

## فصل سوم

# مغزایب انتقال جرم



## ◆ Mass Transfer ◆

در حرکت درهم ، برخلاف حرکت آرام ، حرکات ذرات مایع نامنظم بوده ، قطعات بزرگ و کوچکی از سیال به نام چرخانه دارای حرکات سریع و نامنظم در جهات مختلف می باشند.

با توجه به سرعت زیاد چرخانه ها ، می توان انتظار داشت که انتقال جرم در ناحیه ای که دارای حرکت درهم است بسیار سریع و مکانیزم آن در مقایسه با مکانیزم انتقال جرم در یک محیط آرام ، که تنها شامل نفوذ مولکولی است ، کاملاً متفاوت باشد. به همین علت گرادیان غلظت در قسمتی که سیال دارای حرکت درهم است به مراتب کمتر از گرادیان غلظت در یک حرکت آرام است .



# ضرایب انتقال جرم



## Mass Transfer

برای پیش بینی شدت انتقال جرم از همان روابطی که برای نفوذ مولکولی در سیالات بدست آمده اند استفاده می گردد ، با این تفاوت که در این روابط به جای ضریبی که محتوی ضریب نفوذ مولکولی است، ضریب دیگری به نام ضریب انتقال جرم گنجانده می شود. بدیهی است که در استفاده از ضریب انتقال جرم فرض بر این است که این ضریب شامل تمام اثرات وجود چرخانه ها در شدت انتقال جرم می باشد. در معادله کلی انتقال جرم به جای مجموعه  $D_{AB}C/Z$  که مشخص کننده مکانیزم نفوذ مولکولی است، از ضریب انتقال جرمی که با  $F$  نشان داده می شود استفاده می گردد.

$$N_{AZ} = \frac{N_{AZ}}{N_{AZ} + N_{BZ}} \cdot F \cdot \ln \left[ \frac{\frac{N_{AZ}}{(N_{AZ} + N_{BZ})} - \frac{C_{A_2}}{C}}{\frac{N_{AZ}}{(N_{AZ} + N_{BZ})} - \frac{C_{A_1}}{C}} \right]$$



## Mass Transfer

در اینجا نیز نسبت  $\frac{N_{AZ}}{N_{AZ} + N_{BZ}}$  با توجه به شرایط فیزیکی موجود تعیین می گردد.

بنابر تعریف، شار  $N$  برابر با مقدار انتقال جرم به ازای واحد سطحی است که معمولاً عمود بر مسیر نفوذ اجزای می باشد. گاهی اتفاق می افتد انتقال جرم از یک سطح غیر مستوی انجام می گیرد. در این صورت مساحت عمود بر مسیر نفوذ مولکولها ثابت نبوده، با تغییر فاصله از سطح جسم غیر مستوی تغییر می نماید. در این حالت با وجود ثابت بودن مقدار انتقال جرم، شار  $N$ ، در نتیجه ضریب انتقال جرم  $F$  در سطوح مختلف، متفاوت خواهد بود.

ضریب  $F$  یک ضریب انتقال جرم موضعی است که برای نقطه معینی در روی فصل مشترک دو فاز تعریف می شود. از آنجا که  $F$  تابع ویژگیها و نحوه حرکت فازها در فصل مشترک است، ثابت نبوده بلکه در امتداد فصل مشترک تغییر می کند. بدین جهت در برخی از موارد می توان به جای  $F$  از مقدار متوسط آن یعنی  $F_M$  استفاده کرد.



## Mass Transfer

در انتقال جرم در مخلوط های دو جزئی، با توجه به شدت انتقال هر جزء نسبت به جزء دیگر، دو حالت مختلف غالباً مورد نظر قرار می گیرد. یکی از این دو حالت انتقال یک جزء به درون یک محیط ساکن و حالت دیگر انتقال متقابل اجزاء با شدت مولی مساوی است. در این دو حالت، برای بیان مقدار انتقال جرم می توان به جای  $F$  از ضرایب انتقال جرم ویژه استفاده نمود.

**(نیروی محرکه) (ضریب انتقال جرم) = شار**

حالات زیر نمونه هایی از ضرایب انتقال جرم که استفاده از آنها متداول می باشد، تعریف می شود.  
در حالت اول انتقال جزء  $A$  بدرون جزء ساکن  $B$  ( $N_B=0$ )، ضرایب انتقال جرم در فاز گاز و یا در فاز مایع طبق روابط زیر تعریف می شود.

$$N_{AZ} = K_G (P_{A_1} - P_{A_2}) = k_y (y_{A_1} - y_{A_2}) = k_c (c_{A_1} - c_{A_2}) = k_x (x_{A_1} - x_{A_2}) = k_L (c_{A_1} - c_{A_2})$$





## Mass Transfer

در حالت دوم انتقال اجزای A و B با شدت مولی مساوی...

$$N_{AZ} = K'_G(P_{A_1} - P_{A_2}) = k'_y(y_{A_1} - y_{A_2}) = k'_c(c_{A_1} - c_{A_2}) = k'_x(x_{A_1} - x_{A_2}) = k'_L(c_{A_1} - c_{A_2})$$

در حالتی که برای گازها

$$F = \frac{D_{AB} \cdot P_t}{RTZ} \quad \text{و} \quad k_G = \frac{D_{AB} \cdot P_t}{RTP_{BM}Z} \quad \text{می باشد.}$$

و یا  $F = k_G \cdot P_{BM}$

در حالتی که نفوذ متقابل دو جزء با شدت مولی مساوی انجام می گیرد، مقدار  $N_A + N_B$  برابر با صفر بوده و در نتیجه سرعت متوسط فاز گاز نیز برابر با صفر می باشد و به این جهت در این حالت، ضریب عمومی F برای گازها برابر با  $k'_Y$  و برای مایعات برابر با  $k'_X$  می گردد.



# ضرایب انتقال جرم در حرکت آرام





## Mass Transfer

انتقال جرم در حرکت آرام توسط مکانیزم نفوذ مولکولی انجام می گردد ، و در این گونه موارد به جای تعریف ضریب انتقال جرم و تعیین مقدار آن وجود ندارد.

### روابط موجود بین ضریب انتقال جرم برای گازها

واحد ضریب	معادله شدت	
	نفوذ جزء A در جزء ساکن	نفوذ متقابل اجزاء با شدت مولی مساوی
مول بر زمان در سطح در فشار	$N_A = k_G \Delta P_A$	$N_A = k'_G \Delta P_A$
مول بر زمان در سطح در جزء مولی	$N_A = k_Y \Delta Y_A$	$N_A = k'_Y \Delta Y_A$
مول بر زمان در سطح در مول بر حجم	$N_A = k_C \Delta C_A$	$N_A = k'_C \Delta C_A$
جرم بر زمان در سطح در نسبت جرم A به جرم B	$W_A = k_Y \Delta Y_A$	



## روابط موجود بین ضریب انتقال جرم برای مایعات

واحد ضریب	معادله شدت	
	نفوذ جزء A در جزء ساکن	نفوذ متقابل اجزاء با شدت مولی مساوی
مول بر زمان در سطح در مول بر حجم	$N_A = k_L \Delta C_A$	$N_A = k'_L \Delta C_A$
مول بر زمان در سطح در واحد جزء مولی	$N_A = k_X \Delta X_A$	$N_A = k'_X \Delta X_A$



روابط تبدیل ضریب انتقال جرم فاز گاز به یکدیگر :

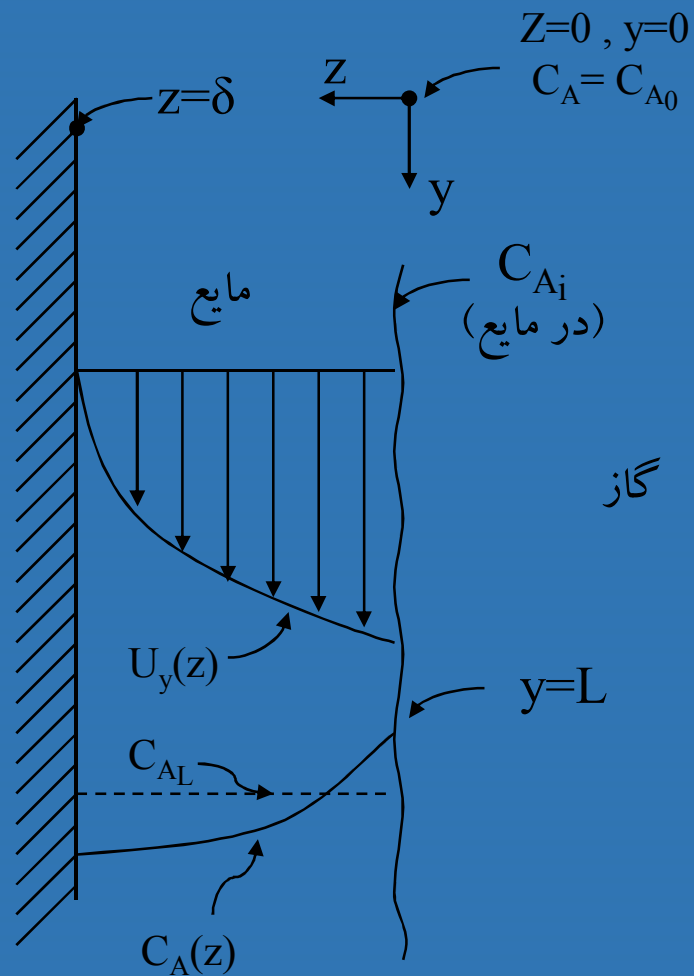
$$F = k_G P_{BM} = k_y \frac{P_{BM}}{P_t} = k_C \frac{P_{BM}}{R T} = \frac{k_y}{M_B} = k'_G \cdot P_t = k'_y = k'_C \frac{P_t}{R T} = k'_C \cdot C_A$$

روابط تبدیل ضریب انتقال جرم مایعات به یکدیگر :

$$F = k_x x_{BM} = k_L x_{BM} C = k'_L \cdot C = k'_L \left( \frac{\rho}{M} \right) = k'_x$$



# Mass Transfer



لایه مایع در حرکت آرام



# ضرایب انتقال جرم در حرکت درهم



## ◆ Mass Transfer ◆

حرکت سیالات در اکثر دستگاههای صنعتی در حالت درهم است. ولی متأسفانه به خاطر عدم آشنائی کامل به مکانیزم حرکت درهم، ضریب انتقال جرم به روش تحلیلی، به روشی که برای حرکت آرام امکان پذیر است، مقدور نمی باشد.

به منظور توجیه مکانیزم انتقال جرم در حرکت درهم، نظریه های مختلفی پیشنهاد گردیده است که در این میان نظریه لایه مؤثر (Film Theory)، نظریه تداخل (Penetration Theory)، نظریه جایگزین سطحی (Surface Theory) اشاره کرد.



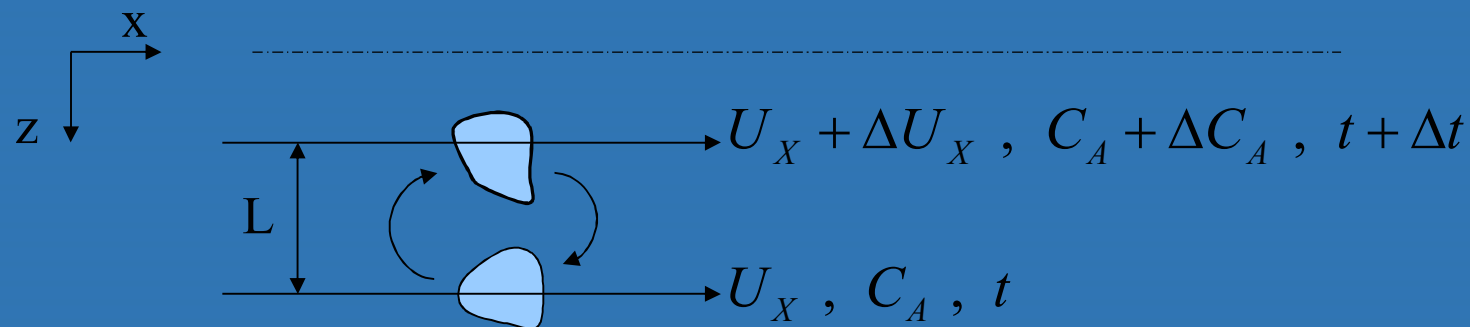
# نفوذ چرخانه ای (Eddy Diffusion)





## Mass Transfer

حرکت درهم به خاطر وجود حرکات نامنظم ذرات، قطعات و لخته های کوچک و بزرگ سیال که چرخانه نامیده می شود از حرکت آرام متمایز می باشد. حرکت چرخانه ها علاوه بر جهات مختلف در فضا در زمانهای مختلف نیز نامنظم است. به خاطر حرکت چرخانه ها اختلالاتی در مقدار سرعت سیال بوجود می آید.



فاصله اختلاط پرانتل :  $L$



## Mass Transfer

$$\tau = -\mu \frac{du}{dz}$$

برای جریان آرام

$$\tau = -(\mu + \eta) \frac{du}{dz}$$

برای جریان نا آرام

$$\eta = -\rho l^2 \frac{du}{dz}$$

ویسکوزیته گردابی

$\mu$  :

ویسکوزیته مولکولی سیال

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

Shear Stress Velocity

$$\tau = -\left(\mu - \rho l^2 \frac{du}{dz}\right) \frac{du}{dz} = -\mu \frac{du}{dz} + \rho l^2 \left(\frac{du}{dz}\right)^2 = -\left[\mu - \rho l^2 \left(-\frac{du}{dz}\right)\right] \frac{du}{dz} =$$

$$= -\left(\frac{\mu}{\rho} + E_v\right) \frac{d(u\rho)}{dz} = -(\nu + E_v) \frac{d(u\rho)}{dz}$$



## ◆ Mass Transfer ◆

$E_D$  مقداری است که بستگی به میزان درهم بودن حرکت یعنی شدت حرکت چرخانه ها در سیال دارد و در نتیجه بر حسب موضع سیال تغییر می کند. در حرکت درون یک کانال، در نزدیکی های دیواره به علت از بین رفتن چرخانه ها مقدار  $E_D$  در مقایسه با  $u$  بسیار کوچک است و در نتیجه گرانیروی سینماتیک تعیین کننده مقدار انتقال مقدار حرکت می باشد. برعکس در نواحی نزدیک به وسط کانال، شدت حرکت چرخانه ها و میزان درهم بودن حرکت بیشتر و مقدار  $E_D$  در مقایسه با  $u$  بسیار زیاد است و در نتیجه مقدار  $E_D$  تعیین کننده مقدار انتقال مقدار حرکت می باشد.

$$J_A = -(D_{AB} + E_D) \frac{dC_A}{dz}$$

با توجه به تشابه پدیده های انتقال می توان نوشت:

$E_D$ : ضریب نفوذ جرم به خاطر حرکت درهم (ضریب نفوذ چرخانه ای)



## ◆ Mass Transfer ◆

نظیر آنچه در مورد ضرایب انتقال مقدار حرکت ( $E_D$ ) گفته شد، در انتقال جرم نیز ضریب مولکولی در شرایط ثابت مقدار ثابتی بوده ، از نقطه ای به نقطه دیگر در داخل سیال تغییر نمی کند. در نزدیکی های دیواره یک کانال ، اثر  $D$  در انتقال جرم بیشتر از  $E_D$  می باشد در حالی که در نواحی وسط کانال ، به علت بیشتر بودن شدت حرکت درهم ،  $E_D$  عامل مهمتری برای انتقال جرم می باشد.

به همین ترتیب برای انتقال حرارت می توان نوشت:

$$q = -(\alpha + E_H) \cdot \frac{d(\rho C_p t)}{dz}$$

در نتایج آزمایشگاهی حاصل از حرکت سیالات معمولی در لوله ها ، نسبت های  $E_D/E_H$  و  $E_H/E_D$  بین 1.2 و 1.8 متغیر بوده ، دارای تغییرات موضعی است.



## Mass Transfer

همان طور که برای پدیده های انتقال مولکولی نسبت ضرایب مولکولی دارای اهمیت ویژه ای می باشند ، در انتقال درهم نیز نسبت های ضرایب مربوطه دارای مفاهیم مهمی است. مثلاً ، مشابه با عدد اشمیت مولکولی  $Sc = \nu / D_{AB}$  ، می توان عدد اشمیت مربوط به حرکت درهم را به صورت  $E_\nu / E_D$  و یا عدد اشمیت کلی را به صورت  $(\nu + E_\nu) / (D_{AB} + E_D)$  تعریف نمود. مقایسه نسبت ضریب کلی به ضریب مولکولی از نظر توجیه فیزیکی پدیده انتقال اهمیت زیادی دارد. این نسبت برای هر یک از سه پدیده انتقال به قرار زیر است.

$$\frac{\nu + E_\nu}{\nu} = 1 + \frac{E_\nu}{\nu}$$

$$\frac{\alpha + E_H}{\alpha} = 1 + Pr \frac{E_H}{\nu}$$

$$\frac{D + E_D}{D} = 1 + Sc \frac{E_\nu}{\nu}$$



## ◆ Mass Transfer ◆

هر کدام از این نسبت ها نشان دهنده اهمیت نسبی حرکت درهم با حرکت آرام در یک عمل انتقال است. مثلاً در نزدیکی فصل مشترک سیال با یک سطح جامد، حرکت چرخانه ها بسیار خفیف و در نتیجه آن شدت حرکت درهم بسیار ضعیف است.

در حالت ویژه ای که  $Pr = Sc = 1$  باشد ضریب کل انتقال برای هر سه پدیده انتقال مقدار حرکت ، حرارت و جرم یکسان بوده ، حرکات درهم اثرات مشابهی در هر سه پدیده انتقال خواهد داشت.

