

Φυσικές Διεργασίες Ι

Κλασματική Απόσταξη



ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

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

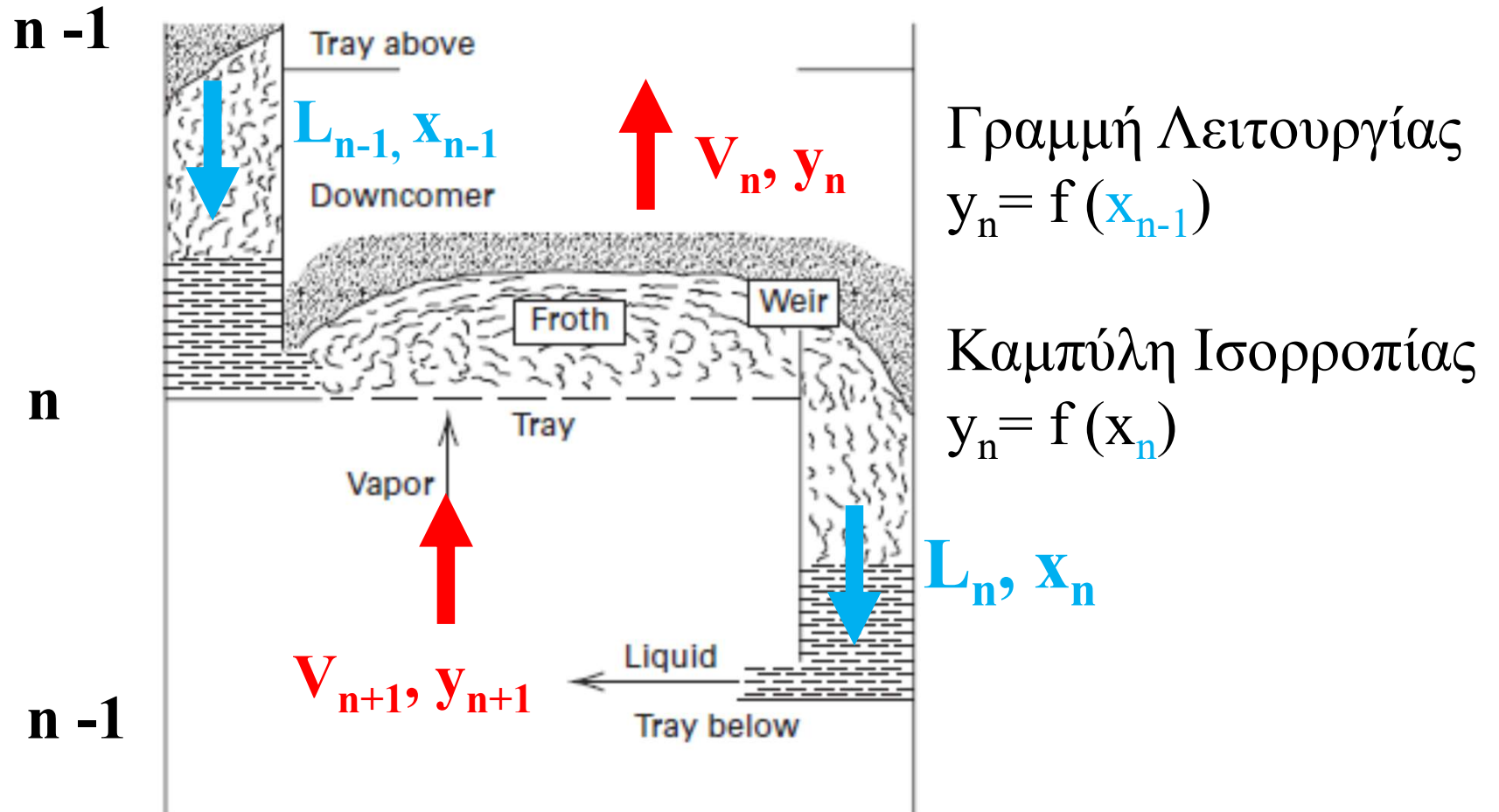


Figure 5.8 Typical vapor-liquid contacting tray.

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Ολικό Ισοζύγιο μάζας (υλικών)

$$F = D + R$$

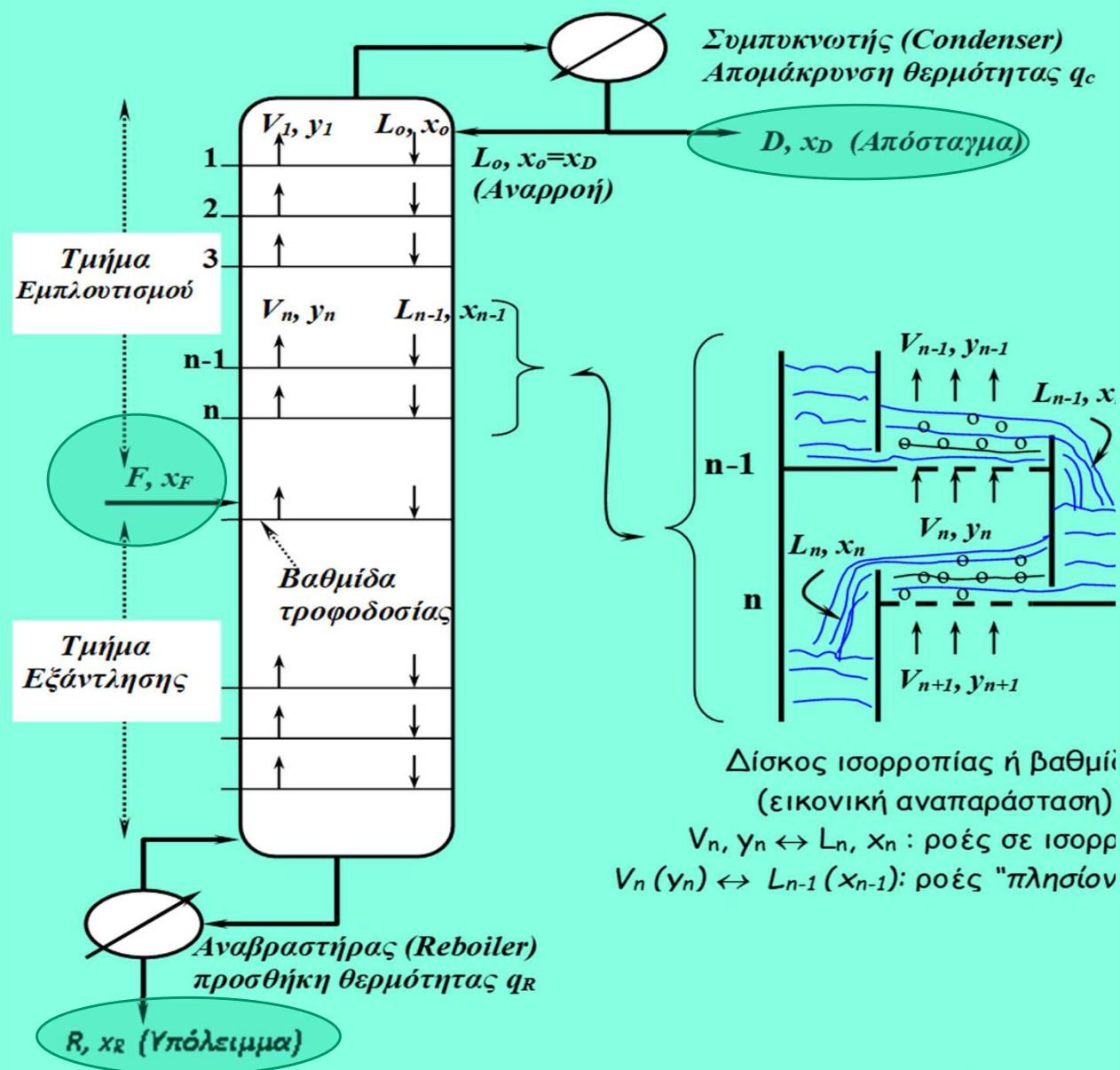
Παροχή Τροφοδοσίας =
παροχή αποστάγματος +
παροχή υπολείμματος

Ισοζύγιο Πτητικού (Α)

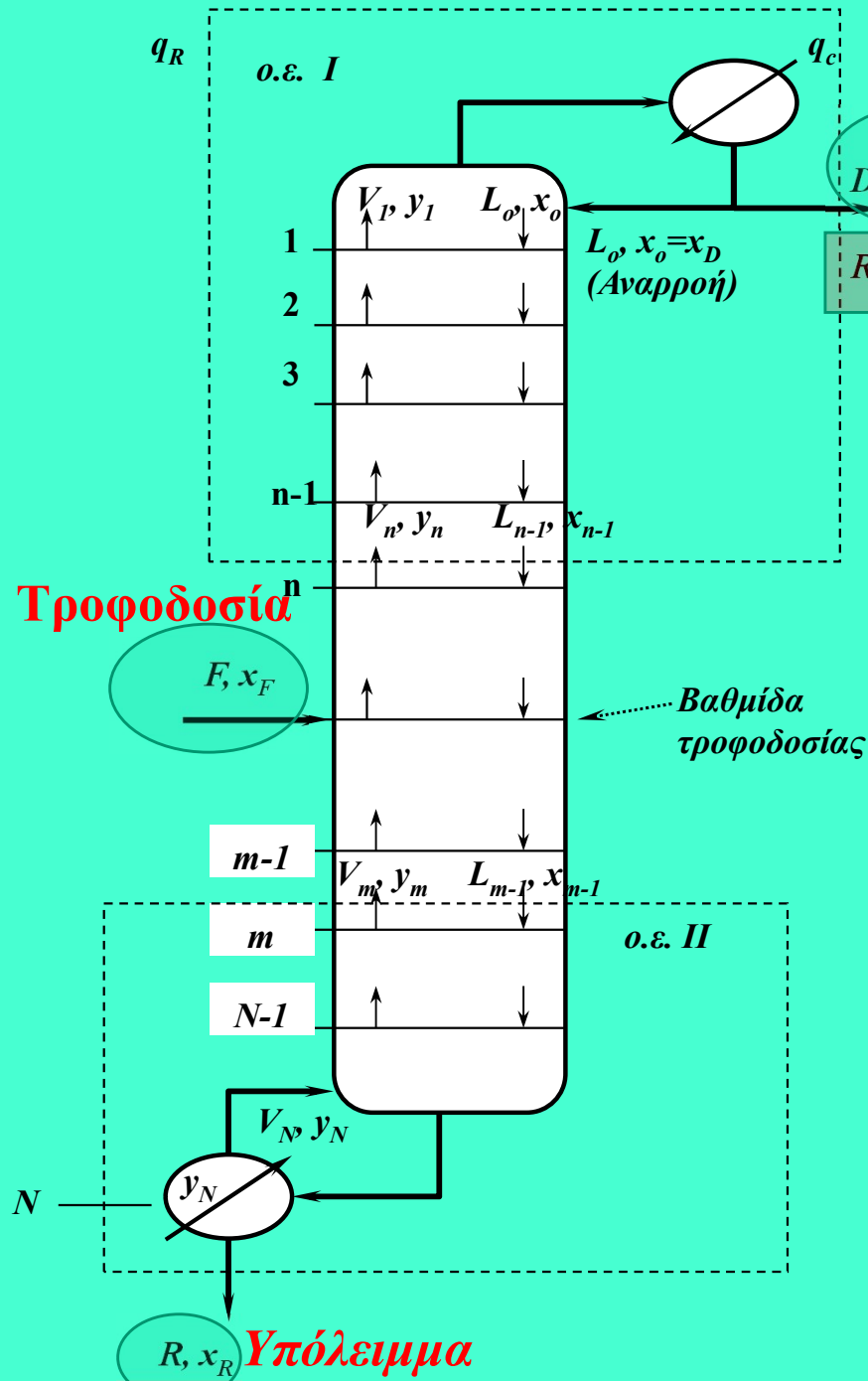
$$F x_F = D x_D + R x_R$$

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

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



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:

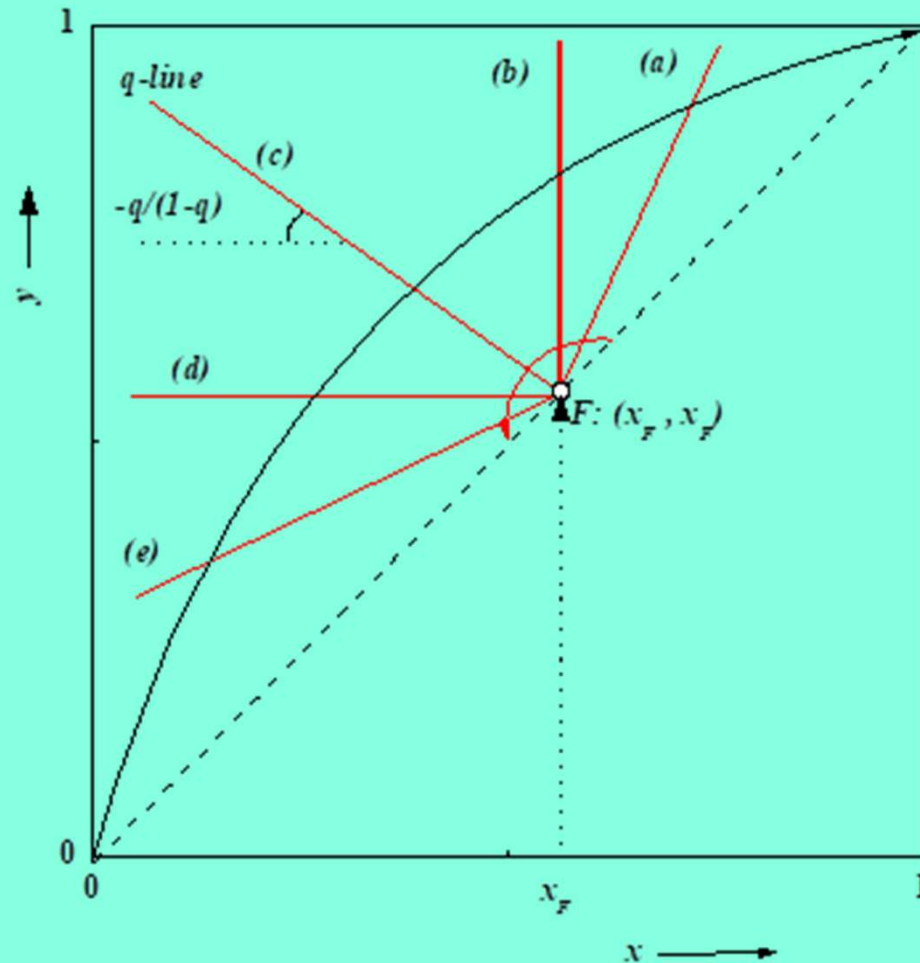
$$y_m = \frac{\bar{L}}{\bar{L}-R} x_{m-1} - \frac{R}{\bar{L}-R} x_R$$

• Γραμμή τροφοδοσίας ή \$q\$-line:

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

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Ανάλυση Τμήματος Τροφοδοσίας



•Γραμμή τροφοδοσίας ή *q-line*:

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

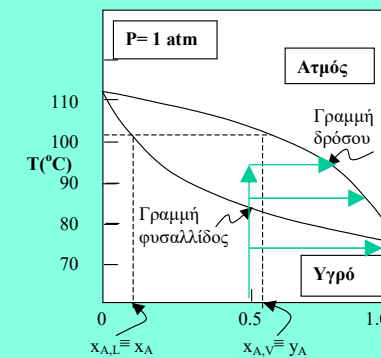
(a): $q > 1$, υπόψυκτο υγρό

(b): $q = 1$, κορεσμένο υγρό

(c): $0 < q < 1$, υγρό+ατμός

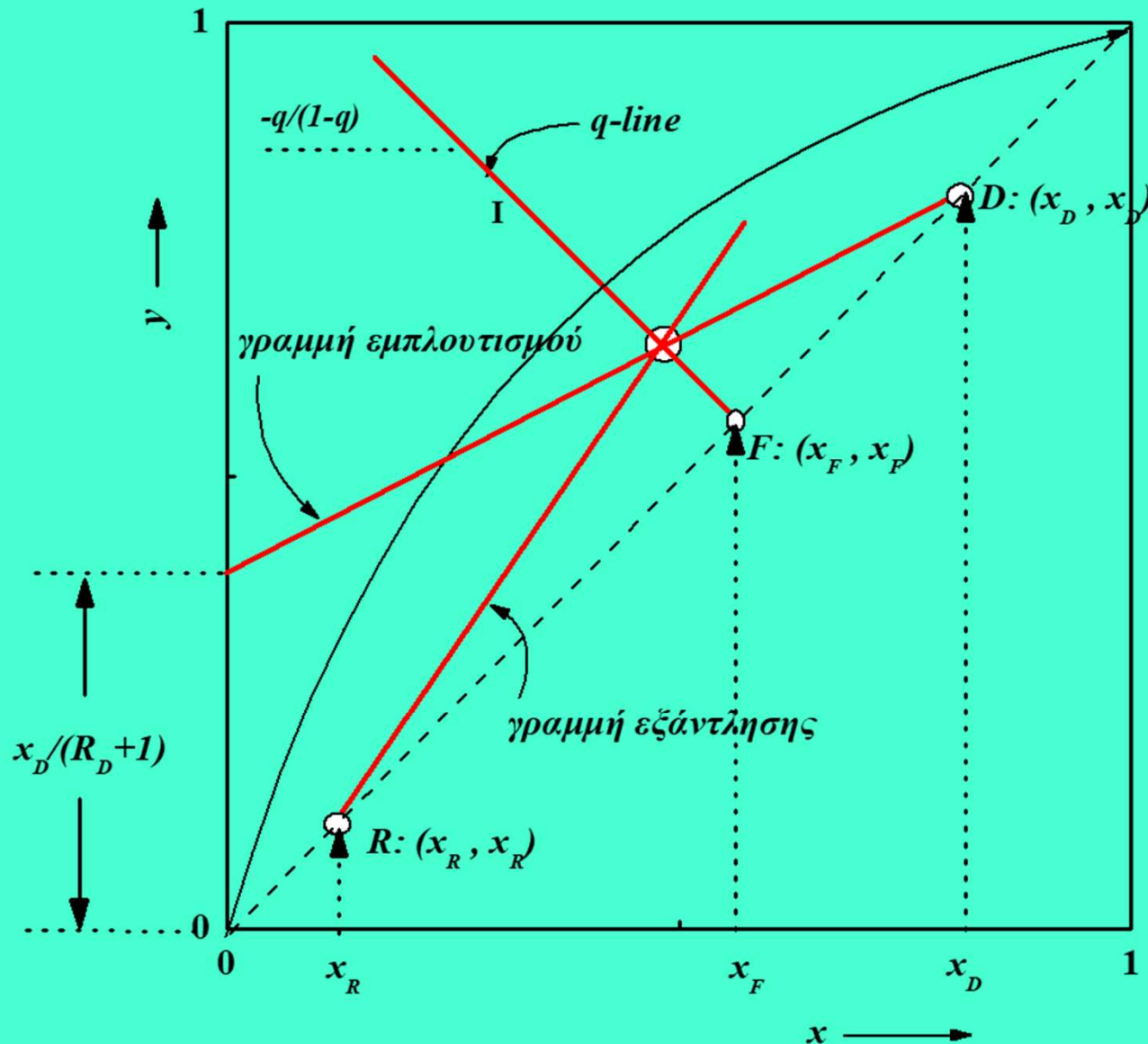
(d): $q = 0$, κορεσμένος ατμός

(e): $q < 0$, υπέρθερμος ατμός



Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Ανάλυση Τμήματος Τροφοδοσίας



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

(α) διέρχεται από το σημείο (x_F, x_F) της διαγωνίου

(β) έχει κλίση: $-q/(1-q)$

Γραμμές λειτουργίας

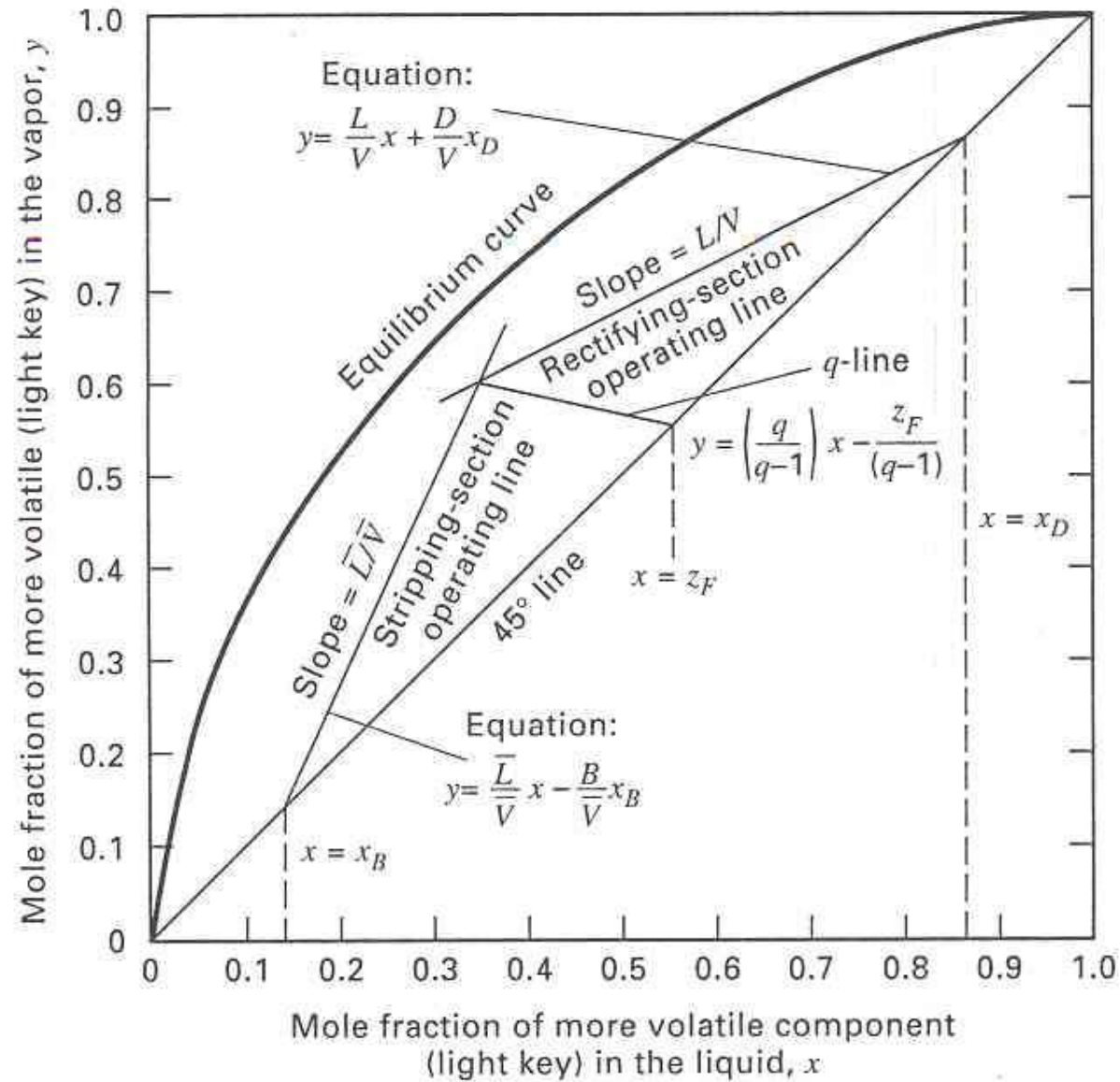
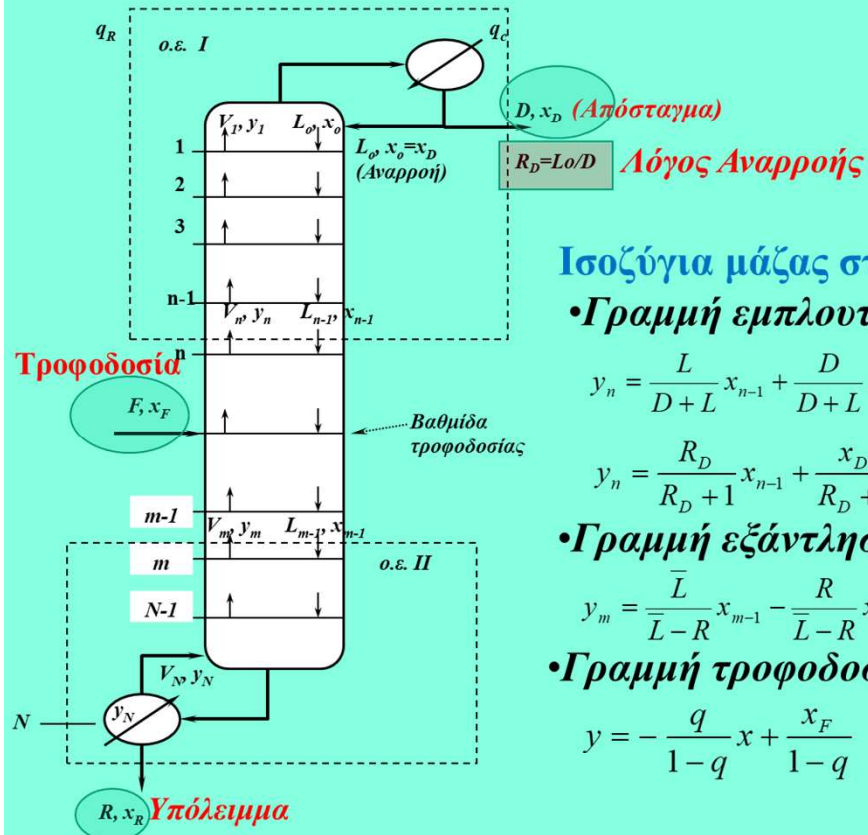


Figure 7.4 Construction lines for McCabe–Thiele method.

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης *McCabe Thiele*

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης



Ισοζύγια μάζας στους Ο.Ε.

• Γραμμή εμπλουτισμού:

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

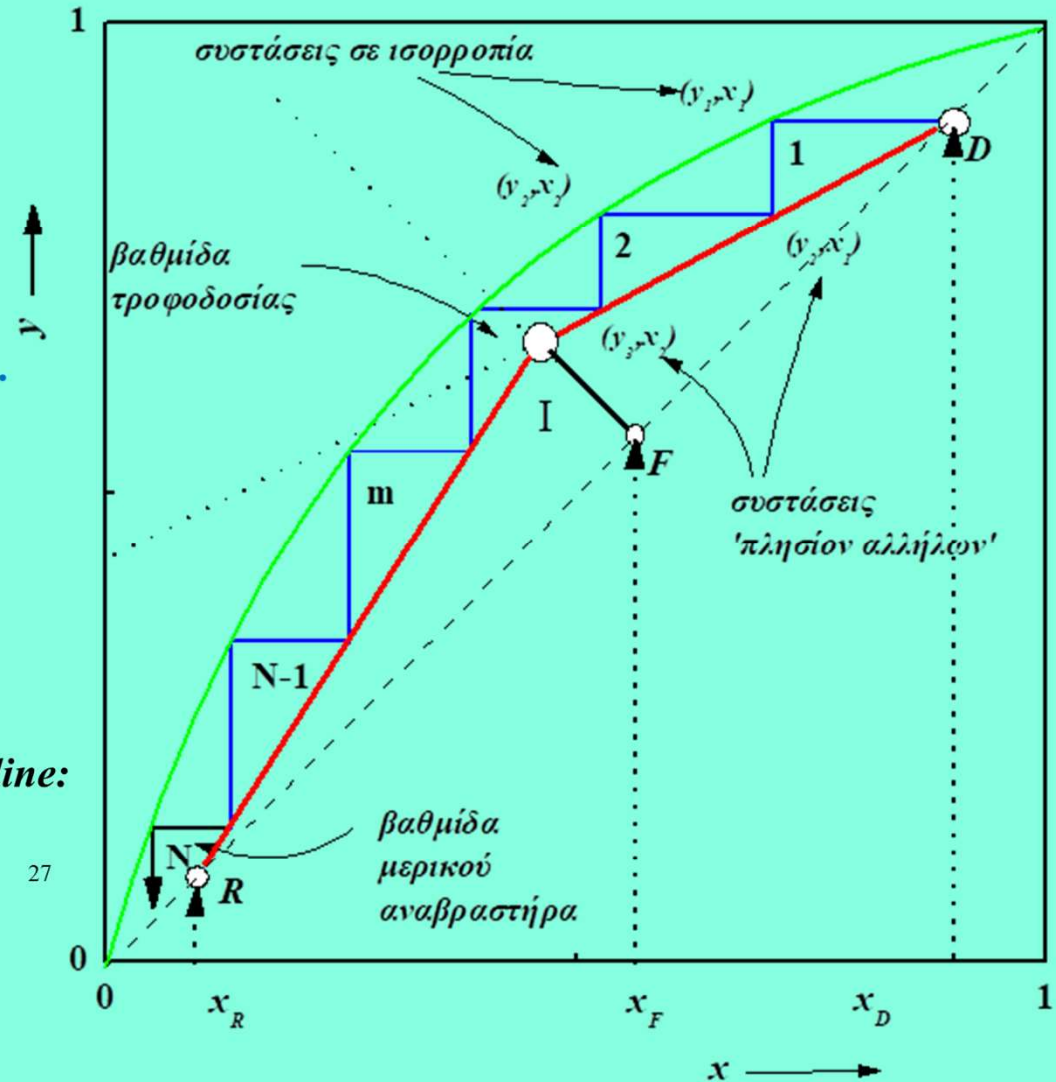
$$y_n = \frac{R_D}{R_D+1} x_{n-1} + \frac{x_D}{R_D+1}$$

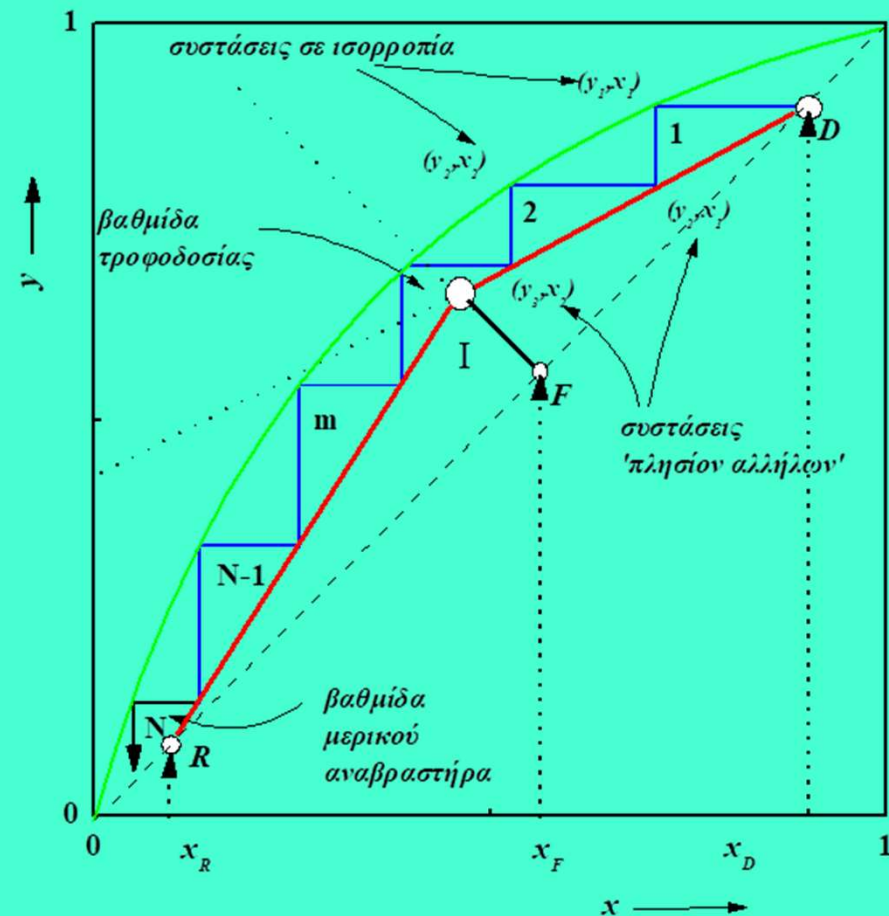
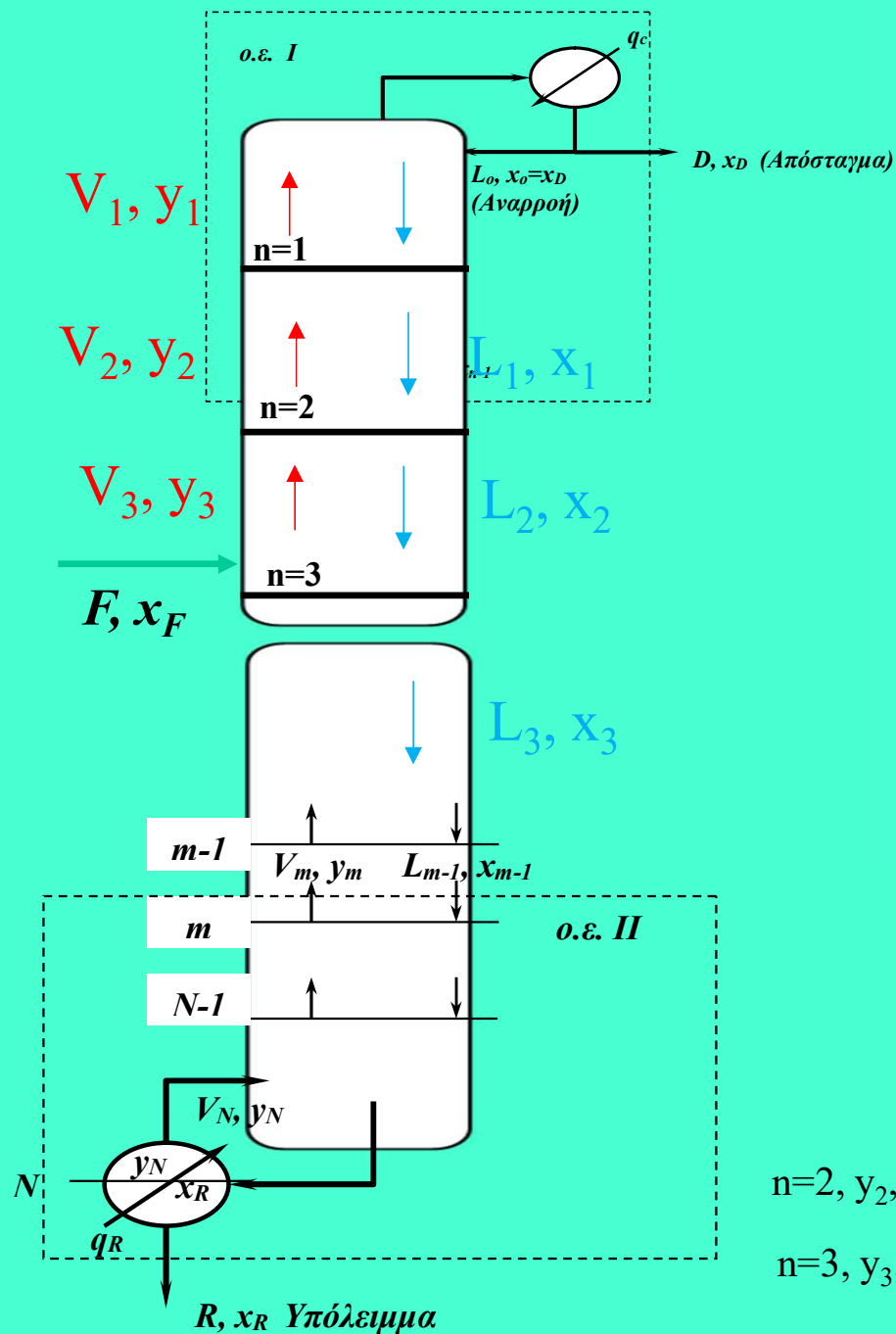
• Γραμμή εξάντλησης:

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

• Γραμμή τροφοδοσίας ή q-line:

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





$$y_A = \frac{a_{AB} x_A}{1 + (a_{AB} - 1) x_A}$$

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

$$n=1, y_1, x_{n-1}=x_0=x_D, y_1=x_D$$

$$n=2, y_2, x_{n-1}=x_1, y_2 = \left[\frac{R_D}{R_D + 1} \right] x_1 + \left[\frac{x_D}{R_D + 1} \right]$$

$$n=3, y_3, x_{n-1}=x_2, y_3 = \left[\frac{R_D}{R_D + 1} \right] x_2 + \left[\frac{x_D}{R_D + 1} \right]$$

$$y_n = f(x_n)$$

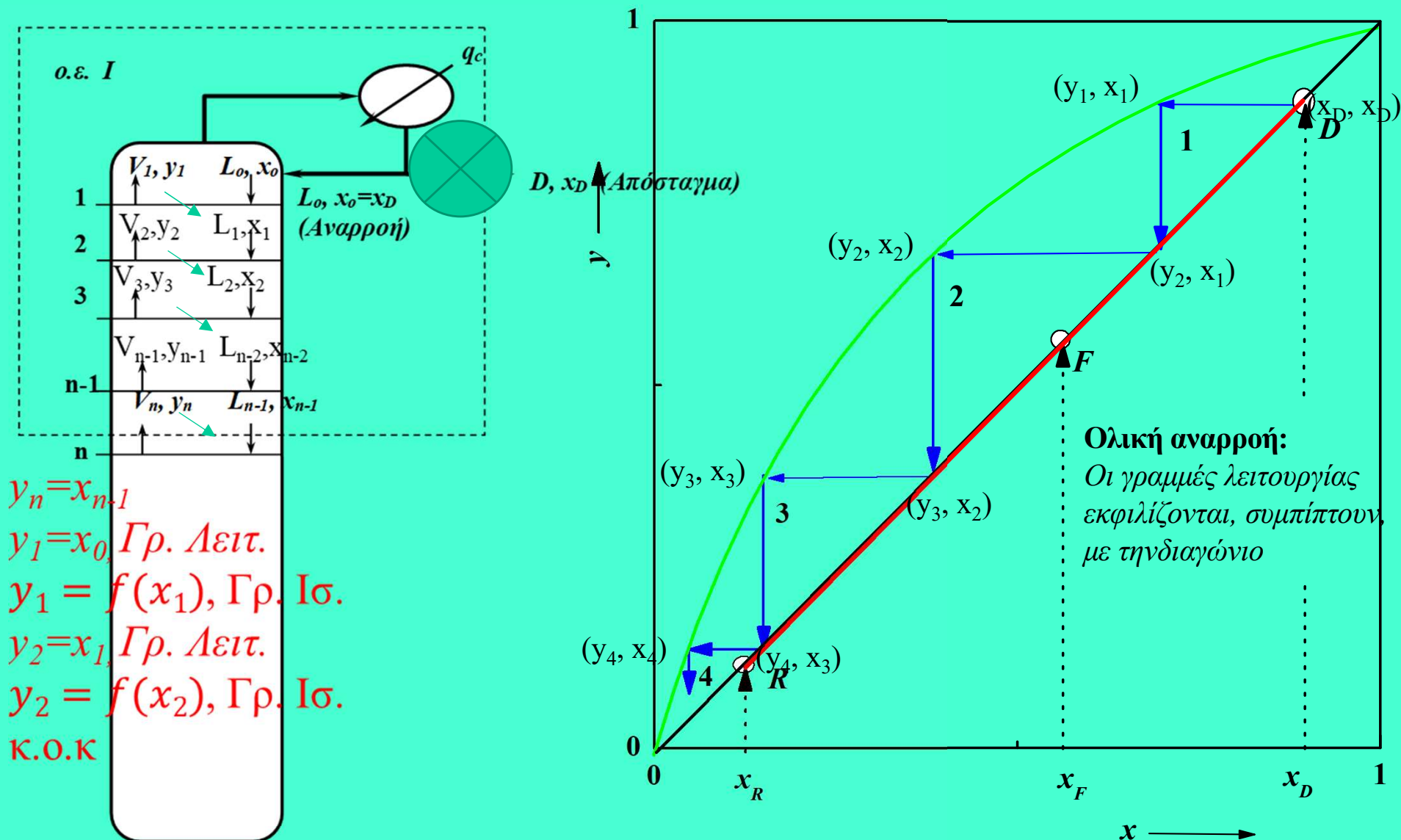
$$y_1 = f(x_1)$$

$$y_2 = f(x_2)$$

$$y_3 = f(x_3)$$

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ



Ολική αναρροή και ελάχιστος αριθμός βαθμίδων, N_{min} , $N = (1.5-2) N_{min}$.

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

ΟΡΙΑΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ: Α) ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΡΡΟΗ

Από τον ορισμό της σχετικής πτητικότητας παίρνουμε:

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

$$\frac{y_n}{1 - y_n} = \alpha_{AB} \frac{x_n}{1 - x_n}, \quad \frac{x_{n-1}}{1 - x_{n-1}} = \alpha_{AB} \frac{x_n}{1 - x_n} \quad \boxed{y_n = x_{n-1}}, \text{ Εξίσωση λειτουργίας}$$

εμπλουτισμού για
ολική αναρροή

$$\left. \begin{array}{l} (n=1): \frac{x_D}{1 - x_D} = \alpha_{AB} \frac{x_1}{1 - x_1} \\ (n=2): \frac{x_1}{1 - x_1} = \alpha_{AB} \frac{x_2}{1 - x_2} \\ \vdots \\ (n=n): \frac{x_{n-1}}{1 - x_{n-1}} = \alpha_{AB} \frac{x_n}{1 - x_n} \end{array} \right\} \xrightarrow{+} \frac{x_D}{1 - x_D} = (\alpha_{AB})^n \frac{x_n}{1 - x_n} \quad (2.96)$$

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

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

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

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

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

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

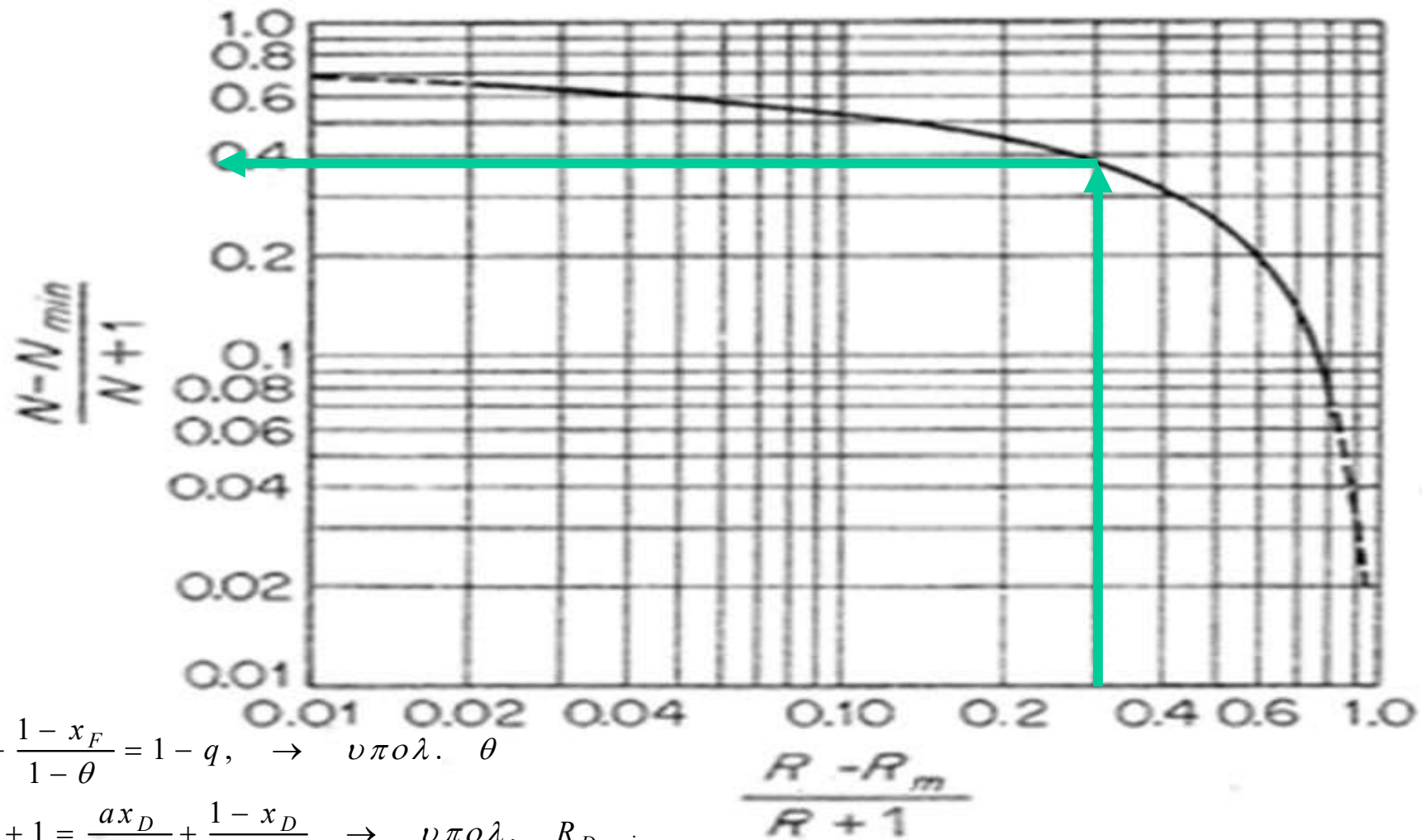
Διαγράμματα Gilliland (N)

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

$\alpha_{ij} = 1/2 (\alpha_D + \alpha_R)$, $\alpha_{ij} = (\alpha_D \alpha_R)^{1/2}$, $\alpha_{ij} = (\alpha_D \alpha_F \alpha_R)^{1/3}$, για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές

3- Shortcut Methods:

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



$$\frac{\alpha x_F}{a - \theta} + \frac{1 - x_F}{1 - \theta} = 1 - q, \quad \rightarrow \quad \nu \pi o \lambda. \quad \theta$$

$$R_{D,min} + 1 = \frac{a x_D}{a - \theta} + \frac{1 - x_D}{1 - \theta} \quad \rightarrow \quad \nu \pi o \lambda. \quad R_{D,min}$$

$$\frac{R - R_{min}}{R + 1}$$

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Θεωρητικός Αριθμός βαθμίδων, N- Μέθοδος Smoker

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

α : συντελεστής σχετικής πτητικότητας

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

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

$$x'_N = x_N - \kappa \quad x_{\text{int}} = [(R_D + 1)x_F + (q - 1)x_D] / (R_D + q) = x_N$$

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

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

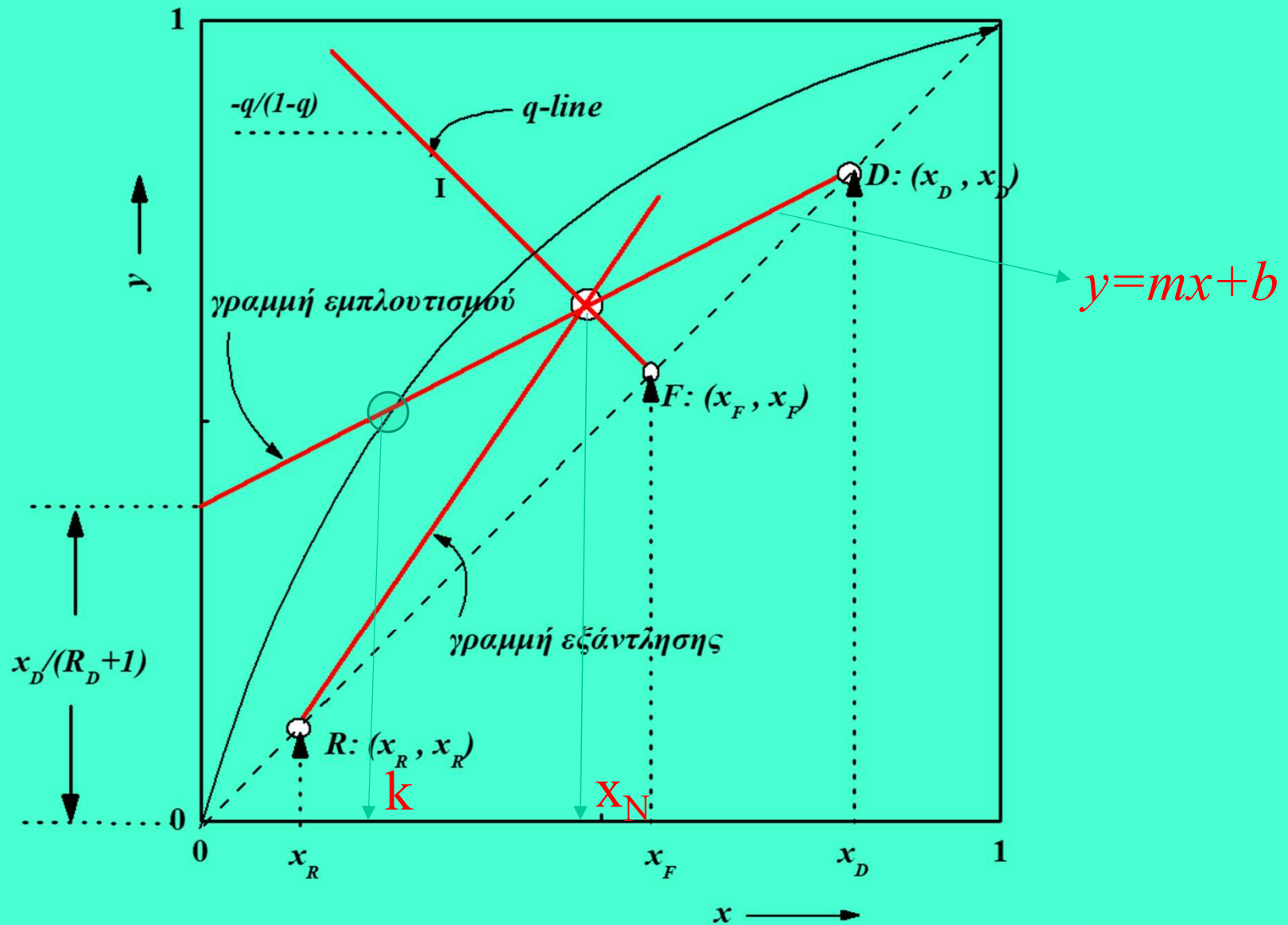
$$y = \alpha x / [1 + (\alpha - 1)x] \text{ (ισορροπίας)}, y = mx + b \text{ (γραμμή λειτουργίας)}$$

$$0 < \kappa < 1, \text{ λύση της εξίσωσης } m(\alpha - 1)\kappa^2 + [m + b(\alpha - 1) - \alpha]\kappa + b = 0$$

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

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

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



Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

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

- Εφαρμόζεται ξεχωριστά για το τμήμα εμπλουτισμού και ξεχωριστά για το τμήμα εξάντλησης Smoker's Equation:

$$N = \frac{\log \frac{x'_o \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_n / (\alpha - mc^2)]\}}{x'_n \{1 - [mc(\alpha - 1)x'_o / (\alpha - mc^2)]\}}}{\log(\alpha / mc^2)}$$

Για το τμήμα εξάντλησης

$$X_0 = X_{int}$$

$$X_n = X_R$$

$$M = \frac{L'}{V'} = \frac{R_D + q + q(R/D)}{R_D + q - (1 - q)(R/D)}$$

$$b = \frac{(x_F - x_D)x_R}{(R_D + 1)x_F + (q - 1)x_D - (R_D + q)x_R}$$

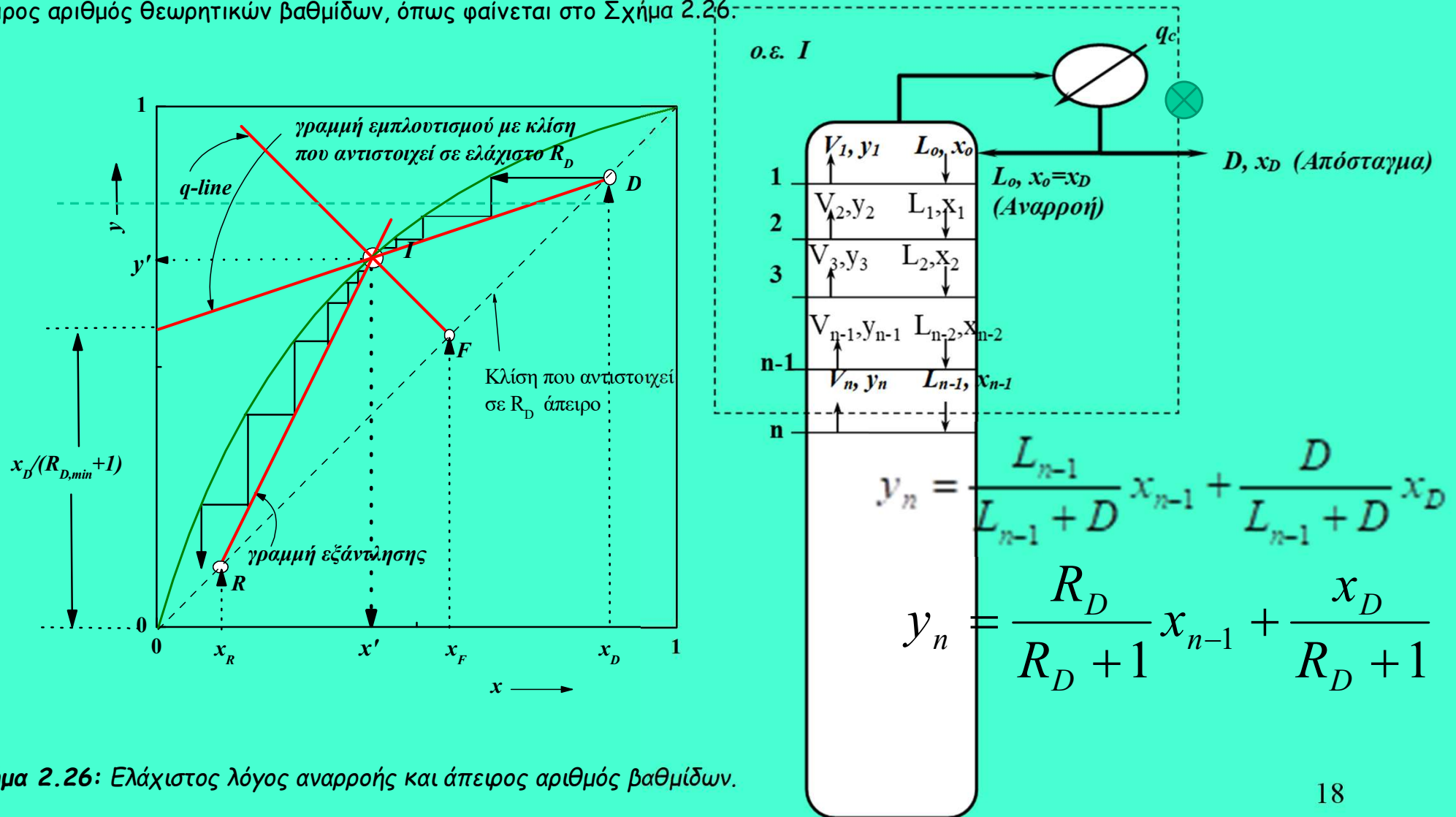
Εάν εφαρμόζεται για το τμήμα εξάντλησης τότε $x_N = x_R$ αλλά το x_D αντιστοιχεί στο προηγούμενως αναφερθέν σημείο τομής.

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.

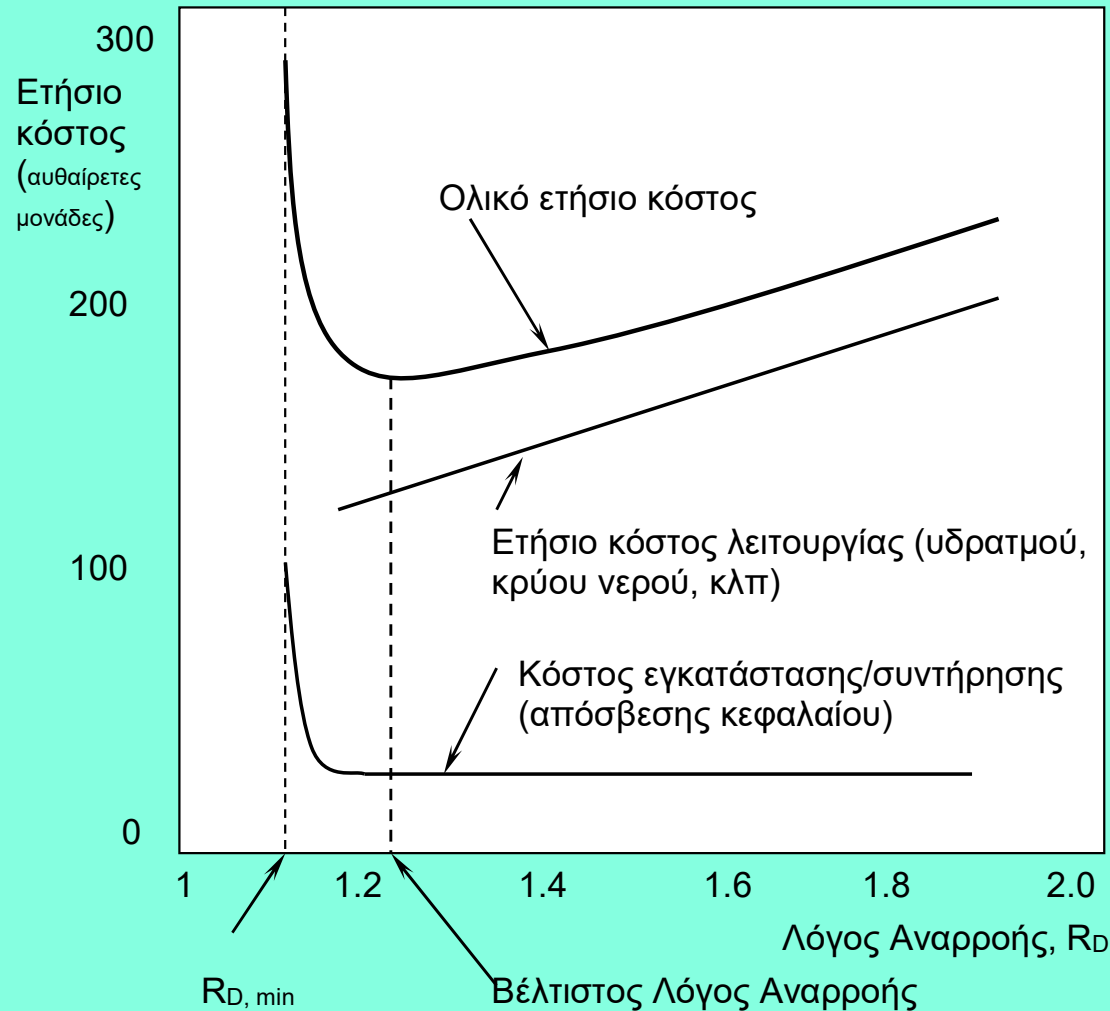


Σχήμα 2.26: Ελάχιστος λόγος αναρροής και άπειρος αριθμός βαθμίδων.

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Βέλτιστος λόγος αναρροής, $R_D = (1.1-1.5) R_{D,MIN}$

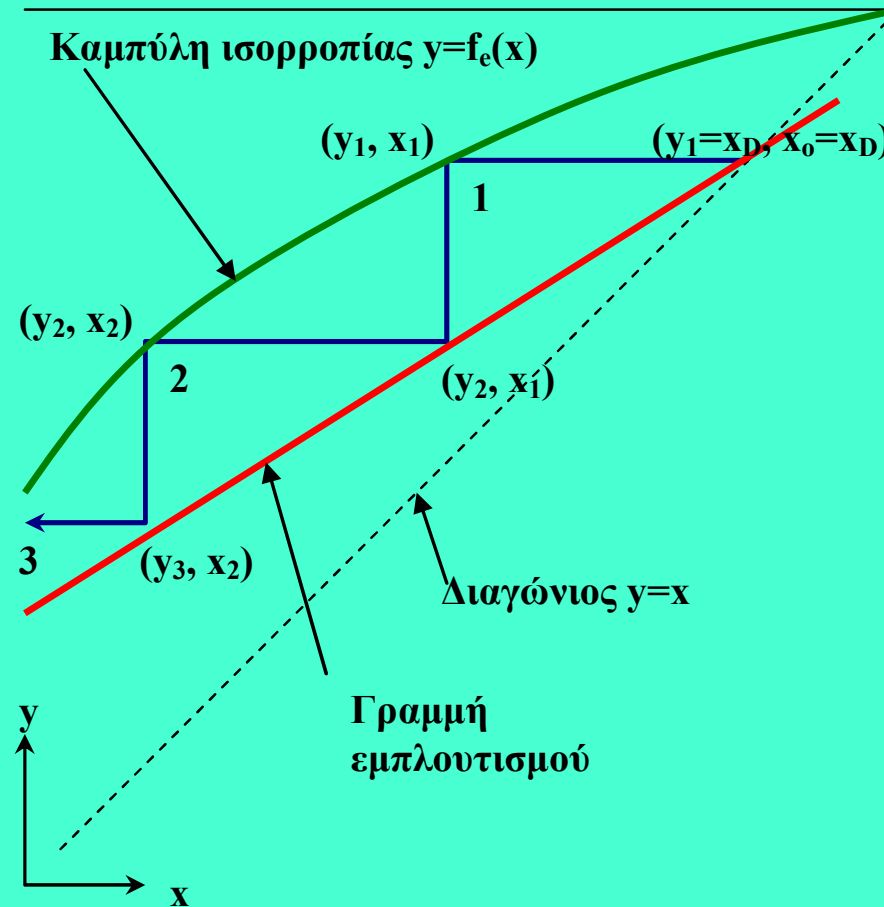
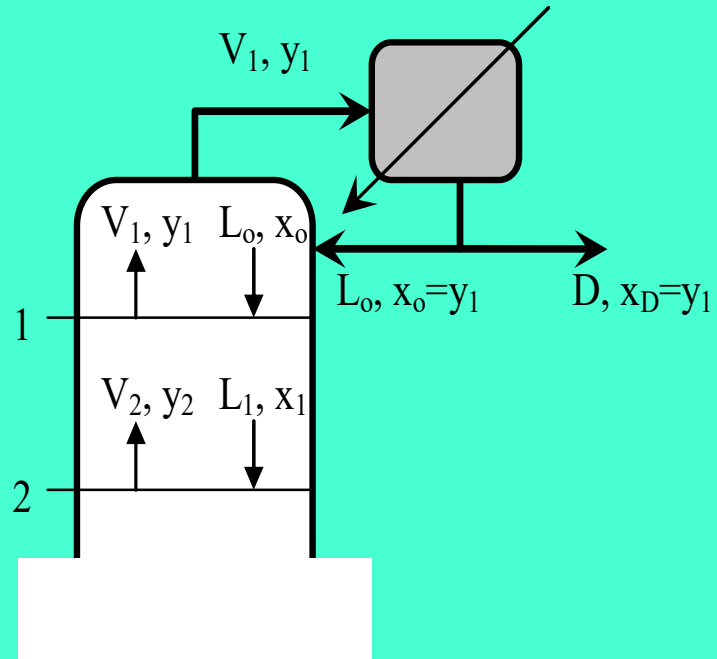
Θεωρητικός αριθμός βαθμίδων $N = (1.5 \text{ μέχρι } 2) N_{min}$



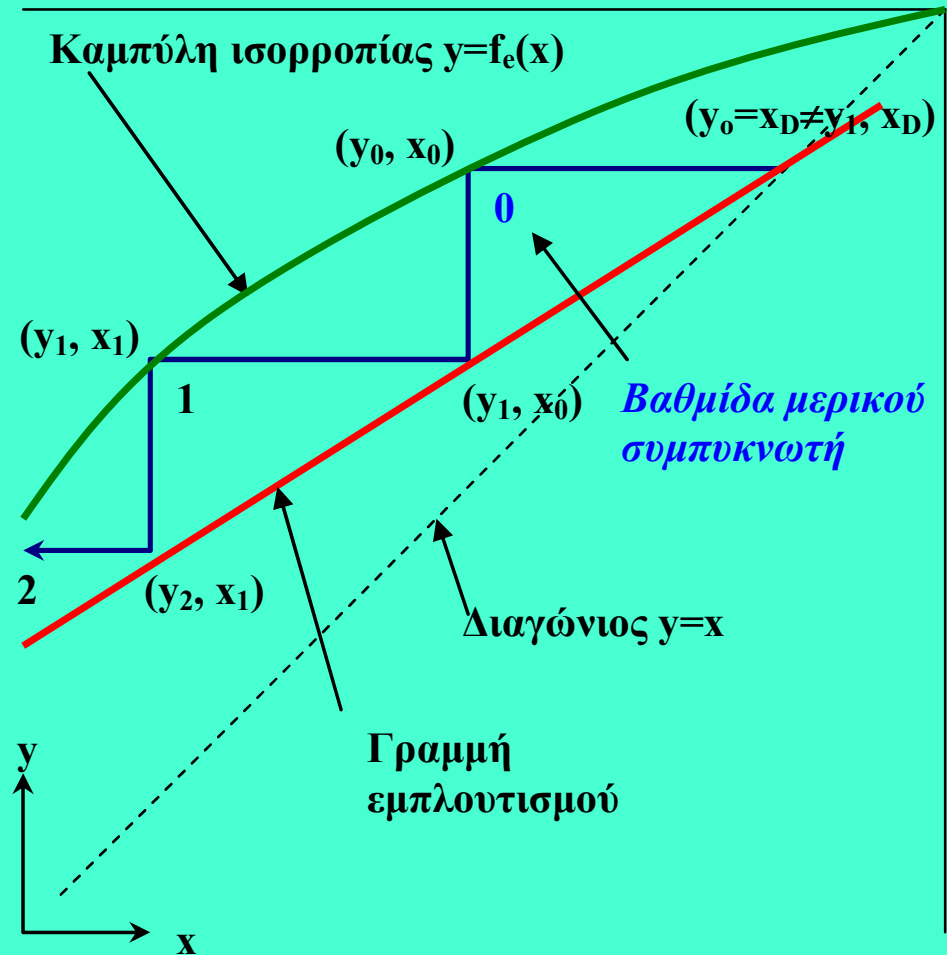
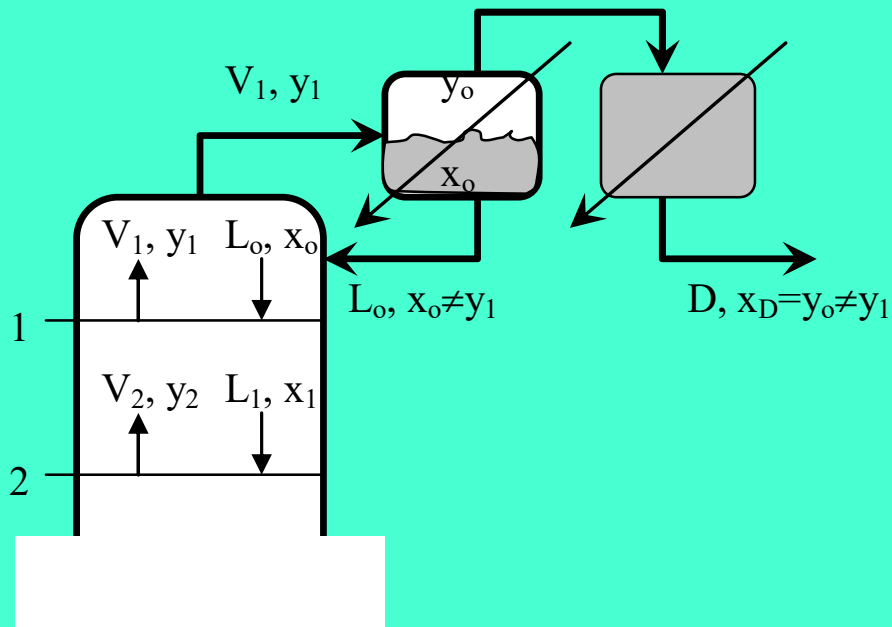
Σχήμα 2.27: Βέλτιστος λόγος αναρροής για μια τυπική αποστακτική στήλη.

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Ολικός Συμπυκνωτής



Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης Μερικός Συμπυκνωτής



Παράδειγμα 2- Υπολογισμός θεωρητικών βαθμίδων

Μίγμα 35 **mol%** βενζολίου (A) και 65 **mol%** τολουολίου (B) αποστάζεται σε στήλη συνεχούς λειτουργίας με πίεση 1 atm και τροφοδοσία 50 kmol/h για την παραλαβή προϊόντος κορυφής 90 mol % σε βενζόλιο και πυθμένα 80 mol % σε τολουόλιο. Η σχετική πτητικότητα του δυαδικού μίγματος είναι ίση με $\alpha_{AB}=3$.

Θεωρούμε επίσης ότι το μίγμα εισέρχεται με τη μορφή κορεσμένου ατμού.

Ζητούνται: 1) Διάγραμμα ισορροπίας του ιδανικού μίγματος.

2) Οι παροχές προϊόντων D και R.

3) Ο ελάχιστος λόγος αναρροής.

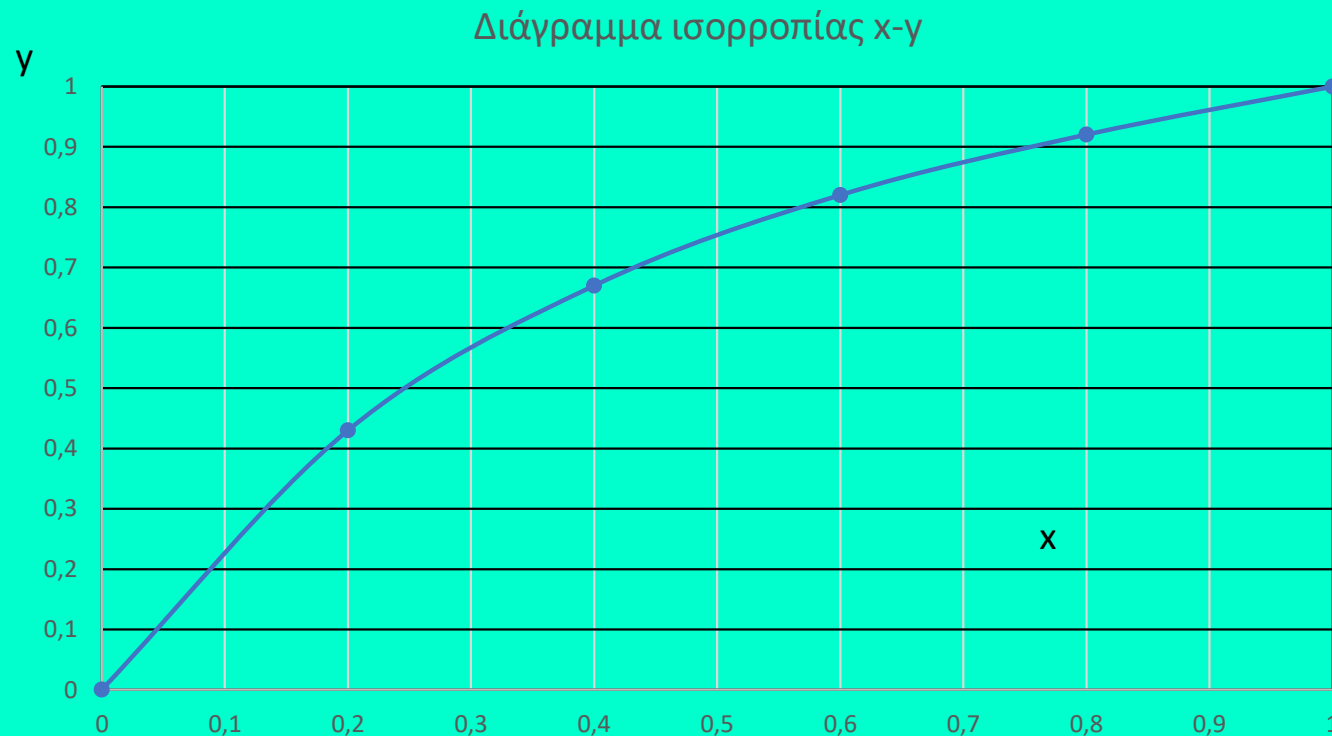
4) Ο ελάχιστος αριθμός θεωρητικών βαθμίδων γραφικά και με μέθοδο Fenske.

5) Ο αριθμός θεωρητικών βαθμίδων για $R_D = 1.5 R_{D,min}$ και η θέση τροφοδοσίας.

1) Η σχέση μεταξύ x και y στην ισορροπία που προκύπτει μέσω της σχετικής πτητικότητας είναι:

$$y_A = \frac{a_{AB}x_A}{1+(a_{AB}-1)x_A} \quad (1) \text{ και αντικαθιστώντας } a_{AB}=3,$$

x_A	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
y_A	0	0.43	0.67	0.82	0.92	1



2) Από την εκφώνηση έχουμε $F = 50 \text{ kmol/h}$, $x_{FA} = 0.35$, $x_{FB} = 0.65$

$$x_{DA} = 0.9, x_{DB} = 0.1$$

$$x_{RB} = 0.8, x_{RA} = 0.2$$

Ισοζύγιο μάζας: $F = D + R$ (1) $\rightarrow 50 = D + R \rightarrow D = 50 - R$

Ισοζύγιο μάζας για το πτητικό: $F x_{FA} = D x_{DA} + R x_{RA}$ (2) $\rightarrow$

$$\rightarrow 50 \times 0.35 = D \times 0.90 + R \times 0.20 \rightarrow$$

$$\rightarrow 17.5 = 0.90(50 - R) + 0.20R \rightarrow$$

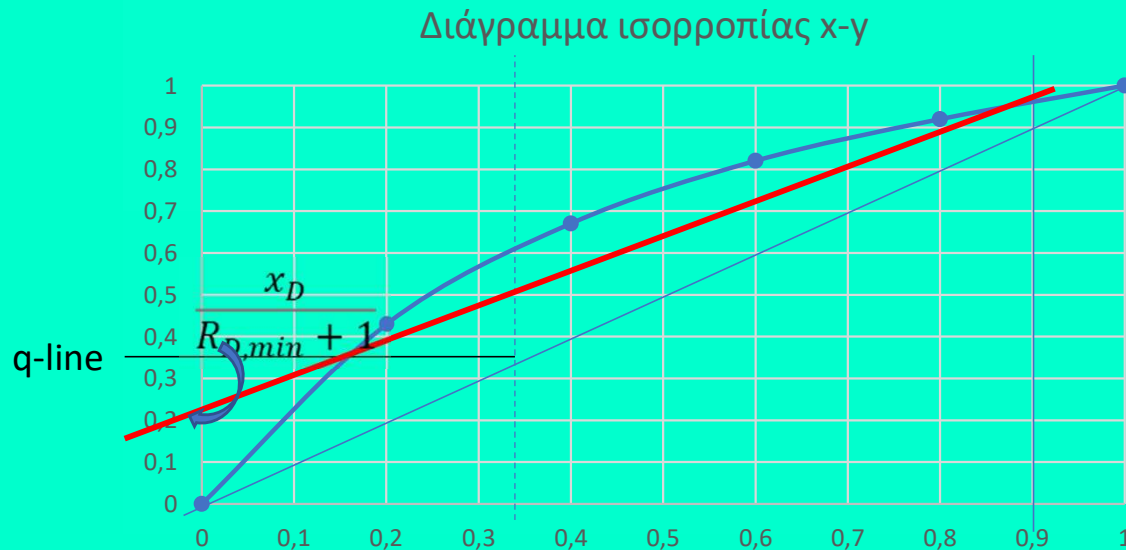
$$\rightarrow R = 39.29 \text{ kmol/h}$$

Και από την (1): $D = 10.71 \text{ kmol/h}$.

3) Το μίγμα εισέρχεται με την μορφή κορεσμένου ατμού ($q=0$) και περνά από το $(x_{FA}, x_{FA}) = (0.35, 0.35)$. Η γραμμή εμπλουτισμού ξεκινά από το $(x_{DA}, x_{DA}) = (0.90, 0.90)$ και διέρχεται από το σημείο τομής της q line με την καμπύλη ισορροπίας.

Από το διάγραμμα προκύπτει η αποτέμνουσα $\frac{x_D}{R_{D,min} + 1} = 0.230 \rightarrow$

$$\rightarrow R_{D,min} = 2.913$$

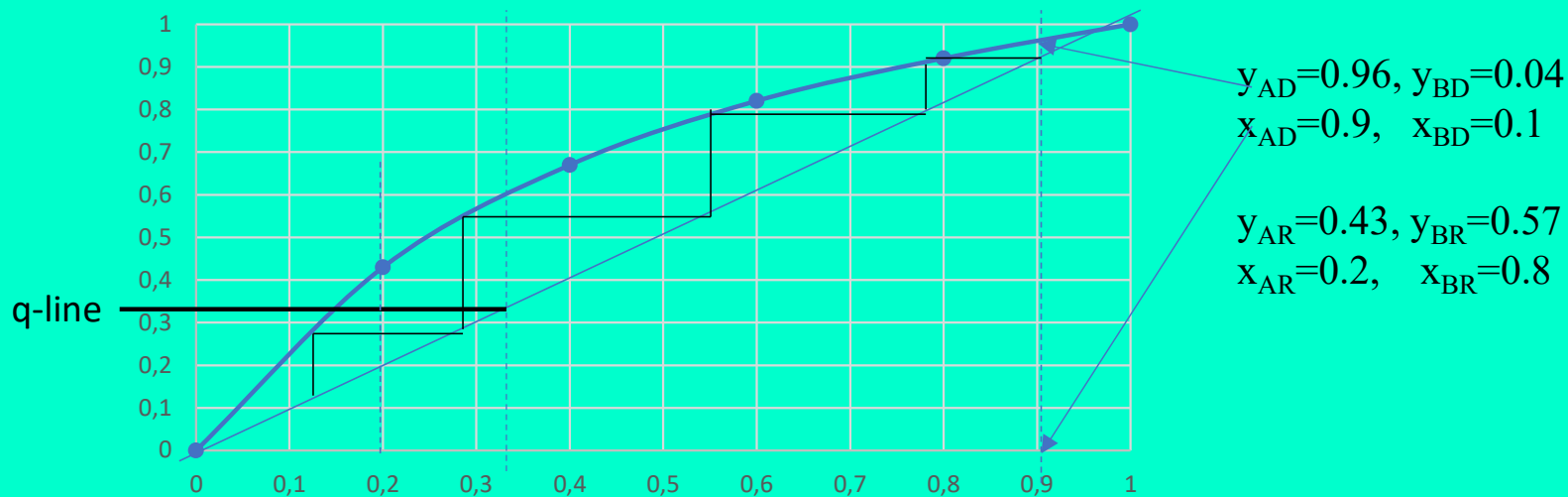


4) α) γραφική λύση:

Η γραμμή εμπλουτισμού και η γραμμή εξάντλησης συμπίπτουν με την $x=y$. $N_{\min} = 3 + 1$ αναβραστήρας.

Ο ελάχιστος αριθμός βαθμίδων αντιστοιχεί στον άπειρο λόγο αναρροής $R_{D,\min} = \infty$.

Διάγραμμα ισορροπίας x-y



β) Μέθοδος Fenske:

$$N_{min} = \frac{\log\left(\frac{x_D(1-x_R)}{x_R(1-x_D)}\right)}{\log(\alpha_{AB})} - 1 \quad (2), \text{ με } \alpha_{AB} \text{ μεταξύ των } \alpha_D \text{ και } \alpha_R.$$

Η σχετική πτητικότητα είναι: $\alpha_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B}$ $y_{AD}=0.96, y_{BD}=0.04$
 $x_{AD}=0.9, x_{BD}=0.1$

$$\alpha_D = \frac{y_{AD}/x_{AD}}{y_{BD}/x_{BD}} = 2.665$$

$$\alpha_R = \frac{y_{AR}/x_{AR}}{y_{BR}/x_{BR}} = 3.018$$

$$\begin{aligned} y_{AR} &= 0.43, y_{BR} = 0.57 \\ x_{AR} &= 0.2, x_{BR} = 0.8 \end{aligned}$$

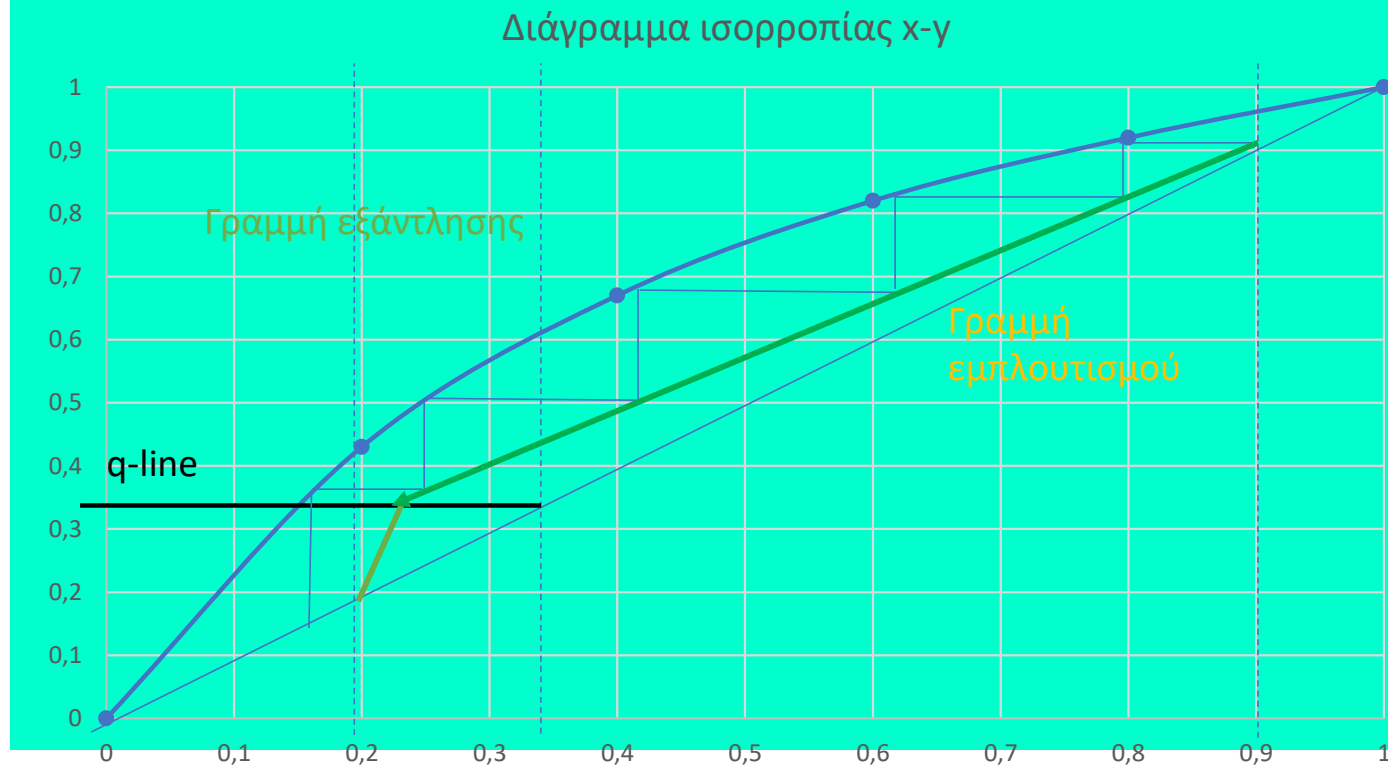
$$\alpha_{AB} = \sqrt{\alpha_D \alpha_R} = 2.836$$

Από την σχέση (2): $N_{min} = 2.95 - 1 = 2.0$

$$N_{min} = 3.26 - 1 = 2.26 \quad (\alpha_{AB} = 3.0)$$

$$5) \quad \left. \begin{array}{l} R_D = 1.5 R_{D,\min} \\ R_{D,\min} = 2.913 \end{array} \right\} R_D = 4.369$$

Η αποτέμνουσα βρίσκεται $\frac{x_D}{R_D+1} = 0.168$.



$N = 5 = 4 + 1$ αναβραστήρας

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

Απόδοση βαθμίδας Murphree

Βαθμός Απόδοσης Δίσκων και Στήλης

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης στήλης (η_0), ορίζεται ως:

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

Το η_0 κυμαίνεται από **0.5-0.8**, χρειαζόμαστε περισσότερες βαθμίδες για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή για την καθαρότητα του αποστάγματος, x_D

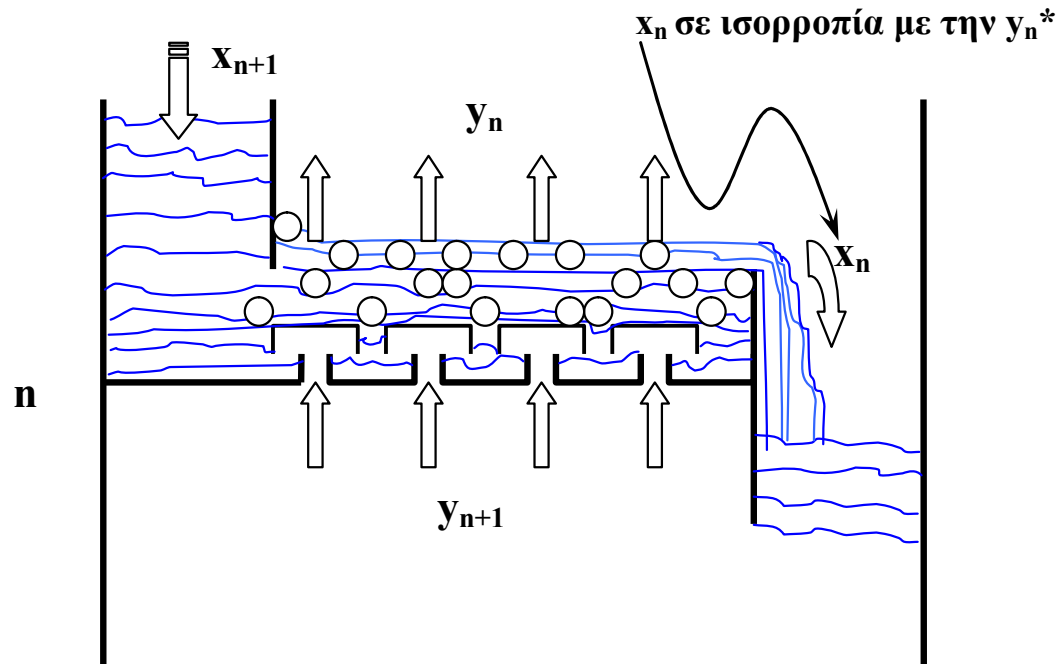
Βαθμός απόδοσης Murphree, η_M

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

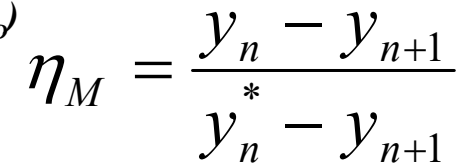
Αριθμός Πραγματικών Βαθμίδων

Απόδοση βαθμίδας Murphree

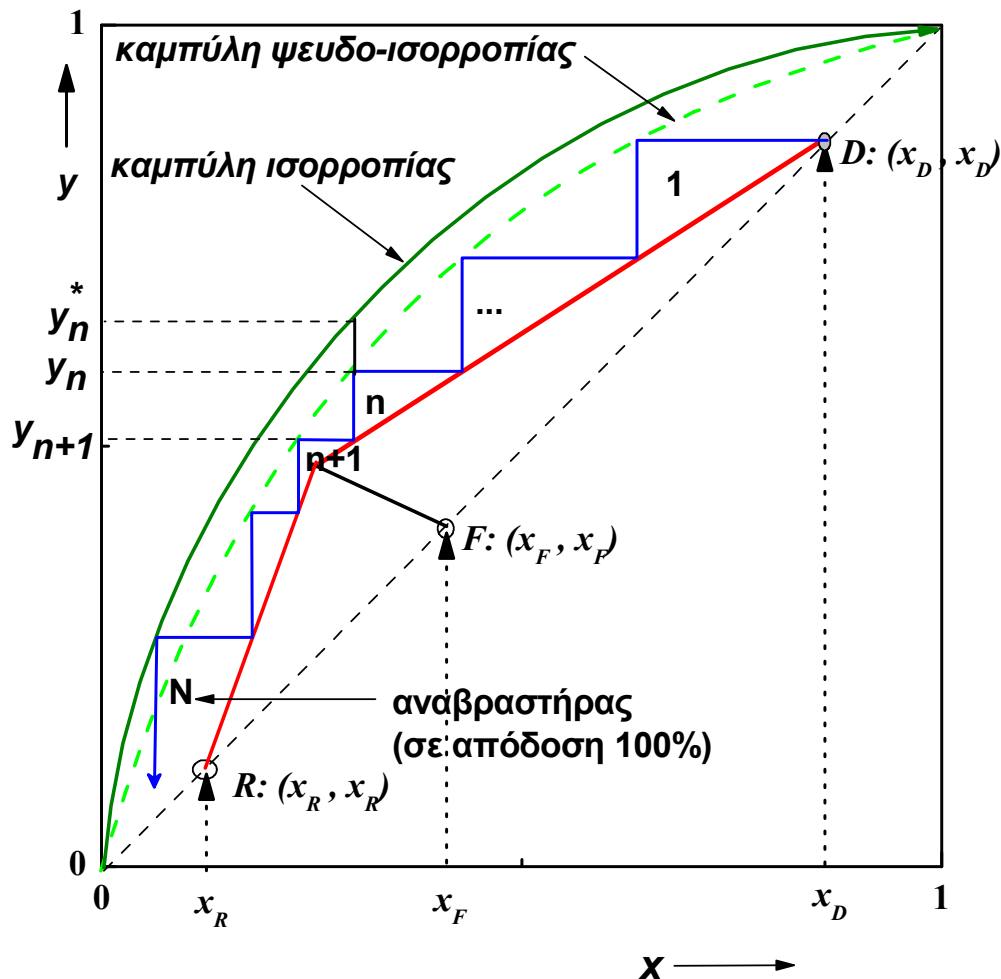


$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

Απόδοση βαθμίδας Murphree



$$y_n = \eta_{\text{M}} (y_n^* - y_{n+1}) + y_{n+1}$$

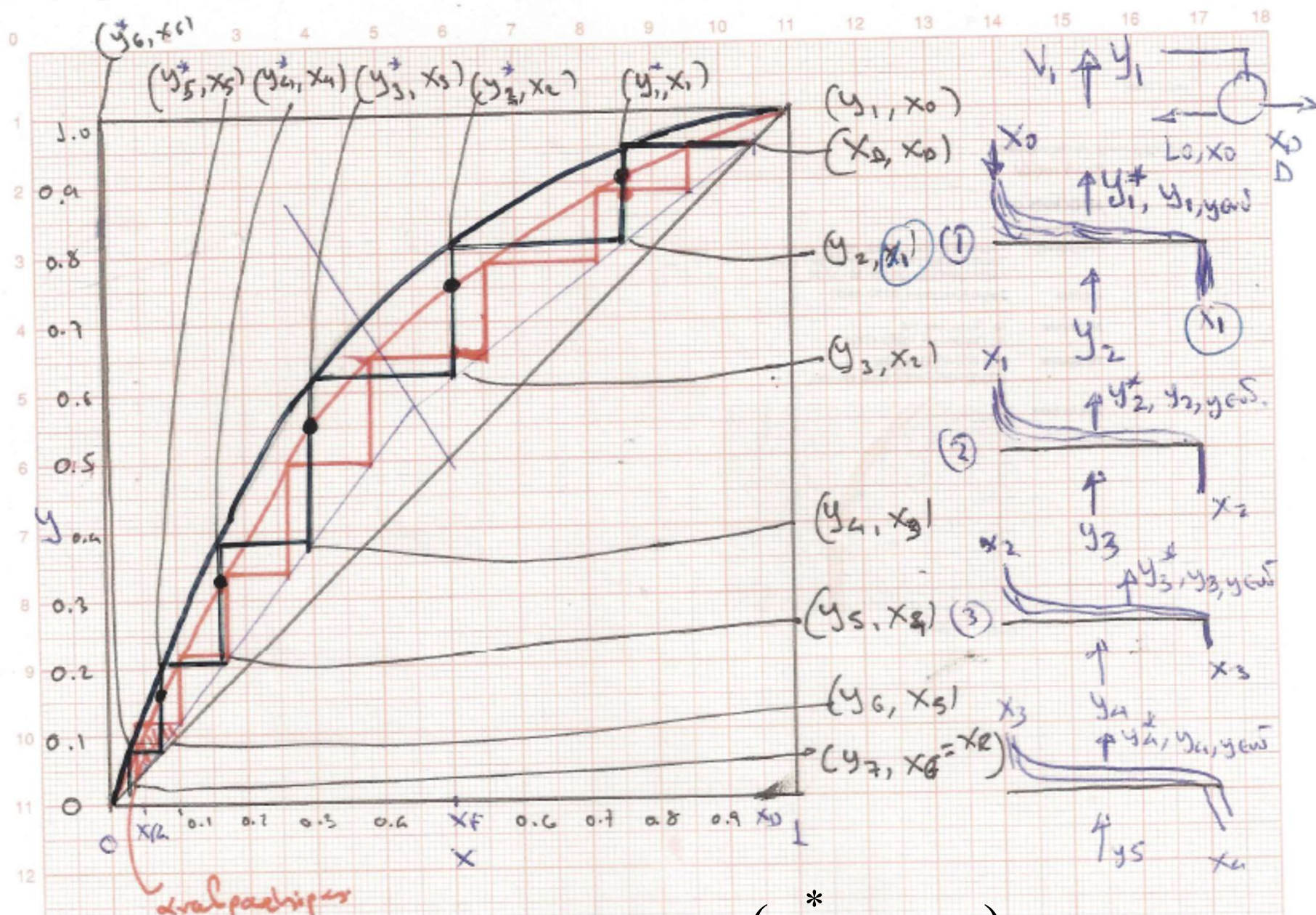


Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

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, $N = 6$, $\eta_T = \frac{6}{8} = 75\%$

Βαθμός Ανόδου: Βαθμίδας, $\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$
(Murphree)

$$1^{\text{η}} \text{Β, } y_{1,y\in\delta} = y_2 + \eta_M(y_1^* - y_2)$$

$\eta_M = 0.7$ $y_n = y_{n+1} + \eta_M(y_n^* - y_{n+1})$

$y_1^* = 0.95, y_2 = 0.82, \rightarrow y_{1,y\in\delta} = 0.901$
0.95 0.82 0.901

$$2^{\text{η}} \text{Β, } y_{2,y\in\delta} = y_3 + \eta_M(y_2^* - y_3), \quad y_2^* = 0.82, y_3 = 0.63, y_{2,y\in\delta} = 0.763$$

$$3^{\text{η}} \text{Β, } y_{3,y\in\delta} = y_4 + \eta_M(y_3^* - y_4), \quad y_3^* = 0.63, y_4 = 0.39, y_{3,y\in\delta} = 0.558$$

$$4^{\text{η}} \text{Β, } y_{4,y\in\delta} = y_5 + \eta_M(y_4^* - y_5), \quad y_4^* = 0.39, y_5 = 0.21, y_{4,y\in\delta} = 0.336$$

$$5^{\text{η}} \text{Β, } y_{5,y\in\delta} = y_6 + \eta_M(y_5^* - y_6), \quad y_5^* = 0.21, y_6 = 0.09, y_{5,y\in\delta} = 0.174$$

$$6^{\text{η}} \text{Β, } y_{6,y\in\delta} = y_{7,R} + \eta_M(y_6^* - y_{7,R})$$

$\eta_M \approx 100\%$ $y_{6,y\in\delta} = y_{7,R} + \frac{y_6^* - y_{7,R}}{1} = y_6$

8 βαθμίδες αναπόδοτες

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Θερμικά φορτία Αναβραστήρα και συμπυκνωτή

Ρυθμός Παροχής θερμότητας στον αναβραστήρα

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

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

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

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

•

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

λ_A και λ_B λανθάνουσες θερμοκρασίας εξάτμισης των καθαρών συστατικών Α και Β, αντίστοιχα

λ_{steam} , λανθάνουσα θερμότητα ατμού

$\bar{V}$, Παροχή ατμών στο τμήμα εξάντλησης,

$$\bar{V} = (1 - q)F$$

Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Θερμικά φορτία Αναβραστήρα και συμπυκνωτή

Ρυθμός ‘απαγωγής’ θερμότητας στο συμπυκνωτή

(Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κρύο νερό ως ψυκτικό υγρό)

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

λ_{cond} = λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης μίγματος

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

•

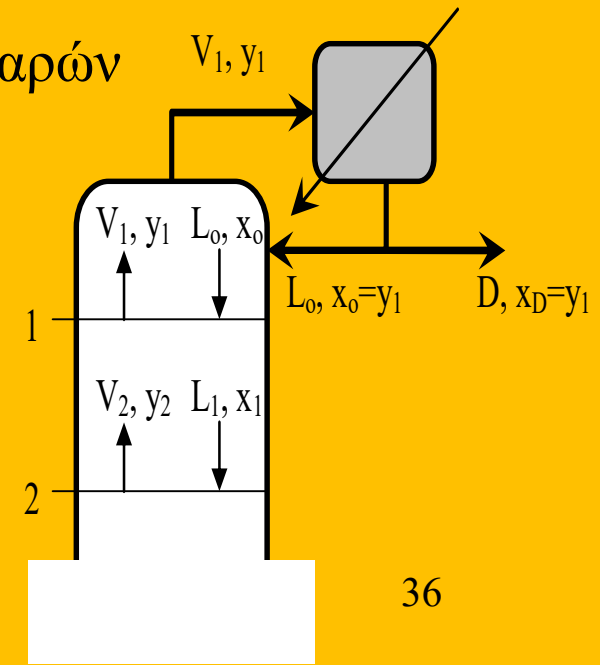
$$m_c = \lambda_{cond} V / [C_{p,V} (T_2 - T_1)]$$

λ_A και λ_B λανθάνουσες θερμοκρασίας εξάτμισης των καθαρών συστατικών Α και Β, αντίστοιχα

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

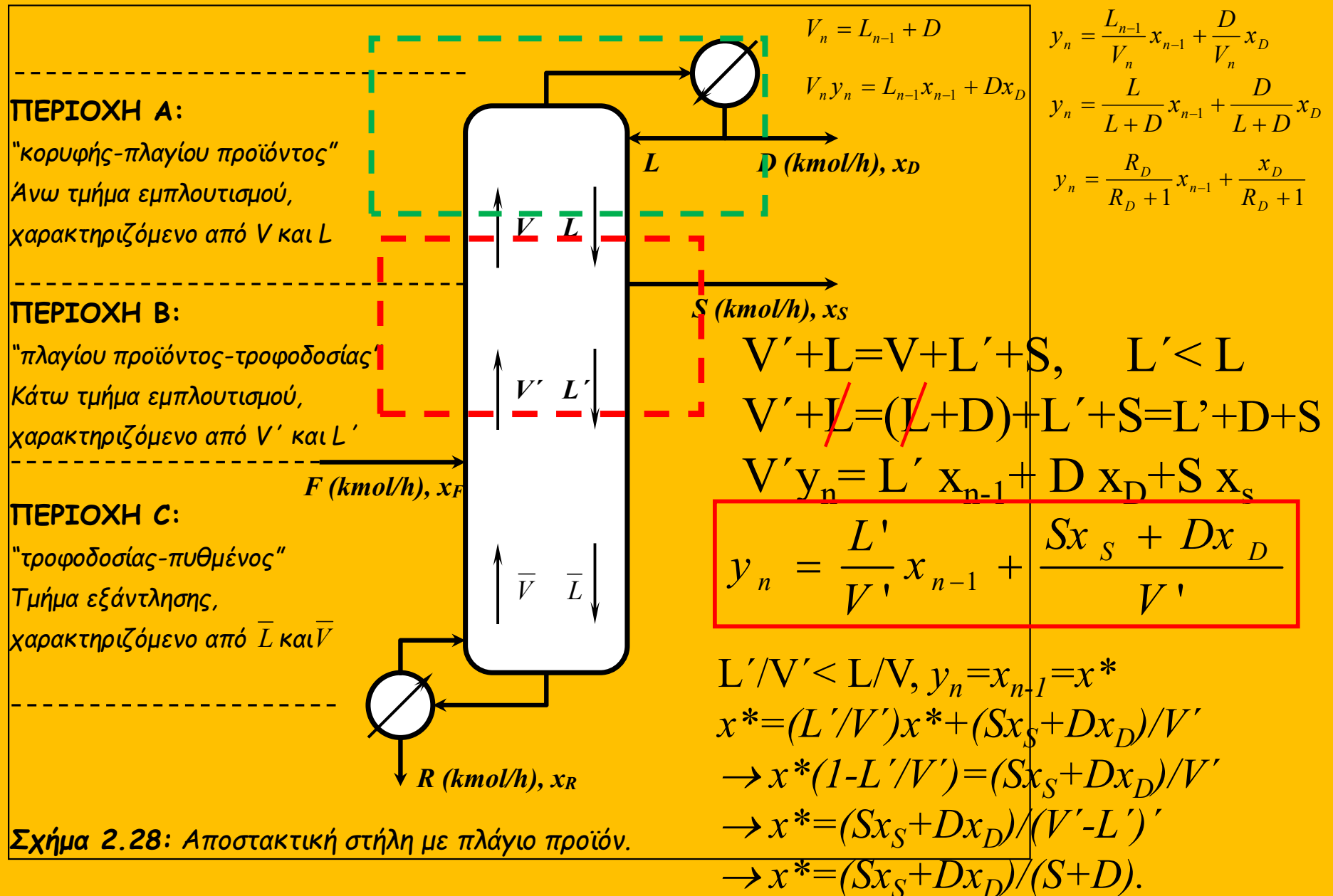
$T_2 - T_1$, ανύψωση θερμοκρασίας κρύου νερού

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



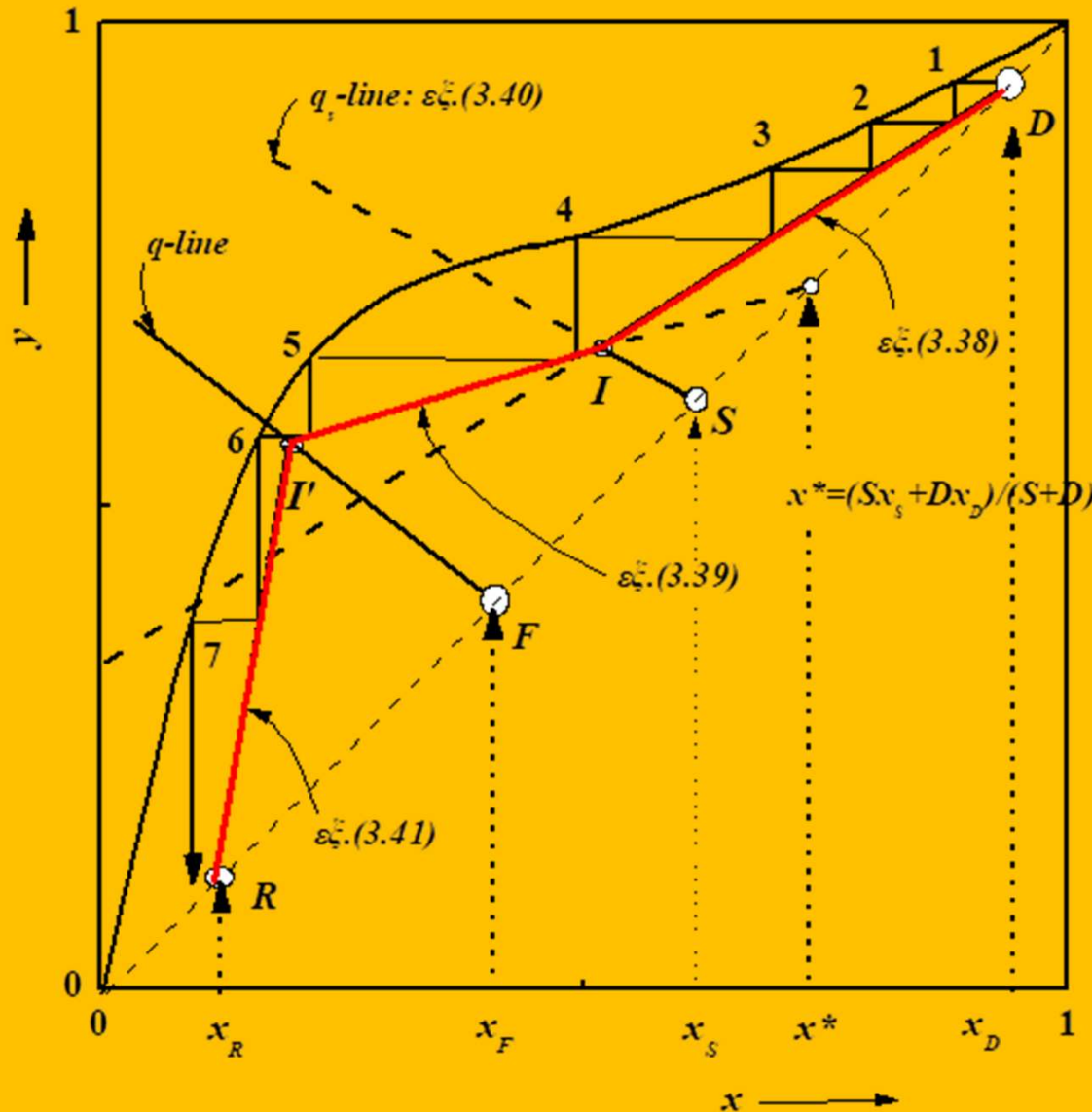
Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

Πλάγια Προϊόντα



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

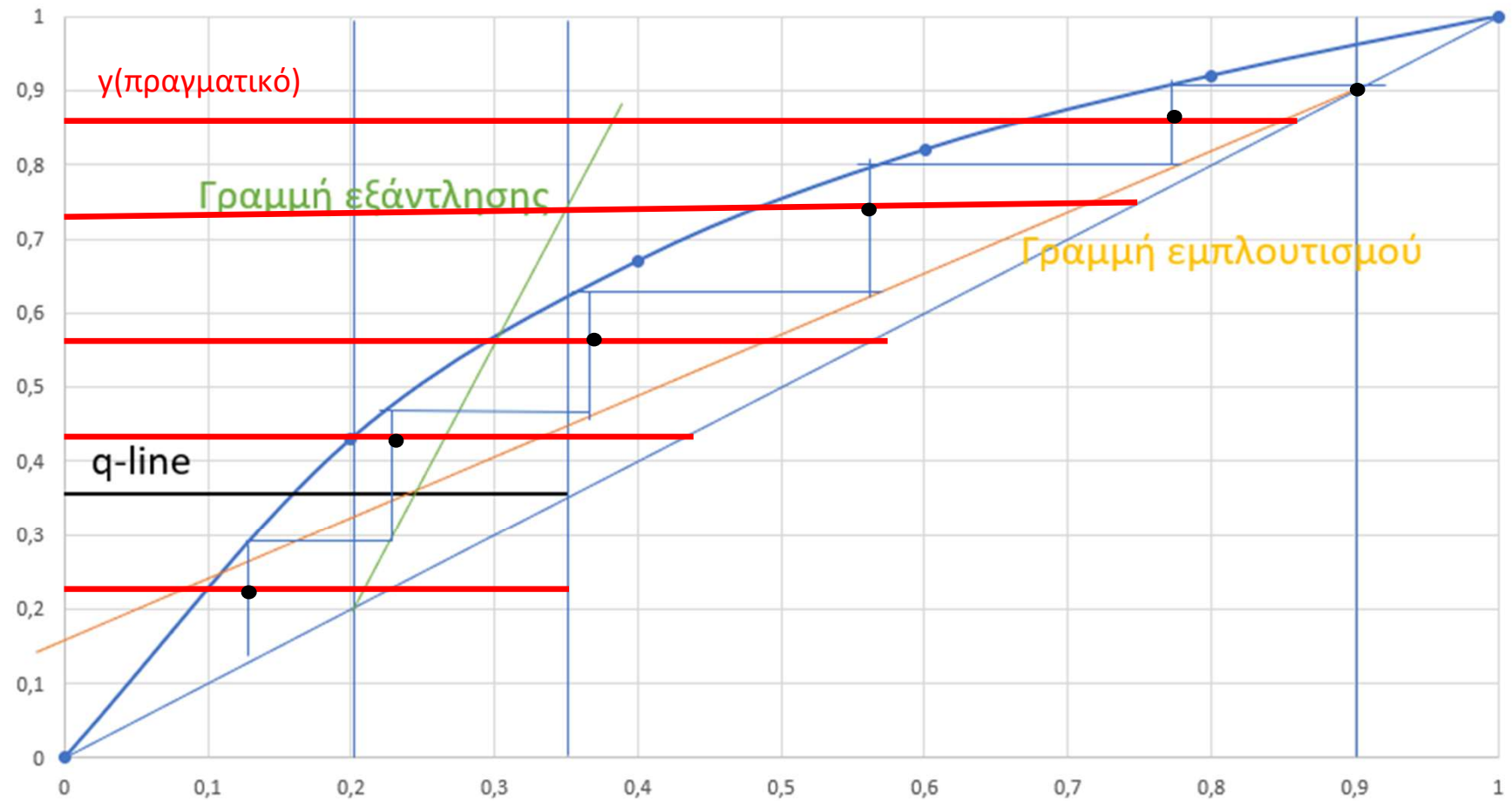
Παράδειγμα 3

Με βάση το προηγούμενο παράδειγμα να υπολογίσετε τον αριθμό των πραγματικών δίσκων αν ο βαθμός απόδοσης Murphree $\eta_M = 75\%$.

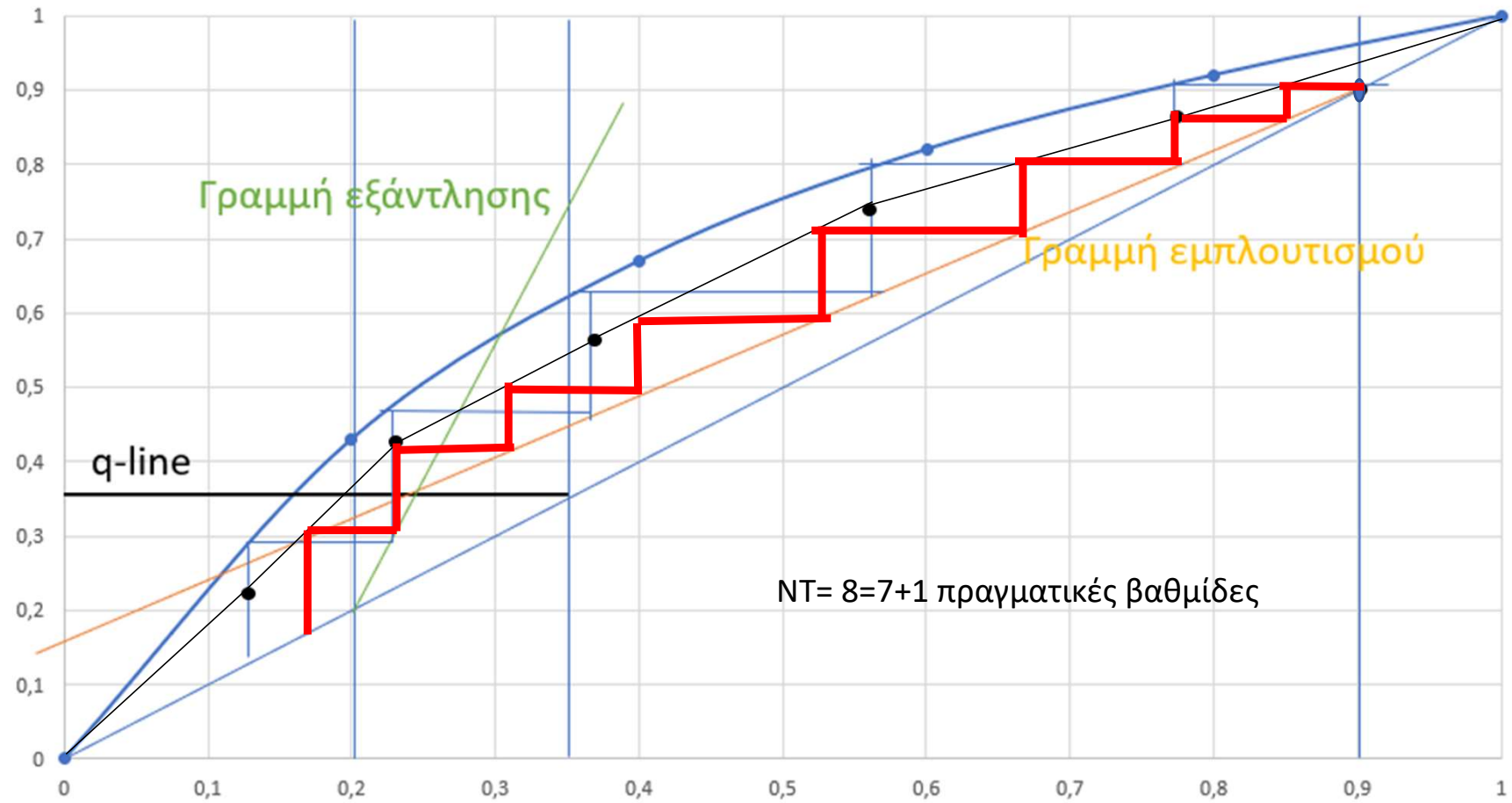
$$y_n = \eta_M (y_n^* - y_{n+1}) + y_{n+1}$$

$y_1^* = x_D = 0.900$	$\longrightarrow$	$y_2 = 0.770 \Rightarrow y_1(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.793$
$y_2^* = y_2 = 0.770$	$\longrightarrow$	$y_3 = 0.610 \Rightarrow y_2(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.730$
$y_3^* = y_3 = 0.610$	$\longrightarrow$	$y_4 = 0.460 \Rightarrow y_3(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.570$
$y_4^* = y_4 = 0.460$	$\longrightarrow$	$y_5 = 0.370 \Rightarrow y_4(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.440$
$y_5^* = y_5 = 0.370$	$\longrightarrow$	$y_6 = 0.160 \Rightarrow y_5(\text{ψευδοϊσορροπίας}) = 0.220$

Διάγραμμα ισορροπίας x-y



Διάγραμμα ισοροπίας x-y



Παράδειγμα 4

Στο παράδειγμα 1 του φροντ. 3 υπολογίστε τώρα τον αριθμό των πραγματικών δίσκων αν ο βαθμός απόδοσης Murphree (η_M) κάθε δίσκου είναι 75%.

Η αποδοτικότητα Murphree ορίζεται από την σχέση:

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

y_n —> πραγματικό μοριακό κλάσμα του ατμού που αφήνει τη βαθμίδα n

y_{n+1} —> πραγματικό μοριακό κλάσμα του ατμού που προσέρχεται στη βαθμίδα n

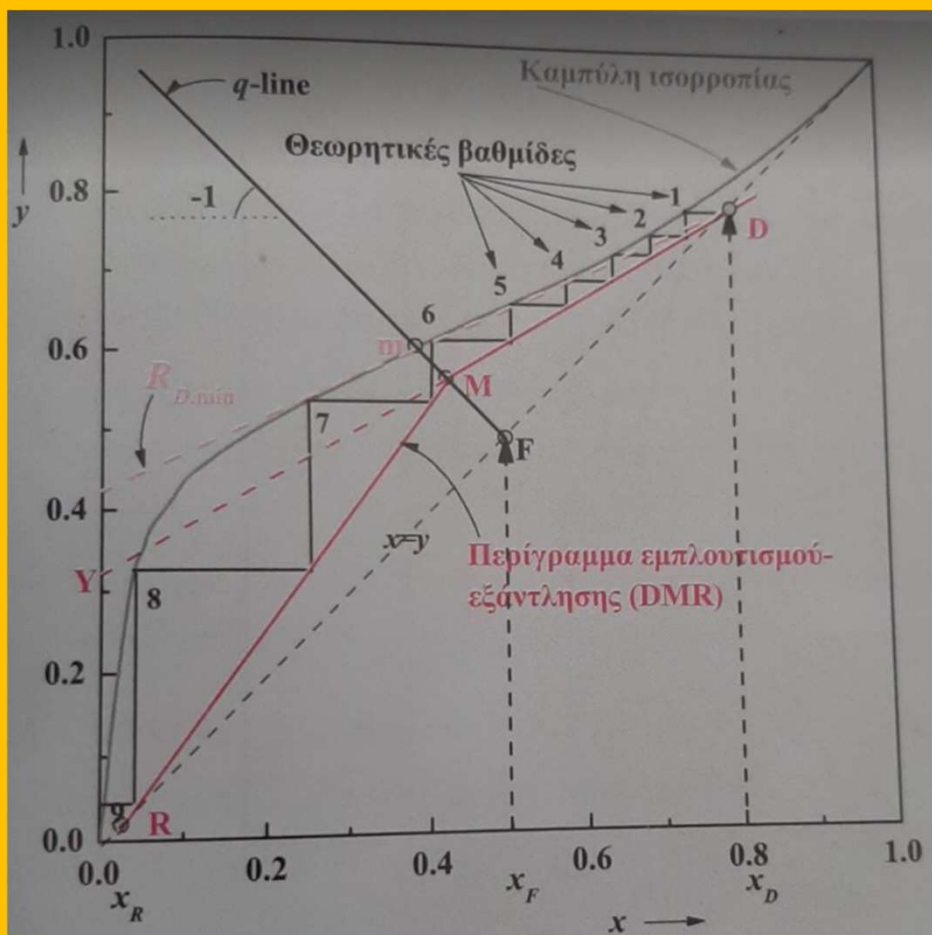
y_n^* —> μοριακό κλάσμα του ατμού που θα ήταν σε ισορροπία με το υγρό που αφήνει τη βαθμίδα n (αν $\eta_M=100\%$)

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

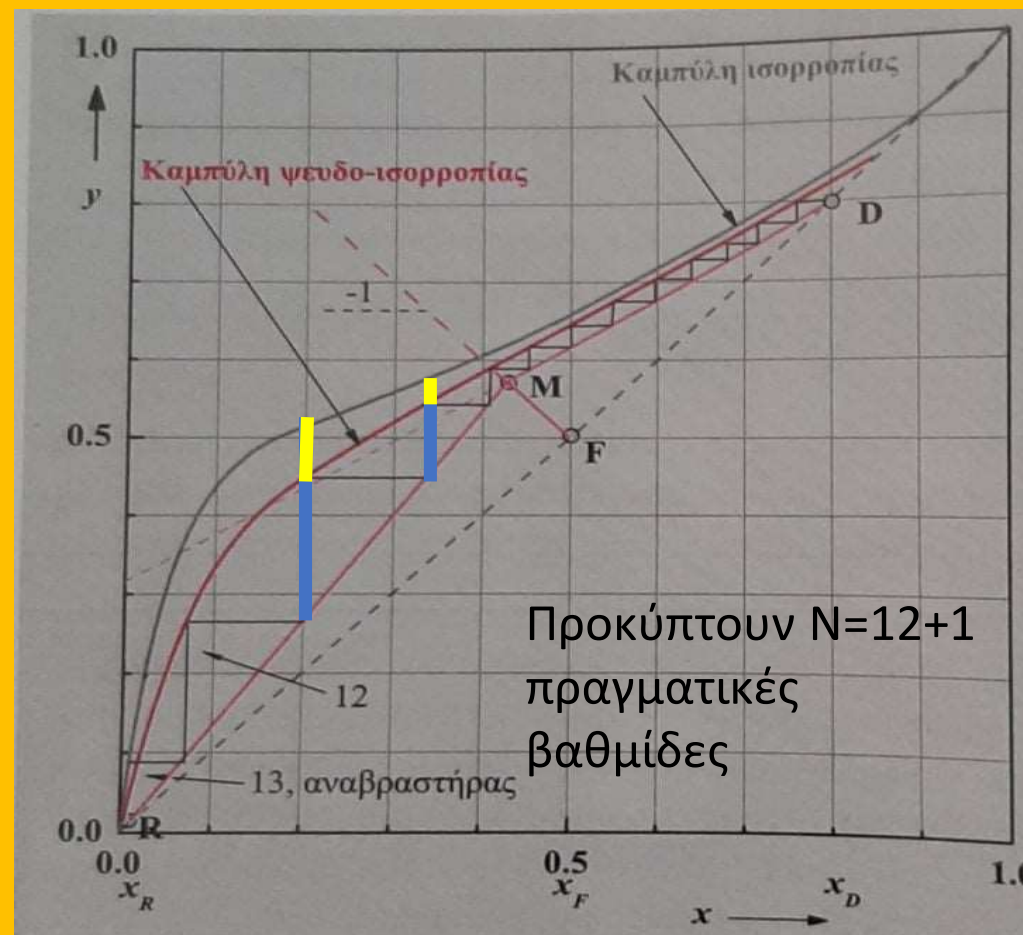
Προκύπτουν για:

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

Διάγραμμα ισορροπίας αιθανόλης-νερού από προηγούμενο παράδειγμα (McCabe Thiele) (φροντ.3)



Διάγραμμα ισορροπίας αιθανόλης-νερού και καμπύλη ψευδοϊσορροπίας $\eta_M=0.75$.



Παράδειγμα 5

Μίγμα συστατικών A (33% mol) και B (67% mol) αποστάζεται σε κλασματική στήλη σε ατμοσφαιρική πίεση. Η τροφοδοσία είναι 31200 kg/h, η οποία εξατμίζεται κατά 45% πριν εισέλθει στην στήλη, το 45% δηλαδή εισέρχεται ως κορεσμένος ατμός. Το απόσταγμα της κορυφής περιέχει 96% mol A και το υπόλειμμα στην βάση 97% mol B. Χρησιμοποιείται ολικός συμπυκνωτής και μερικός αναβραστήρας. Δίνονται για το A:

x_A	0	0.029	0.06	0.11	0.14	0.26	0.39	0.53	0.66	0.76	0.86	1
y_A	0	0.08	0.15	0.27	0.33	0.49	0.63	0.74	0.82	0.88	0.93	1

$MB_A=82 \text{ g/mol}$, $MB_B=158 \text{ g/mol}$

Ζητούνται τα ακόλουθα:

A) Οι γραμμομοριακές παροχές στην κορυφή και στην βάση της στήλης (D και R) καθώς και τα F_A , F_B , D_A , D_B , R_A , R_B .

Από εκφώνηση: $x_{FA} = 0.33$ και $x_{FB} = 0.67$

Μετατρέπουμε την μαζική παροχή σε γραμμομοριακή:

$$MB_F = 0.33 * 82 + 0.67 * 158 = 132.92 \text{ kg/kmol}$$

$$F = 234.72 \text{ kmol/h}, F_A = x_F F = 77.46 \text{ kmol/h και}$$

$$F_B = 157.27 \text{ kmol/h}$$

$$D = F \frac{x_F - x_R}{x_D - x_R} = 75.72 \text{ kmol/h}$$

$$R = F \frac{x_D - x_F}{x_D - x_R} = 159.01 \text{ kmol/h}$$

$$D_A = x_D D = 72.69 \text{ kmol/h}, D_B = 3.028 \text{ kmol/h}$$

$$R_A = x_R R = 4.77 \text{ kmol/h}, R_B = 154.24 \text{ kmol/h}$$

B) Ο ελάχιστος λόγος αναρροής.

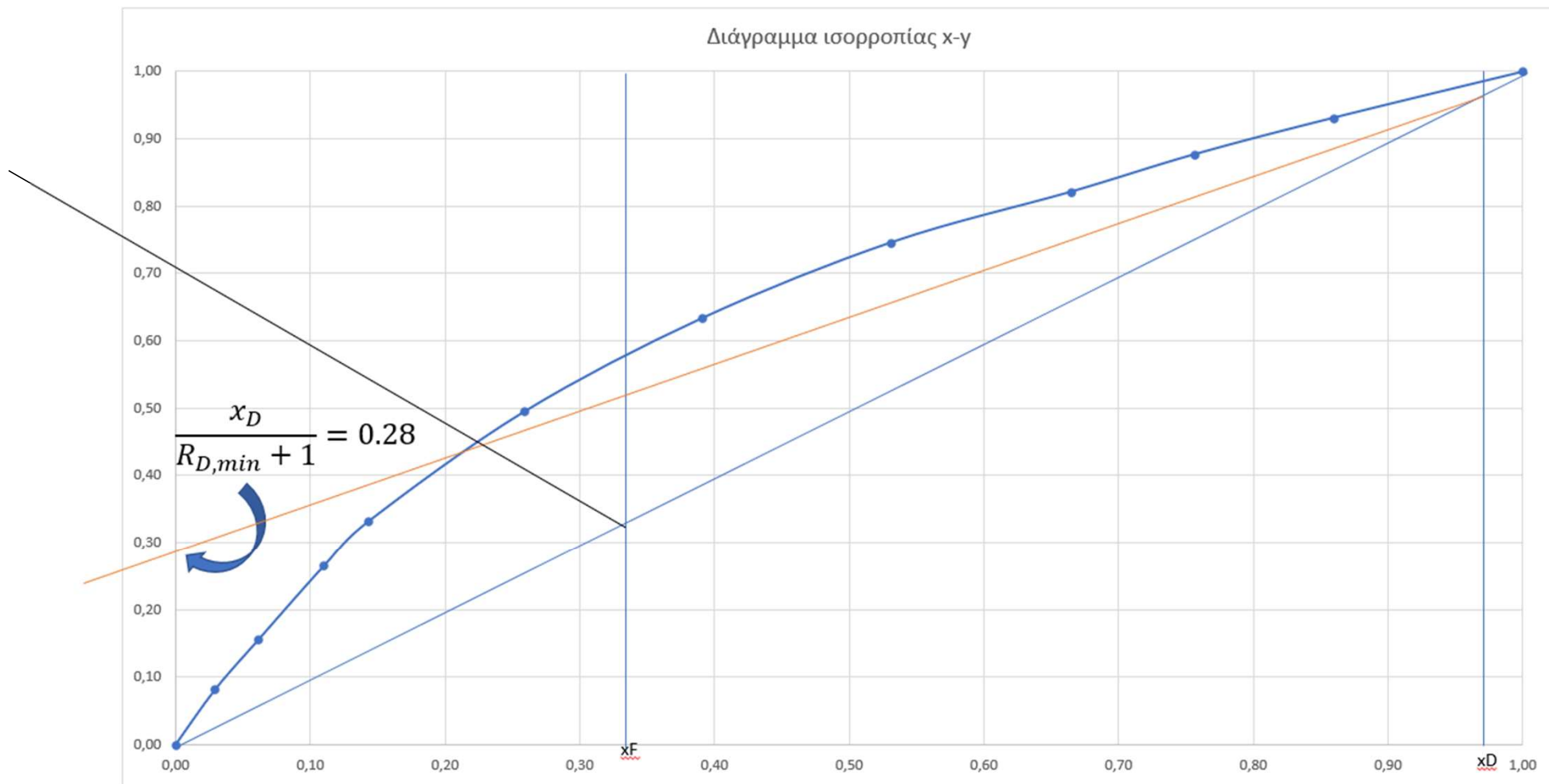
- Για την γραμμή τροφοδοσίας: $q=0.55$ (55% ως κορεσμένο υγρό).

Η γραμμή τροφοδοσίας έχει κλίση: $-\frac{q}{1-q} = -\frac{0.55}{0.45} = -1.222$ και διέρχεται από το $(x_F, x_F)=(0.33, 0.33)$.

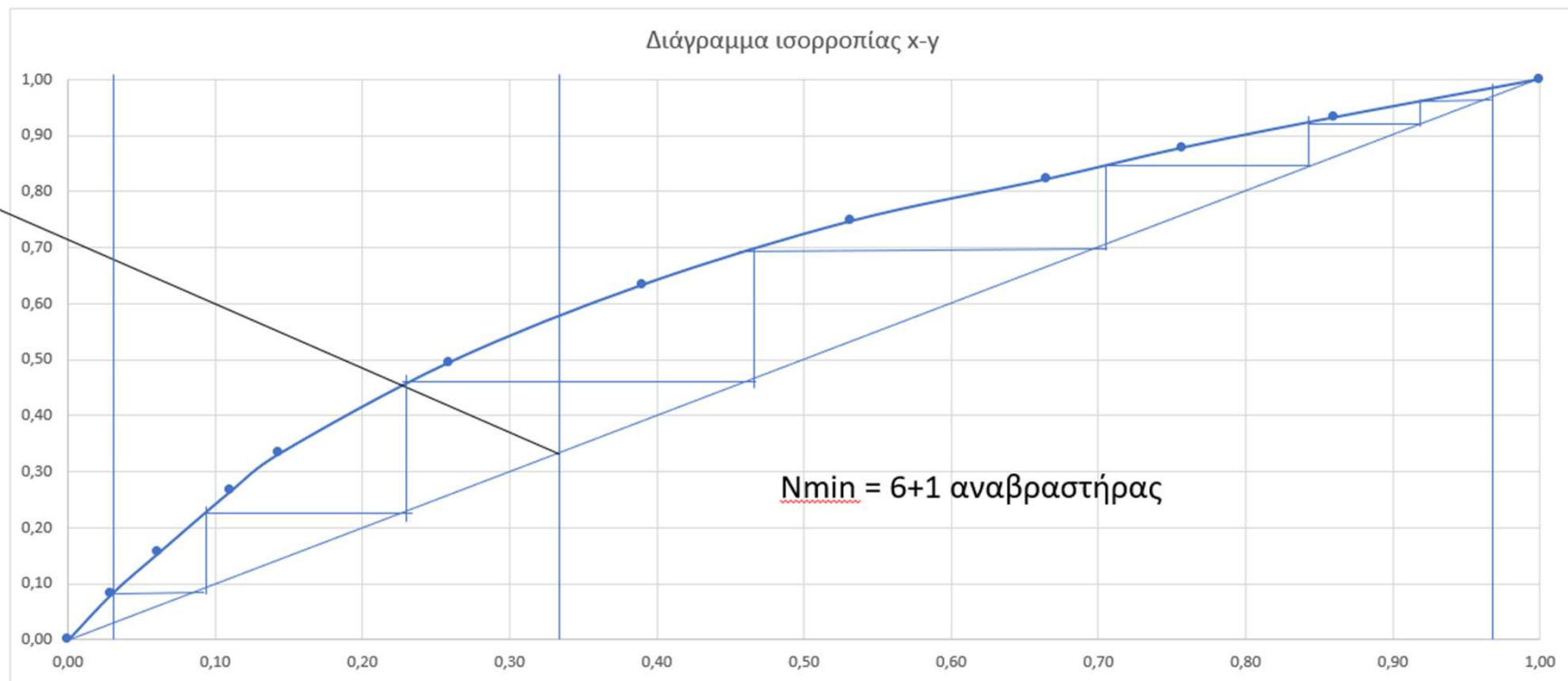
- Φέρνω την γραμμή εμπλουτισμού από το $(x_D, x_D)=(0.96, 0.96)$ και περνάει από το σημείο τομής της καμπύλης ισορροπίας με την γραμμή τροφοδοσίας.

- Η τεταγμένη βρίσκεται 0.28:

$$\frac{x_D}{R_{D,min}+1} = 0.28 \longrightarrow R_{D,min} = \frac{x_D}{0.28} - 1 = 2.428$$



Γ) Ο ελάχιστος αριθμός βαθμίδων σε ολική αναρροή γραφικά. Αφού βρείτε το N_{min} υπολογίστε το συντελεστή σχετικής πτητικότητας από την εξίσωση Fenske.



Από εξίσωση Fenske: $N_{min} = \frac{\log\left(\frac{x_D(1-x_R)}{x_R(1-x_D)}\right)}{\log(a_{AB})} - 1$ με a_{AB} μεταξύ των a_D και a_R .

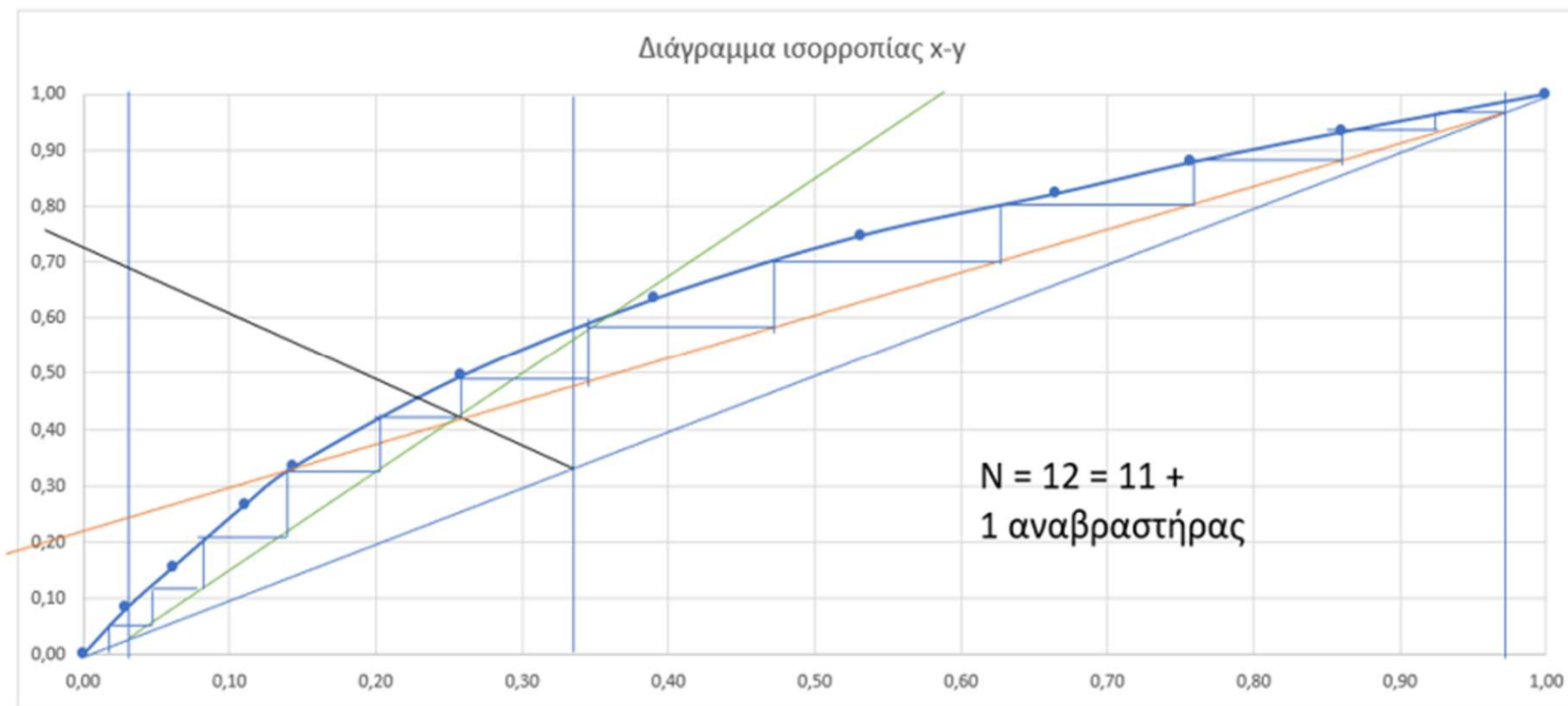
Λύνοντας:

$$\log(a_{AB}) = \frac{\log\left[\frac{0.96(1-0.03)}{0.03(1-0.96)}\right]}{7} = 0.4127$$

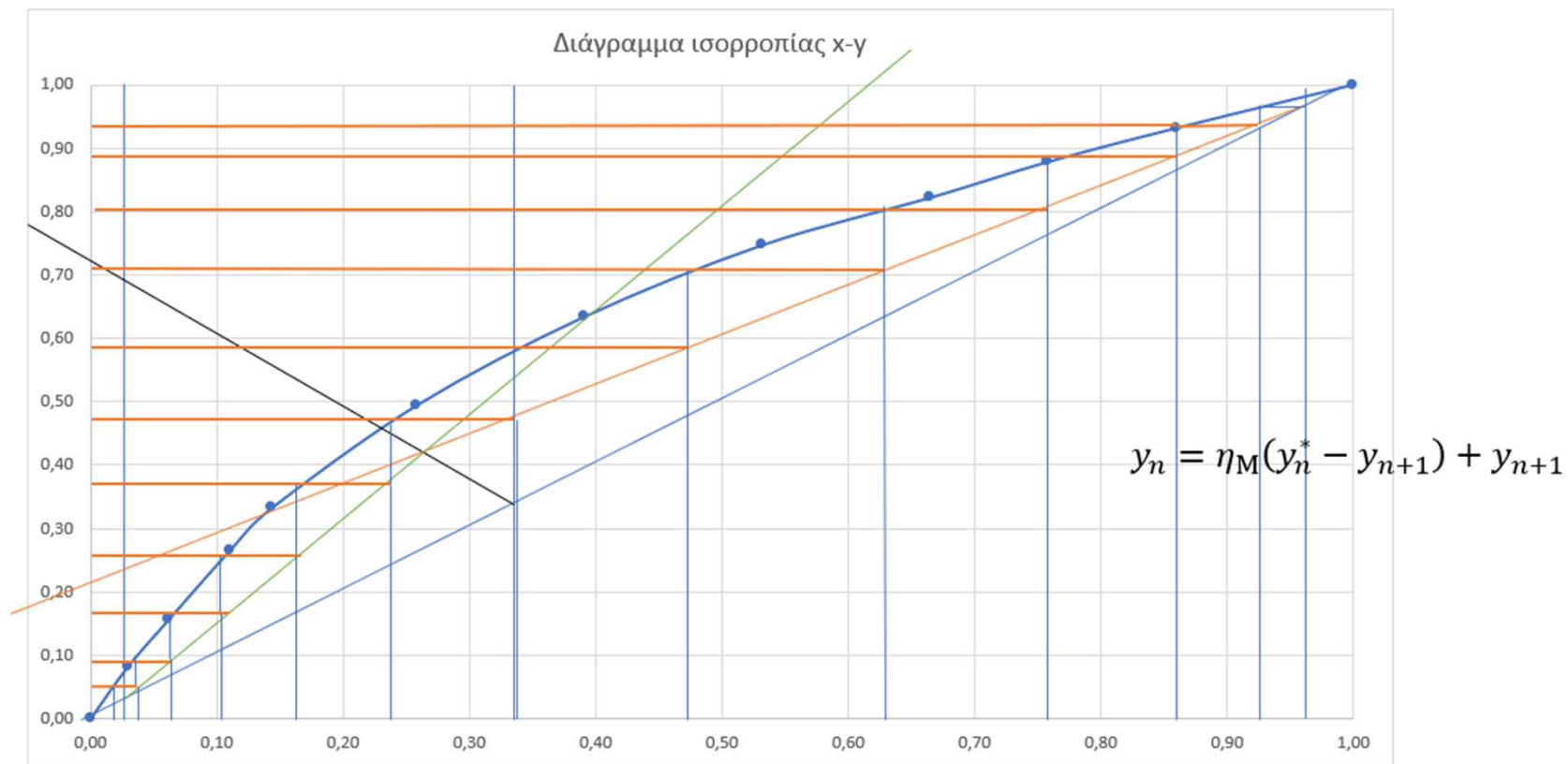
$$a_{AB} = 10^{0.4127} = 2.586$$

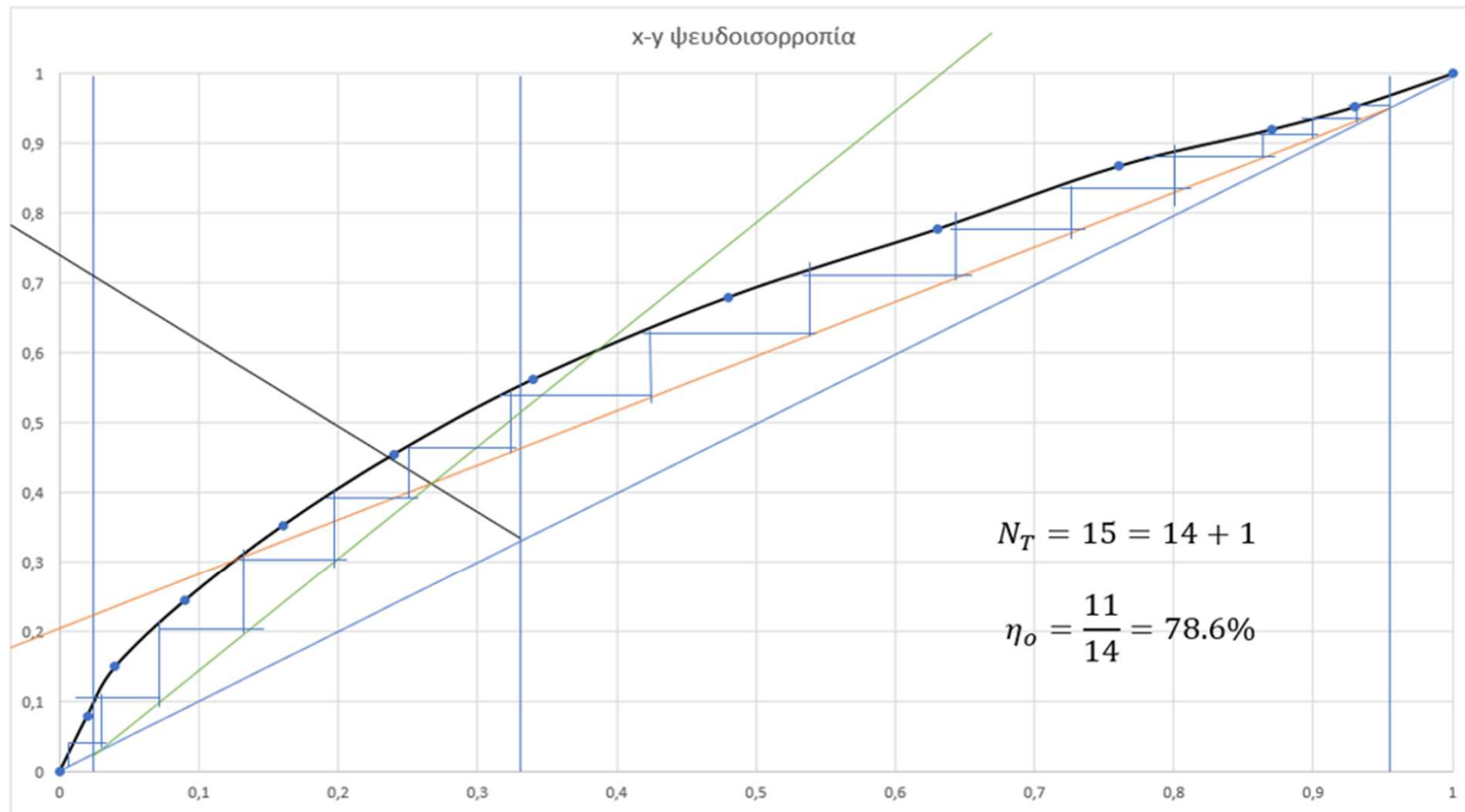
Δ) Ο συνολικός αριθμός των θεωρητικών βαθμίδων, ο αριθμός των βαθμίδων στο τμήμα εμπλουτισμού και στο τμήμα εξάντλησης και η προβλεπόμενη βαθμίδα τροφοδοσίας για πραγματικό λόγο αναρροής 50% μεγαλύτερο του ελάχιστου.

$$R_D = 1.5R_{D,min} = 3.642 \rightarrow \frac{x_D}{R_D+1} = 0.2068$$



Ε) Αν ο βαθμός απόδοσης Murphree είναι 75% υπολογίστε τον πραγματικό αριθμό βαθμίδων και τον συνολικό βαθμό απόδοσης της στήλης.





y _{th}	y _n	y _{n+1}	x _n
	1		1
0,96	0,9525	0,93	0,93
0,93	0,92	0,89	0,87
0,89	0,8675	0,8	0,76
0,8	0,7775	0,71	0,63
0,71	0,68	0,59	0,48
0,59	0,5625	0,48	0,34
0,48	0,455	0,38	0,24
0,38	0,3525	0,27	0,16
0,27	0,245	0,17	0,09
0,17	0,15	0,09	0,04
0,09	0,08	0,05	0,02
	0		0

ΣΤ) Αν το θερμαντικό μέσο είναι ατμός πίεσεως 1.36 atm ποια είναι η απαιτούμενη μαζική παροχή ατμού στον αναβραστήρα;

$$m_s = \frac{\lambda_{αν\alpha\beta} \bar{V}}{\lambda_s} \quad (1)$$

$$\lambda_{αν\alpha\beta} = \lambda_A x_R + \lambda_B (1 - x_R) = (7300 * 0.03 + 7900 * 0.97) = 7882 \frac{kcal}{kmol}$$

Για να υπολογίσουμε το $\bar{V}$ στο τμήμα εξάντλησης χρειαζόμαστε τον ορισμό του q της τροφοδοσίας:

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} \rightarrow (1 - q) = \frac{V - \bar{V}}{F} \rightarrow V - \bar{V} = (1 - q)F \rightarrow \bar{V} = V - (1 - q)F \quad (2)$$

Για το V στο τμήμα εμπλουτισμού:

$$V = L_o + D \quad (3)$$

$$R_D = L_o / D \quad (4)$$

Από τις (3) και (4):

$$V = R_D D + D = 351.658 \text{ kmol/h} \text{ και από την (2): } \bar{V} = 246.03 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$\text{Από την (1): } m_s = \frac{\lambda_{αν\alpha\beta} \bar{V}}{\lambda_s} = 3714.95 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

