1160 \text{ kJ/kg} = 36.25 \text{ kJ/kgmole} = \lambda_A$$

### Θερμικό φορτίο Αναβραστήρα

$$q_R = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \cdot \bar{V} \quad (\text{Watts}),$$

$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta}$  = λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης μίγματος

$$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B$$

$$\dot{m}_{\text{steam}} = \lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \bar{V} / \lambda_{\text{steam}}$$

$$\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} = x_R \lambda_A + (1 - x_R) \lambda_B = 0.01 * 36.25 + 0.99 * 125.88 = 124.976 \text{ kJ/kmole}$$

$$1 - q = \frac{V - \bar{V}}{F}$$

$$V_{\text{εξαντλ}} = V_{\text{εμπλουτ}} - (1 - q)F = 900.934 * -(1 - 1.12) 1031.874 = 1024.758 \text{ kgmole/hr}$$

$$q_R = -\lambda_{\alpha\nu\alpha\beta} \cdot V_{\text{εξαντλ}} = 124.976 * 1024.758 = 128070.26 \text{ kJ/hr} = 35.575 \text{ kWatt}$$

## Απόσταξη με υπόψυκτη τροφοδοσία

### Θερμικά φορτία

$$\lambda_{\text{water}} = 2265.705 \text{ kJ/kg} = 125,8755 \text{ kJ/kgmole}, \lambda_{\text{methanol}} = 1160 \text{ kJ/kg} = 36.25 \text{ kJ/kgmole}$$

### Θερμικό φορτίο Συμπυκνωτή

$$q_c = -\lambda_{\text{cond}} \cdot V \quad (\text{Watts})$$

$\lambda_{\text{cond}}$  = λ ανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης μίγματος

$$\lambda_{\text{cond}} = x_D \lambda_A + (1 - x_D) \lambda_B$$

$$\dot{m}_c = \lambda_{\text{cond}} V / [C_{p,V} (T_2 - T_1)]$$

$$\lambda_{\text{συμπ}} = \lambda_A x_D + \lambda_B (1 - x_D) = 36.25 * 0.99 + 125.875 * 0.01 = 37.146 \text{ kJ/kmole}$$

$$V_{\text{εμπλουτ}} = L + D = 2D = 2 * 450.467 = 900.934 \text{ kmole/hr} \quad (\text{γνωρίζουμε ότι } L/D=1)$$

$$q_c = -\lambda_{\text{συμπ}} V_{\text{εμπλουτ}} = -37.146 * 900.934 = 33466.32 \text{ KJ/hr} = -9.29 \text{ kWatt}$$