

"بررسی مکانیزم انتقال جرم در حین تشکیل قطره در رژیم جت و در فرآیند استخراج مایع-مایع"

داریوش باستانی، ندا صحرائیان

First Author E_mail :Bastani@sharif.edu

چکیده

در فرآیند استخراج مایع-مایع، در مرحله تشکیل قطره بسته به میزان دبی فاز پراکنده معمولاً دو رژیم جریانی مختلف وجود دارد، که عبارتند از رژیم قطره و رژیم جت. در این تحقیق مکانیزم انتقال جرم در رژیم جت برای سیستمهای با تنش بین فازی بالا بررسی شده است. به این منظور ضریب انتقال جرم در جت محاسبه شد و ضریب انتقال جرم فاز پیوسته برای برجهای RDC نیز محاسبه گردید. با استفاده از ضریب کلی انتقال جرم، غلظت ماده منتقل شونده در انتهای جت محاسبه گردید و برای بدست آوردن قطر قطره حاصل از شکست جت، از روابط موجود استفاده شده است. در پایان مقایسه ای بین ضرایب انتقال جرم در دو رژیم جت و قطره صورت گرفت که حاکی از بالاتر بودن ضریب انتقال جرم در رژیم جت نسبت به قطره است. (برای $t > 0.05s$ و سیستم مورد نظر)

واژه های کلیدی: تشکیل قطره، رژیم جت، استخراج مایع-مایع

مقدمه:

مایع عمدتاً به منظور انتقال حرارت و استخراج مایع-مایع مورد استفاده قرار می گیرد. [3]

محققان برای بررسی انتقال جرم در قطرات در رژیم جت چهار مرحله در نظر گرفته اند. انتقال جرم در حین تشکیل جت، انتقال جرم در حین تشکیل قطره ناشی از شکست جت، انتقال جرم در حین صعود قطره و انتقال جرم هنگام ائتلاف قطرات. گرچه نتایج تحقیقات نشان می دهد حدود 15٪ از کل انتقال جرم مربوط به مراحل اول و دوم است ولی برای طراحی یک برج استخراج مناسب یا پیشگویی میزان استخراج لازم است مکانیزم انتقال جرم در مرحله تشکیل جت و قطره به خوبی شناخته شود، لذا بررسی مو شکافانه این مرحله ضروری به نظر می رسد.

در دستگاههای استخراج مایع-مایع که فاز پراکنده به صورت قطره در فاز پیوسته توزیع می شود، بسته به میزان دبی فاز پراکنده سه رژیم جریان وجود دارد. در دبی کم در سوراخها قطره تشکیل می شود (رژیم ژل)، با افزایش دبی و رسیدن به یک دبی بحرانی جت از سوراخ خارج می شود. اگر باز هم دبی افزایش یابد طول جت زیادتر می شود و پس از رسیدن به یک حداکثر طول با افزایش بیشتر دبی فاز پراکنده طول جت کاهش می یابد و در نهایت به جای جت قطرات بسیار ریزی تشکیل میشوند [1]. تجربه نشان می دهد که راندمان استخراج در رژیم جت بیشتر است [2]. به همین دلیل در بسیاری از فرآیندهای صنعتی رژیم جریانی، رژیم جت است که این رژیم در سیستمهای مایع-

مدل انتقال جرم:

اگر به همین منوال موازنه جرم ماده A نوشته شود، معادله پیوستگی جزء منتقل شونده (A) به صورت زیر در خواهد آمد (شکل ۳):

$$\frac{\partial n_{Ay}}{\partial x} + \frac{\partial \rho_A}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r n_{Ar})}{\partial r} \right) \quad (3)$$

که در آن:

$$n_{Ar} = D_{AD} \frac{\partial \rho_A}{\partial r} - V \rho_A \quad (4)$$

$$n_{Ay} = -D_{AD} \frac{\partial \rho_A}{\partial r} + U \rho_A \quad (5)$$

اگر روابط 4,5 در رابطه 3 جایگذاری شوند و از رابطه (2) نیز استفاده شود رابطه 3 به صورت زیر در می آید:

$$U \frac{\partial \rho_A}{\partial x} + V \frac{\partial \rho_A}{\partial r} = D_{AD} \left(\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho_A}{\partial r} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} \right) \quad (6)$$

اگر از نفوذ محوری و سرعت در جهت x صرف نظر شود، رابطه 6 به فرم زیر در خواهد آمد:

$$U \frac{\partial \rho_A}{\partial x} = D_{AD} \left(\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho_A}{\partial r} \right) \quad (7)$$

اگر معادله (7) به روش تفکیک متغیرها حل شود رابطه ای برای توزیع غلظت بدست خواهد آمد:

فرضیاتی که در این مدل در نظر گرفته می شود عبارتند از :

۱. غلظت ماده منتقل شونده در سطح جت غلظت تعادلی است و در طول جت ثابت فرض می شود.
۲. توزیع سرعت در جت پیوستنی (پلاگ) فرض می شود.
۳. غلظت ماده منتقل شونده در فاز پیوسته در مجاورت جت، غلظت خروجی فاز پیوسته در نظر گرفته می شود.
۴. ضرایب نفوذ، دانسیته ها و ویسکوزیته های دو فاز ثابت فرض می شوند.
۵. سیستم مورد نظر سیستمی با تنش بین فازی زیاد است.
۶. جهت انتقال جرم از فاز پیوسته به پراکنده است.

جهت بررسی انتقال جرم در مرحله ای که جت تشکیل می شود یک جت، استوانه ای در نظر گرفته می شود که سیال به آرامی درون آن جریان دارد. برای محاسبه توزیع غلظت در جت لازم است معادلات پیوستگی جزء منتقل شونده و سرعت به طور همزمان حل شوند [4]. با توجه به اینکه جت از سوراخ تشکیل می شود توزیع سرعت پیوستنی فرض می شود. با در نظر گرفتن یک پوسته استوانه ای در جت (شکل (۱)) و نوشتن موازنه جرم روی آن همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، معادله پیوستگی کل بدست می آید. اگر U سرعت در جهت y و V سرعت در جهت x باشد، معادله پیوستگی به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{r} + \frac{\partial V}{\partial r} \right) + U \frac{\partial \rho}{\partial x} + V \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

که در حالت یکنواخت (S.S) و دانسیته کل ثابت را بطه به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} = 0 \quad (2)$$

در این رابطه Sh_{mj} عددشروود متوسط در طول جت است و پنج جمله اول سری در نظر گرفته می شود. در مواردیکه طول جت به اندازه ای باشد که به دیسک چرخان برخورد نکند γ همان L_j در نظر گرفته می شود در غیر این صورت γ ، فاصله توزیع کننده تا اولین دیسک چرخان از پایین برج است. برای محاسبه طول جت از رابطه ارائه شده توسط Skelland&Huang [2] که برای سیستمهایی با تنش بین فازی زیاد است، استفاده می شود.

$$\frac{L_j}{D_h} = 5.0767(\Delta We)^{0.5499} \left(\frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{0.5245} \quad (12)$$

$$\Delta We = \frac{(U^2 - U_j^2) D_j \rho_d}{\sigma} \quad (13)$$

سرعت تشکیل جت پس از موازنه نیروها روی جت از رابطه زیر به دست می آید [5]

$$U_j = 2 \left[\frac{\sigma}{\rho_d D_h \left(1 - \frac{D_h}{D_f} \right)} \right]^{0.5} \quad (14)$$

در رابطه (14) قطر قطره ای است که اگر جت تشکیل نمی شد، تشکیل می شد. پس از موازنه نیروهای وارد شده به قطره، حجم این قطره به دست می آید [5]. با توجه به اینکه توزیع سرعت، پیستونی فرض شده است و نیروی دراگ با توجه به کم بودن ویسکوزیته فاز پیوسته برای این سیستم ناچیز است، رابطه حجم قطره به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{(\rho_{AD2} - \rho_{AD1})}{(\rho_{ADE} - \rho_{AD1})} = \left(1 - 4 \sum a_i \exp \left[\frac{-2a_i^2 \left(\frac{y}{R_j} \right)}{\text{Re.Sc}} \right] \right) \quad (8)$$

در رابطه (8) ρ_{AD2} غلظت متوسط در توده سیال است که میانگین مقدار ρ_{AD} در نقطه 2 و در فاصله شعاعی 0 تا R_j می باشد. این مقدار متوسط برای توزیع سرعت پیستونی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho_{AD2} = \frac{2}{R_j^2} \int_0^{R_j} \rho_A r dr \quad (9)$$

برای محاسبه عدد شروود روی کل جت موازنه جرم نوشته می شود و نیروی محرکه انتقال جرم، متوسط لگاریتمی نقاط 1,2 در نظر گرفته می شود که رابطه موازنه جرم روی کل جت به صورت زیر است:

$$\frac{\pi D_j^2 U}{4} (\rho_{AD2} - \rho_{AD1}) = K_{djm} (\pi D_j L_j) \times \frac{[(\rho_{AE} - \rho_{AD1}) - (\rho_{AE} - \rho_{AD2})]}{\text{Ln} \left[\frac{(\rho_{AE} - \rho_{AD1})}{(\rho_{AE} - \rho_{AD2})} \right]} \quad (10)$$

با استفاده از رابطه (10) رابطه ای برای عدد شروود متوسط بدست خواهد آمد.

$$Sh_{mj} = \frac{k_{djm} D_j}{D_{AD}} = 0.25 \left(\frac{D_j}{L_j} \right) \text{Re.Sc.}$$

$$\text{Ln} \left[4 \sum_{i=1}^5 a_i^{-2} \exp \left[\frac{-2a_i^2 \left(\frac{y}{R_j} \right)}{\text{Re.Sc}} \right] \right]^{-1} \quad (11)$$

for $Re m < 67400$
 $P_c = 6.78 N^3 D^5 \rho_c Re m^{-0.155}$ (18)

for $Re m > 67400$
 $P_c = 0.069 N^3 D^5 \rho_c Re m^{-0.155}$ (19)

$$Re m = \frac{ND^2 \rho_c}{\mu_c} \quad (20)$$

پس از محاسبه ضرایب فردی انتقال جرم فازها ضریب کلی انتقال جرم طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\frac{1}{K_{odj}} = \frac{1}{k_{djm}} + \frac{m}{k_c} \quad (21)$$

برای تعیین غلظت ماده منتقل شونده در انتهای جت روی پوسته ای استوانه ای از جت به ارتفاع Δy و ضخامت Δr موازنه جرم نوشته می شود (شکل ۳):

$$\left(\frac{\pi D_j^2}{4} \right) U d \rho_{AD} = K_{odj} \pi D_j (\rho_{AE} - \rho_{AD}) dy \quad (22)$$

از رابطه بالا پس از انتگرال گیری ρ_{AD2} بدست می آید:

$$\rho_{AD2} = \frac{(\rho_{AE} \exp(w) - \rho_{AE} + \rho_{AD1})}{\exp(w)} \quad (23)$$

که در این رابطه w برابر است با:

$$w = \left(\frac{4L_j}{UD_j^2} \right) D_{AD} Sh_{mj} \quad (24)$$

برای محاسبه قطر قطرات ناشی از شکست جت از رابطه زیر استفاده می شود [2]:

$$\frac{D_d}{D_{jm}} = 3.0704 - 0.1701 \left(\frac{U}{U_m} \right) + 0.0487 \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 \quad (25)$$

$$V_f = F \left[\frac{\pi \sigma D_h}{g \Delta \rho} - \frac{\rho_d Q_d U}{g \Delta \rho} + 4.5 \left(\frac{Q_d^2 D_h^2 \rho_d \sigma}{(g \Delta \rho)^2} \right)^{0.3333} \right] \quad (15)$$

در رابطه (15) پارامتری است که حجمی از قطره که پس از جدا شدن روی سوراخ باقی می ماند را تصحیح می کند. برای بدست آوردن این پارامتر از نموداری که توسط Harkins & Brown [5] ارائه شده است استفاده می شود. روندی که برای بدست آوردن D_f طی می شود به شرح زیر است:

۱. به عنوان حدس اولیه انرژی جنبشی سیال صفر در نظر گرفته می شود. ($Q = 0$)
۲. از نمودار، F بدست می آید.
۳. از رابطه 15، D_f بدست می آید
۴. از رابطه 14، U_j بدست می آید
۵. دبی فاز پراکنده هنگامیکه جت تشکیل می شود از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_{dj} = U_j \left(\frac{\pi D_h^2}{4} \right) \quad (16)$$

۶. به جای U و Q_d در رابطه 15، U_j و Q_{dj} جایگذاری می شوند.

۷. یکبار دیگر مراحل ۱ تا ۴ بادر نظر گرفتن سایر جملات رابطه 15 تکرار می شود.

(چون U_j زود همگرا می شود، نیازی به تکرار بیشتر مراحل وجود ندارد)

برای محاسبه ضریب انتقال جرم فاز پیوسته از رابطه ارائه شده توسط Calderbank & Moo-Young استفاده می شود. که توسط بسیاری از محققین توصیه شده است [6]:

$$k_c = 0.13 \left[\frac{4P_c}{\pi D_c^2 h_c} \right]^{0.25} \frac{D_{AC}^{0.6666} \rho_c^{0.3333}}{\mu_c^{0.417}} \quad (17)$$

بیشتر است. نمودار ۷ تغییرات ضریب انتقال جرم با طول جت را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود یک افت شدید در ضریب انتقال جرم هنگامیکه طول جت کمتر از حدود 1.9 (cm) است رخ می دهد و سپس این ضریب با افزایش طول جت ثابت می شود. حداکثر ضریب انتقال جرم در نمودار مزبور مربوط به طول جت (0.2525 cm) است. چون ارتفاع جت در این نقطه بسیار کم است. بایک تقریب خوب می توان جت استوانه ای را معادل یک کره در نظر گرفت. تا مقایسه ای بین دو رژیم قطره و جت صورت گیرد. در مراجع روابطی برای ضرایب انتقال جرم حین تشکیل قطره ارائه شده است. از بین آنها رابطه ارائه شده توسط [8] Heertjes و همکاران انتخاب می شود که عبارت است از:

$$k_{df} = \frac{24}{17} \left(\frac{D_{AD}}{\pi t_f} \right)^{0.5} \quad (27)$$

در سیستمهای استخراج مایع-مایع زمان تشکیل قطره معمولاً کسری از ثانیه است. به همین دلیل زمان تشکیل قطره حداکثر یک ثانیه فرض می شود. همانطور که جدول (۲) و شکل (۷) نشان می دهند. اگر زمان تشکیل قطره بیشتر از 0.05s باشد، ضرایب انتقال جرم در رژیم جت کلاً بیشتر است و اگر قرار باشد به جای کوچکترین جت تشکیل شده قطره تشکیل شود زمان تشکیل آن باید 0.001s باشد (شکل (۷)) تا ضریب انتقال جرم آن تقریباً معادل ضریب انتقال جرم در انتهای جت شود.

علائم و نشانه ها :

Sh_{mj} : عدد شروود متوسط در جت

k_{djm} : ضریب انتقال جرم در جت

K_{odj} : ضریب انتقال جرم کلی در جت

D_j : قطر جت

R_j : شعاع جت

L_j : طول جت

Re : عدد رینولدز

$$U_m = 2.69 \times \left(\frac{D_{jm}}{D_h} \right)^2 \left[\frac{\sigma}{D_{jm} (0.5137 \rho_d + 0.4719 \rho_c)} \right]^{0.5} \quad (26)$$

به منظور بررسی نحوه تغییرات ضرایب انتقال جرم و غلظت ماده منتقل شونده با طول جت و دبی فاز پراکنده و سایر پارامترها و خواص فیزیکی نرم افزاری با نام Jetting condition. for نوشته شد. سیستم مورد استفاده سیستم تولوئن-استن-آب است که سیستمی با تنش بین فازهای زیاد است. به این منظور دو برج کوچک و بزرگ انتخاب شدند. که ابعاد آنها در جدول (۱) آورده شده است. اطلاعات و دادهای تجربی مورد نیاز توسط Bastani ارائه شده است.

برای برج بزرگ از دو نوع توزیع کننده استفاده شده است. توزیع کننده اول 85 سوراخ به قطر 0.11 (cm) دارد و توزیع کننده دوم 33 سوراخ به قطر 0.176 (cm) دارد. توزیع کننده برج کوچک 19 سوراخ به قطر 0.08 (cm) دارد. شرایط عملیاتی دو برج اطلاعات ورودی مورد نیاز نرم افزار تهیه شده است.

بحث و نتیجه گیری:

نتایج اجرای برنامه در نمودارهای ۴ تا ۹ آورده شده است. نمودار ۴ تغییرات طول جت با عدد رینولدز را نشان می دهد در نمودارهای ۵ و ۶ تغییرات طول جت با دبی نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رفت نمودارهای ۴ و ۵ و ۶ نشان می دهند با افزایش عدد رینولدز و دبی فاز پراکنده طول جت افزایش میابد. نمودارهای ۸ و ۹ تغییرات قطر متوسط با دبی را نشان می دهند. در این نمودارها قطر متوسط محاسبه شده توسط Bastani [7] با قطر متوسطی که در این تحقیق بدست آمده است مقایسه شده است و همانطور که مشاهده می شود قطر متوسط پیش گویی شده توسط این تحقیق از قطر متوسط ارائه شده توسط Bastani

مراجع:

1.,A.H.P.Skelland & K.R.Johnson
The Canadian Journal of chemical
Engineering, Vol.52, 732,1974

2. A.H.P.Skelland & Y-F Huang
AIChE Journal, vol.23, No.5, 701,1977

3.S.Homma,J.Koga &S.Matsumoto
Department of Applied Chemistry
Saitama University,JAPAN
G.Tryggvason
Department of Mechanical Engineering
& Applied Mechanics, University of
Michigan, Eighth International
Conference on Liquid Atomization
and Spray Systems,Pasadena
CA,USA,July 2000

4. A.H.P Skelland,D iffusional
Mass Transfer,1974

5.George F.Scheele and Bernard
J.Meister,AIChE Journal,Vol.14
,No.1, 9,1968

6. J.C.Godfrey,M.J.Slater
Liquid-Liquid Extraction
Equipment,1994

7.Bastani .D,Ph.D.Thesis,University
of Manchester,Institute of Science &
Technology ,1990

8.Heertjes,P.M.,W.A.Holve,&
H.Talsma,Chem.Eng.Sci,3,122,1955

Sc:عدد اشمیت

D_{AD} : ضریب نفوذ ماده منتقل شونده در جت

D_{AC} : ضریب نفوذ ماده منتقل شونده در فاز پیوسته

a_i : پارامترهای ثابت که مقدارشان برای i از 1 تا

5 در مرجع [4] آورده شده است.

γ : فاصله عمودی جت از سوراخ

D_h : قطر سوراخ

Δwe : تغییرات عدد وبر

U : سرعت جت در سوراخ

U_j : سرعت تشکیل جت

P_c : توان ورودی به هر بخش برج

D_c : قطر ستون

h_c : ارتفاع هر بخش

D : قطر دیسک

ρ_{AE} : دانسیته جزء منتقل شونده در تعادل با فاز پیوسته

ρ_{AD1} : دانسیته ورودی جزء منتقل شونده در فاز پراکنده

ρ_{AD2} : دانسیته جزء منتقل شونده در انتهای جت

D_d : قطر متوسط قطره حاصل از شکست جت

t_f : زمان تشکیل قطره

k_{df} : ضریب انتقال جرم قطره

k_c : ضریب انتقال جرم فاز پیوسته

n_{Ay} : شار جرمی جزء منتقل شونده در راستای y

N : تعداد دور در دقیقه

Re_m : رابطه 10

m : شیب خط تعادل

n_{Ar} : شار جرمی جزء منتقل شونده در راستای r

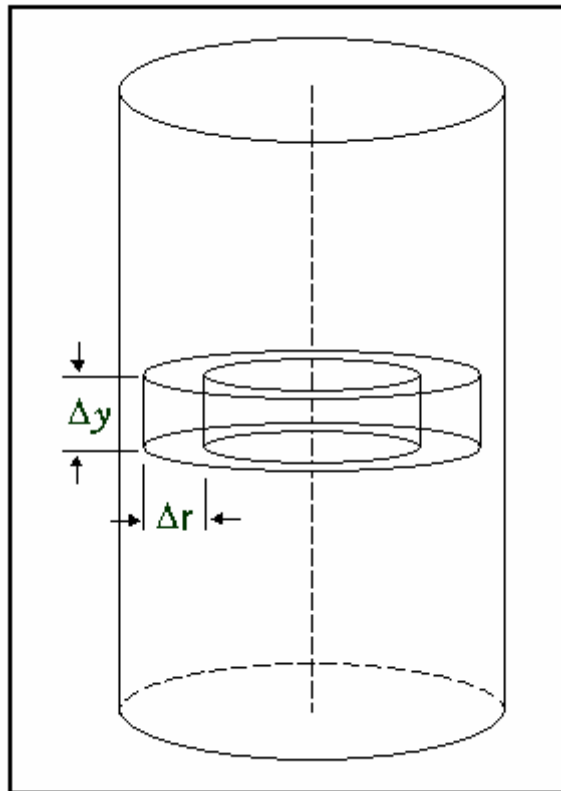
ρ_{AD} : دانسیته جزء منتقل شونده در فاز پراکنده

جدول (۱)

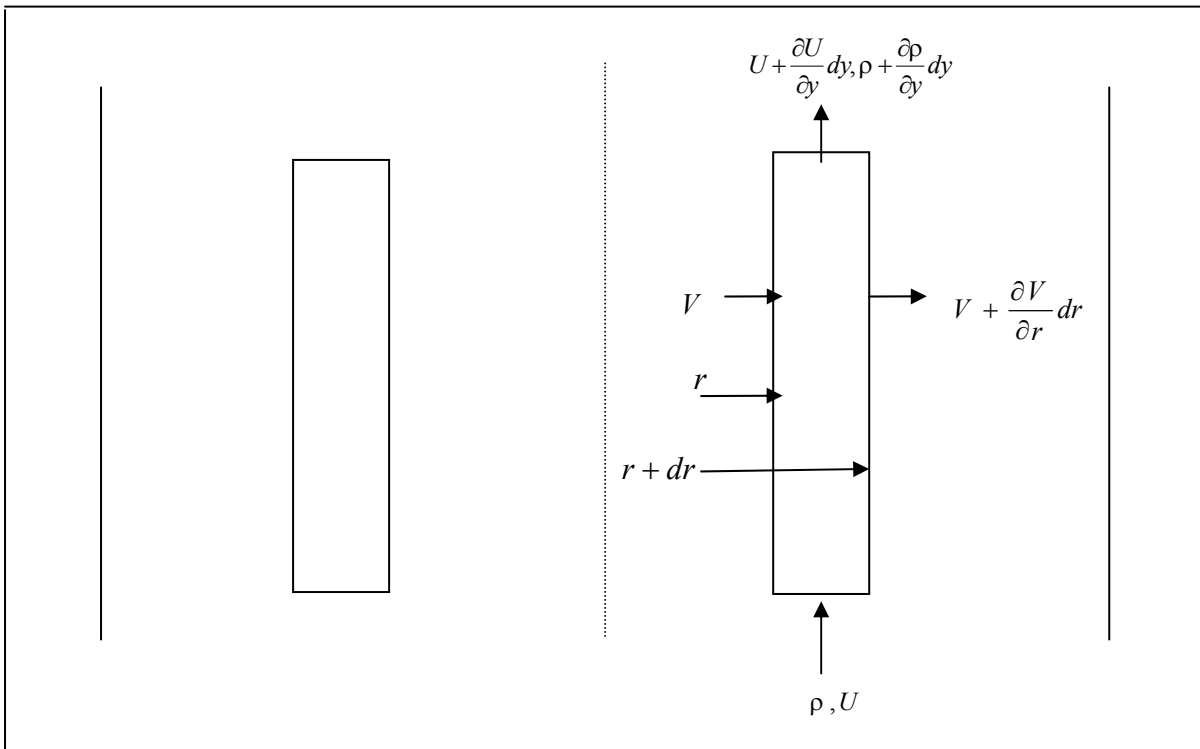
Column dimensions (cm)	Large column	Small column
D_c	21.9	7.62
D	11	4
h_c	7.2	2.54
Z	150.5	73.6

جدول (۲)

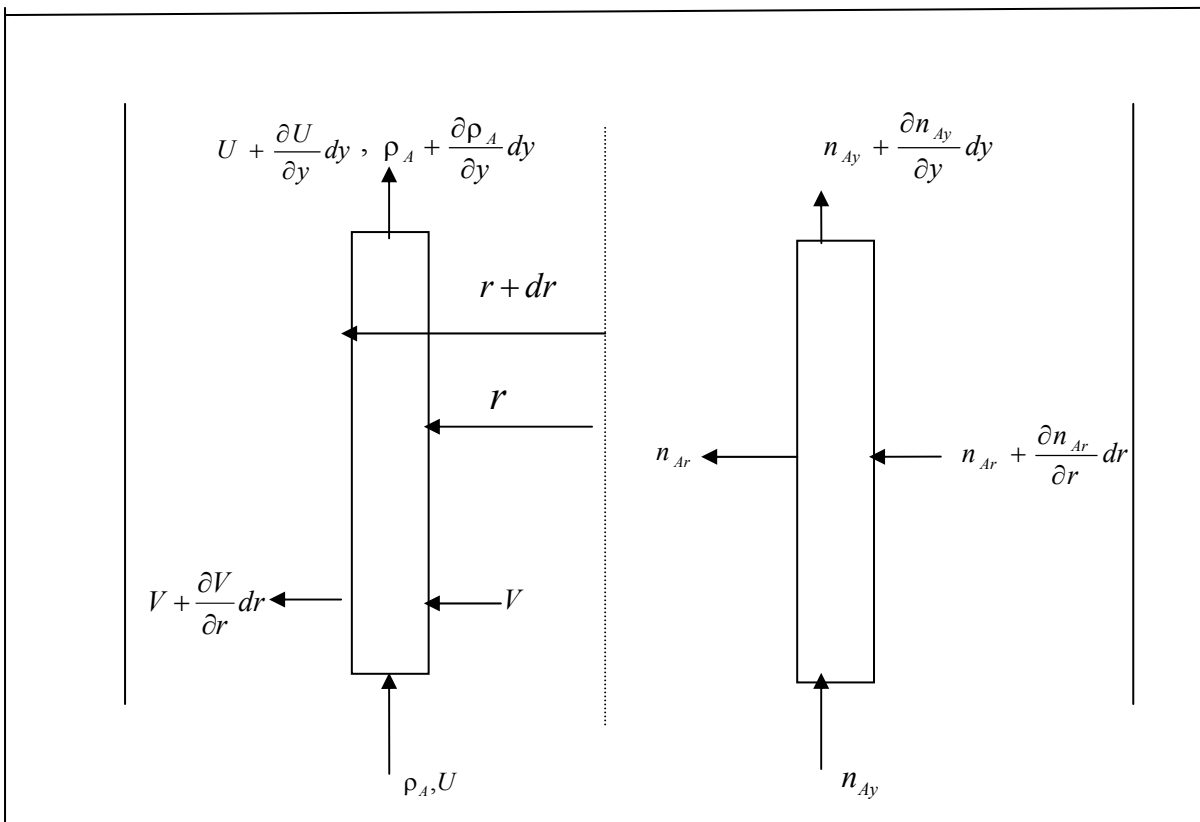
t_f (cm/s)	.1	.05	.01	.001
k_{df} (cm/s)	.0316	.045	.0999	.316



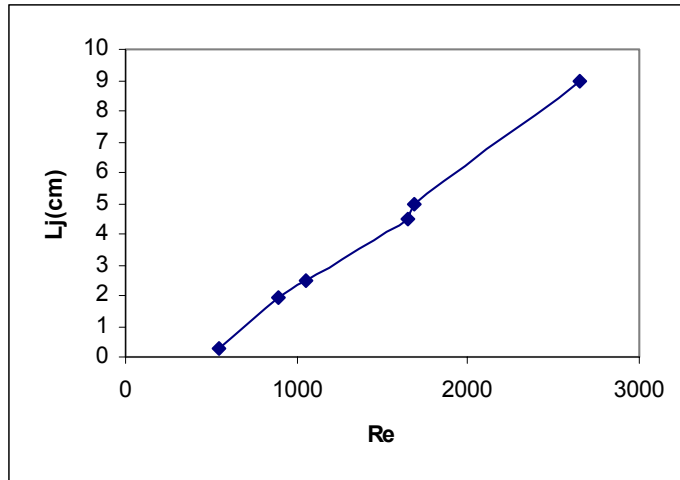
شکل (۱) پوسته استوانه ای به ضخامت Δr و ارتفاع Δy



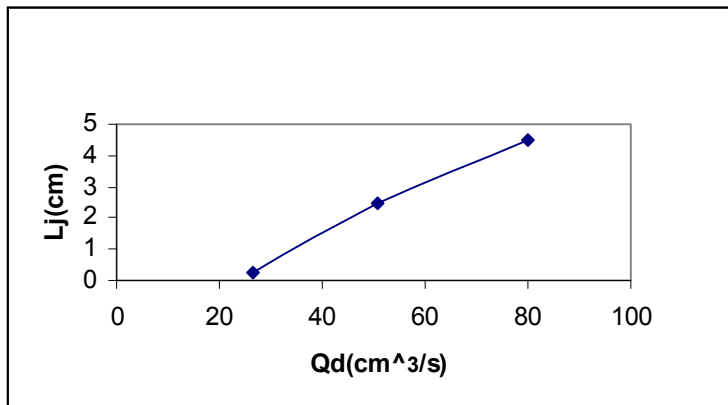
شکل (۲) موازنه جرم کلی روی پوسته استوانه ای از جت به ضخامت Δr و ارتفاع Δy



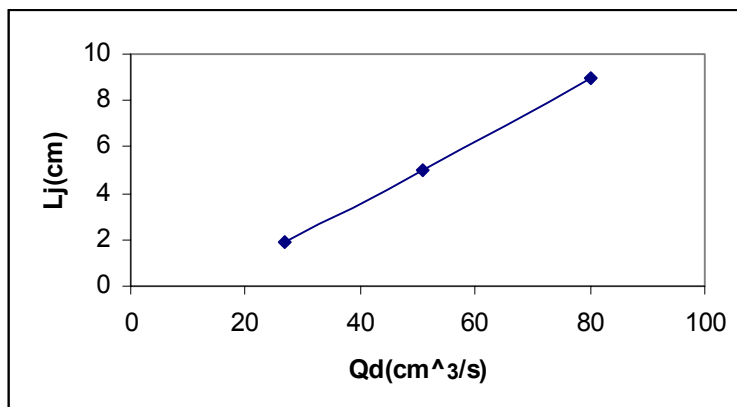
شکل (۳) موازنه جرم جزء (A) روی پوسته استوانه ای از جت به ضخامت Δr و ارتفاع Δy



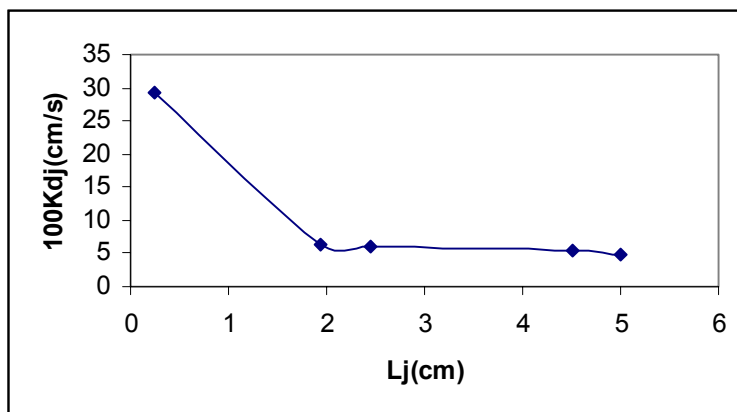
شکل (۴) تغییرات طول جت با عدد رینولدز در برج بزرگ



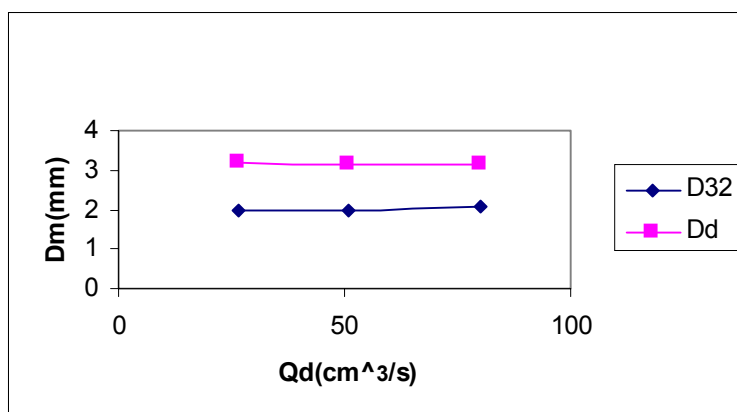
شکل (۵) تغییرات طول جت با دبی فاز پراکنده در برج بزرگ
و توزیع کننده اول



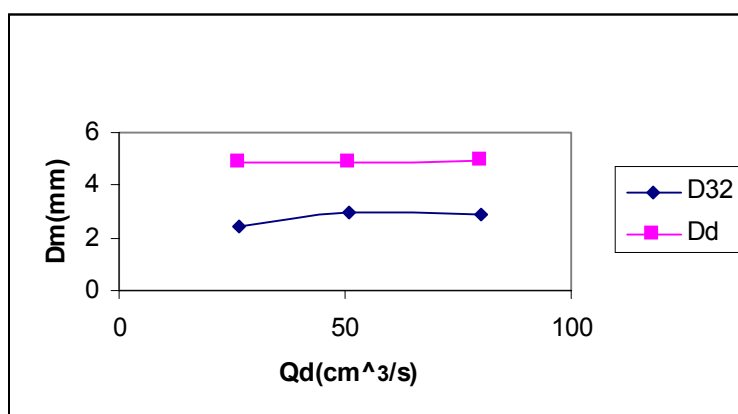
شکل (۶) تغییرات طول جت با دبی فاز پراکنده در برج بزرگ
و توزیع کننده دوم



شکل (۷) تغییرات ضریب انتقال جرم در جت با طول جت در برج بزرگ



شکل (۸) تغییرات قطر متوسط با دبی فاز پراکنده در برج بزرگ و توزیع کننده اول



شکل (۹) تغییرات قطر متوسط با دبی فاز پراکنده در برج بزرگ و توزیع کننده دوم

