

مقایسه نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدل‌های پلاگ و مرکب با اختلاط پیش‌رونده در شبیه‌سازی برج استخراج ضربه‌ای سینی غربالی

رضا لک^۱، علی حقیقی اصل^{۲*}، سیدجابر صفدری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه سمنان

۲- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی دانشگاه سمنان <mailto:m.hosseini@nit.ac.ir>

۳- عضو هیات علمی سازمان انرژی اتمی ایران

تاریخ پذیرش: ۸۸/۵/۲۴

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۲/۱۶

چکیده

در این مقاله معادلات مورد استفاده در برنامه کامپیوتری برای هر یک از مدل‌های ارائه شده به تفصیل شرح داده می‌شود. ابتدا معادلات مربوط به مدل پلاگ استخراج می‌گردد به عنوان یک مدل ایده‌آل در روش‌های مدل‌سازی شناخته می‌شود و سپس مدل مرکب با اختلاط پیش‌رونده پرداخته می‌شود. این کار روی دو سیستم آب/استن/تولوتن و آب/استن/بوتیل استات انجام گرفته که اولی یک سیستم با کشش بین فازی بالاست و دومی یک سیستم با کشش بین فازی متوسط می‌باشد. جهت انتقال جرم از فاز پراکنده به فاز پیوسته می‌باشد. فاز پیوسته و جزء منتقل شونده در هر دو سیستم به ترتیب آب و استن است. استفاده از مدل مرکب به همراه معادله هندلی و بارون اصلی بهترین نتیجه را برای محاسبه ارتفاع یک برج ضربه‌ای سینی غربالی می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: برج ضربه‌ای، جریان برگشتی، نفوذ، اختلاط پیش‌رونده، پراکندگی

مقدمه

در مدل ایده‌آل پلاگ، هیچ یک از عوامل فوق که باعث دوری برج از حالت ایده‌آل می‌شود، در نظر گرفته نشده است. به خاطر همین دقت مدل بسیار پایین می‌باشد. از آنجایی که در این حالت نیروی محرکه در طول برج دارای بیشترین مقدار می‌باشد، طول برج استخراج به دست آمده بسیار کوچک‌تر از مقدار واقعی خواهد شد.

در مدل مرکب، ماندگی یک فاز درون فاز دیگر به صورت عبارت‌های جریان برگشتی و جریان چرخانه‌ای به صورت نفوذ در نظر گرفته شده است و لذا طول به دست آمده از این مدل نسبت به مدل‌های قبلی دقت بیشتری دارد و همچنین استفاده از حالت مراحل با اختلاط کامل در این مدل باعث خواهد شد که طول پیش‌بینی شده از مقدار واقعی بزرگ‌تر باشد.

در یک برج استخراج مایع-مایع، عوامل زیر باعث دور شدن عملکرد برج از حالت ایده‌آل می‌شود:

- نفوذ مولکولی و نفوذ چرخانه‌ای که در هر دو فاز وجود دارد.
- تغییرات سرعت فاز در جهت محوری و شعاعی که به دلایل زیر وجود دارد:
 - وجود ضمام داخلی ستون مانند بافل‌ها، دستگاه همزن و
 - وجود قطرات با اندازه‌های غیر یکنواخت و به طور زیاد.
- ماندگی یک فاز در فاز دیگر، برای مثال حمل شدن قطرات کوچک فاز پراکنده توسط فاز پیوسته و حمل شدن فاز پیوسته در لایه مرزی فاز پراکنده.

$$k_{c(Higbi)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{D_c}{d_{32}/v_s} \right)} \quad (7)$$

جدول ۱- مشخصات ستون استخراج کننده ضربه‌ای مورد نظر [۳]

۱۵۰ سانتیمتر	طول ستون
۵ سانتیمتر	قطر ستون
۱/۵ میلی‌متر	قطر سوراخ‌ها
۴ میلی‌متر	فاصله سوراخ‌ها
۵ سانتیمتر	فاصله سینی‌ها
۱ سانتیمتر	قطر لوله‌های نگهدارنده
۳۱۶ استیل	جنس لوله‌های نگهدارنده سینی
۳۱۶ استیل	جنس سینی‌ها
شیشه	جنس ستون

ب- مدل هندلس و بارون-هیگبی:

$$k_d = \frac{\lambda_1 v_d}{768(1 + v_y/v_x)}, \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{2.861}{\left(1 + \frac{0.2086}{h_b^{1.047}}\right)^2}$$

$$h_b = \frac{512k_c(1 + v_x/v_y)}{mU_x} \quad (9)$$

$$k_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{D_c}{d_{32}/v_s} \right)} \quad (10)$$

ج- مدل هندلس و بارون-گارنر و تایان:

در این مدل k_d از مدل قبل محاسبه می‌شود و رابطه k_c از این قرار است:

$$k_c = \frac{D_c}{d_{32}} \left[50 + 0.0085 \left(\frac{d_{32} v_d \rho_c}{\mu_d} \right) \left(\frac{\mu_c}{\rho_c D_c} \right)^{0.7} \right] \quad (11)$$

در رابطه (۱) سرعت فاز پیوسته با توجه به دبی آن و سطح

مقطع برج به دست می‌آید: [۵]

مدل پلاگ

مدل پلاگ به عنوان یک مدل ایده‌آل هیچ‌گونه جریان برگشتی را در نظر نمی‌گیرد و در هیچ یک از دو فاز انتقال جرمی به صورت نفوذ فرض نمی‌کند. لذا این مدل از اهمیت عملی برخوردار نیست و برای کاربردهای مدل کردن یک سیستم واقعی به کار نمی‌رود [۱].

ارتفاع یک برج در رابطه با تعداد مراحل انتقال، سرعت فاز پیوسته، ضریب جمعی انتقال جرم و سطح تماس ظاهری به این ترتیب محاسبه می‌شود: [۲]

$$h_c = \frac{N_x U_x}{K_x a} \quad (1)$$

$$N_x = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(1 - E_x)}{(1 - E_x / \lambda)} \right]}{1 - \lambda} \quad (2)$$

طبق تعریف بازده مورفری:

$$E_x = \frac{x_{in} - x_{out}}{x_{in} - \frac{y_{in}}{m}} \quad (3)$$

و اما رابطه بین ضرایب جمعی انتقال جرم در دو فاز عبارت است از:

$$K_x = K_y / m \quad (4)$$

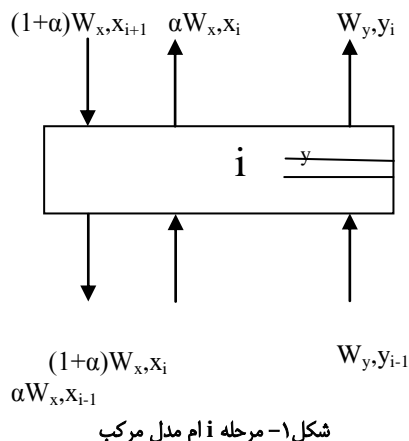
رابطه بین ضریب جمعی و ضرایب موضعی انتقال جرم نیز از این قرار است:

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{k_c} + \frac{1}{mk_d}} \quad (5)$$

برای محاسبه ضرایب موضعی انتقال جرم روابطی پیشنهاد شده که بر این اساس سه مدل در این مقاله بررسی می‌شود [۳].

الف- مدل هندلس و بارون:

$$k_d = \frac{\lambda_1 v_d}{768(1 + v_y/v_x)}, \quad \lambda_1 = 2.866 \quad (6)$$



$$U_x = \frac{Q_x}{A} \quad (12)$$

$$U_y = \frac{Q_y}{A} \quad (13)$$

سرعت متوسط قطرات هم از این رابطه محاسبه شده‌است:

$$v_d = C_R v_s - \frac{Q_x}{A(1-\varepsilon)} \quad (14)$$

$$C_R = \frac{1}{Av_s} \left(\frac{Q_y}{\varepsilon} + \frac{Q_x}{1-\varepsilon} \right) \quad (15)$$

$$v_s = v_t(1-\varepsilon) \quad (16)$$

$$v_t = 17.6(\rho_x)^{-0.55}(\rho_x - \rho_y)^{0.28} v_x^{0.1} \sigma^{0.18} \quad (17)$$

if $d_{32} > d_{ct}$

$$v_t = 38.3(\rho_x)^{-0.45}(\rho_x - \rho_y)^{0.58} v_x^{-0.11} d_{32}^{0.7} \quad (17)$$

if $d_{32} < d_{ct}$

که:

$$d_{ct} = 0.33 \rho_x^{-0.14} (\rho_x - \rho_y)^{-0.43} v_x^{-0.3} \sigma^{0.24} \quad (18)$$

مدل مرکب با اختلاط پیش‌رونده

در این مدل برای فاز پیوسته اختلاط معکوس و برای فاز پراکنده، اختلاط پیش‌رونده در نظر گرفته می‌شود و حداکثر دوری از ایده‌آلی در این مدل به دست می‌آید. [۴]
از رابطه انتقال جرم برای مرحله iام داریم:

$$W_y dy = \rho_y K_y (y_i^* - y) a S dz \quad (19)$$

از اینجا داریم:

$$\text{Exp}(-h_m/h) = \frac{y_i - y_{i-1}}{y_{i-1} - y_i^*} + \quad (25)$$

$$\frac{y_{i-1} - y_i^*}{y_{i-1} - y_i} = -E + 1$$

$$E = 1 - \text{Exp}(-h_m/h) \quad (26)$$

$$\frac{dy}{y_i^* - y} = \frac{K_y a S \rho_y}{W_y} dz \quad (20)$$

با فرض این که فاز پراکنده کاملاً اختلاط داشته باشد و در نتیجه $y_i x$ ثابت بماند، حاصل انتگرال فوق عبارت خواهد بود از:

$$-\text{Ln}(y_i^* - y) \Big|_{y_i}^{y_{i+1}} = \frac{K_y a S \rho_y}{W_y} h_m \quad (21)$$

$$\text{Ln} \frac{y_i - y_i^*}{y_{i-1} - y_i^*} = -\frac{K_y a S \rho_y}{W_y} h_m \quad (22)$$

$$\frac{y_i - y_i^*}{y_{i-1} - y_i^*} = \text{Exp}(-h_m/h), \quad (23)$$

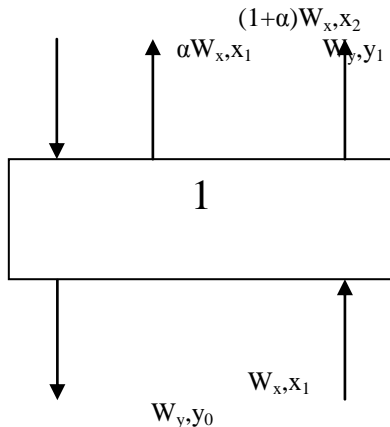
$$h = \frac{W_y}{K_y a S \rho_y} = \frac{U_y}{K_y a}$$

از طرفی طبق تعریف بازده مورفری داریم:

$$E = \frac{y_i - y_{i-1}}{y_i^* - y_{i-1}} \quad (24)$$

رابطه (۲۳) را به این صورت بازنویسی می‌کنیم:

حالا با نوشتن موازنه جرم برای فاز پیوسته بقیه معادلات لازم برای این مدل به دست می‌آیند:



شکل ۲- مرحله اول مدل مرکب

$$(1 + \alpha)W_x x_{i+1} + \alpha W_x x_{i-1} - (1 + 2\alpha)x_i W_x = \quad (27)$$

$$W_y (y_i - y_{i-1})$$

$$x_{i+1} = \frac{1 + 2\alpha}{1 + \alpha} x_i - \frac{\alpha x_{i-1}}{1 + \alpha} + \quad (28)$$

$$\frac{W_y E (m x_i - y_{i-1})}{W_x (1 + \alpha)}$$

و از رابطه (۲۴) داریم:

$$y_i = y_{i-1} + E(m x_i - y_{i-1}) \quad (29)$$

به همین ترتیب با نوشتن موازنه جرم برای مرحله اول، معادلات مربوط به دست می‌آیند:

$$y_1 = y_0 + E(m x_1 - y_0) \quad (30)$$

$$x_2 = x_1 + \frac{W_y (y_1 - y_0)}{W_x (1 + \alpha)} \quad (31)$$

شکل ۲ موازنه جرم برای مرحله اول مدل مرکب را نشان می‌دهد.

در همه حالات ورودی فاز پیوسته خالص فرض می‌شود. به عنوان نمونه برای اجرای اول از سیستم آب/استن/بوتیل استات نموداری از اجرای برنامه آورده می‌شود: نسبت ارتفاع حاصل از معادله اورجینال هندلس و بارون به ارتفاع واقعی در مدل:

الف- پلاگ: ۰/۰۳۵۳ ب- مرکب: ۱/۲۵۶۹

مشخصات ستون استخراج کننده ضربه‌ای مورد نظر در جدول ۱ و شرایط عملیاتی آزمایش‌های انجام گرفته در جدول‌های ۲ و ۳ می‌آید:

جدول ۲- شرایط عملیاتی برای آزمایش‌های سیستم آب/استن/تولون

RUN	۱	۲	۳	۴	۵	۶
f (1/s)	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۶	۱/۶	۲/۶
Am (cm)	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۵	۱/۵	۱/۵
Q _c (cc/s)	۳/۱	۶/۵۵	۱۰/۴۳	۳/۱۴	۳/۱۷	۳/۰۱
Q _d (cc/s)	۲/۶۵	۲/۷۹	۲/۹۶	۳/۶۱	۰/۹۵	۲/۸۹
x _{c,out} %	۲/۰۵	۱/۱۱	۰/۷۶	۲/۹۶	۰/۸۹۸	۲/۴۹
x _{d,out} %	۰/۳۲	۰/۰۵۵	۰/۰۳۶	۰/۴۹۵	۰/۰۱۸	۰/۲۱۹
x _{d,in} %	۳/۰۹	۳/۰۷	۳/۱۳	۳/۴۷	۳/۴۴	۳/۲
ε(hold-up) %	۱/۰۴	۱/۰۹	۱/۱۲	۱/۶۸	۰/۵۶	۱/۳۴
d ₃₂ (cm)	۰/۳۹۸	۰/۲۸	۰/۲۸۲	۰/۲۸۳	۰/۲۶۵	۰/۲۶۴

جدول ۳- شرایط عملیاتی برای آزمایش‌های سیستم آب/استن/بوتیل استات

RUN	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
f (1/s)	۱/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۲/۰	۳/۰
Am (cm)	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
Q _c (cc/s)	۲/۸۵	۳/۱۲	۳/۰۶	۹/۳۳	۲/۹۷	۴/۹۸	۳/۰۷
Q _d (cc/s)	۱/۴۰	۵/۳۹	۱/۴۱	۲/۲۴	۲/۰۴	۲/۱۴	۱/۲۱
x _{c,out} %	۱/۳۷	۳/۰۵	۱/۳۱	۰/۶۵	۱/۷۸	۱/۱۷	۱/۰۷
x _{d,out} %	۰/۰۵	۱/۱۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۱۴۱	۰/۰۱۱	۰/۰۲
x _{d,in} %	۳/۲۳	۳/۱۸	۳/۲۵	۳/۱۰	۳/۰۹	۳/۱۰	۳/۱
ε(hold-up)%	۲/۰	۸/۴۳	۲/۲۵	۳/۳۷	۲/۵۹	۲/۹۲	۳/۴
d ₃₂ (cm)	۰/۱۳۴	۰/۱۴۴	۰/۱۳۱	۰/۱۵۳	۰/۱۳	۰/۱۵۴	۰/۱۴۲

نتیجه‌گیری

با توجه به اجرای برنامه برای حالت‌های مختلف نتایج کلی زیر حاصل می‌شود:
طول برج به دست‌آمده توسط مدل پلاگ از طول واقعی برج کمتر و طول به دست آمده از طریق مدل مرکب از طول واقعی برج بیشتر است.

در حالت کلی با استفاده از ضریب انتقال جرم هندلس و بارون اصلی، مقدار طول محاسبه شده، کمتر از دو مدل دیگر یعنی هندلس و بارون-هیگی و هندلس و بارون-گارنر و تایید به دست می‌آید و از بین این دو، اولی طول کمتری را به دست می‌دهد. به عبارت دیگر این سه مدل به ترتیب صعودی برای محاسبه طول برج عبارتند از:
الف- مدل هندلس و بارون اصلی؛ ب- هندلس و بارون-هیگی؛ ج- هندلس و بارون-گارنر و تایید.

با توجه به نمودار بهترین مدل، مدل مرکب می‌باشد که هم‌زمان هم اختلاط معکوس و هم اختلاط پیش‌رونده را لحاظ می‌کند. از بین معادلات نیز معادله هندلس و بارون اصلی بهترین نتایج را می‌دهد. بنابراین در حالت کلی مدل مرکب با استفاده از معادله هندلس و بارون اصلی بهترین ارتفاع را برای یک برج ضربه‌ای سینتی غربالی پیش‌بینی می‌نماید و استفاده از این ترکیب برای سیستم آب/استن/تولون (سیستم با کشش بین فازی بالا) به ۳۷/۵۳۸ درصد خطا منجر می‌شود و در مورد سیستم دیگر یعنی آب/استن/بوتیل استات (سیستم با کشش بین فازی متوسط) ۷۷/۶۴۱ درصد خطا خواهد داشت.

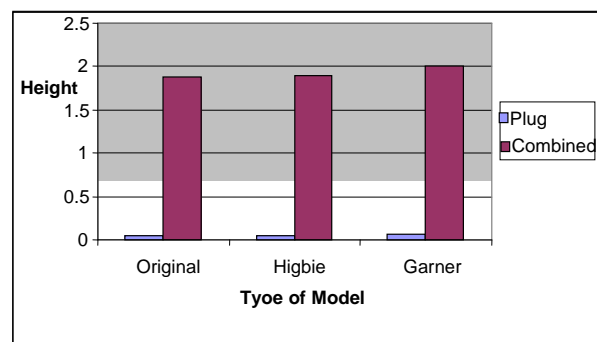
نسبت ارتفاع حاصل از معادله هیگی به ارتفاع واقعی در مدل:

$$\text{الف- پلاگ: } ۰/۰۳۵۴ \text{ ب- مرکب: } ۱/۲۵۹۸$$

نسبت ارتفاع حاصل از معادله گارنر به ارتفاع واقعی در مدل:

$$\text{الف- پلاگ: } ۰/۰۴۴۴ \text{ ب- مرکب: } ۱/۳۳۴۱$$

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود مدل پلاگ، ارتفاع را از ارتفاع واقعی کمتر پیش‌بینی می‌کند، حال آن‌که مدل مرکب، ارتفاع را بیشتر از ارتفاع واقعی محاسبه می‌کند. در مورد معادلات نیز نکته قابل ذکر این است که در هر دو مدل معادله هندلس و بارون اصلی کمترین ارتفاع‌ها و معادله گارنر بیشترین ارتفاع‌ها را به دست می‌دهد. مجموعاً مدل مرکب به همراه معادله هندلس و بارون اصلی بهترین نتیجه را می‌دهد و ۲۵/۶۹ درصد خطا دارد.



شکل ۳- ارتفاع برای اجرای اول سیستم آب/استن/تولون

Subscripts

x	$x - phase$
y	$y - phase$
R	$raffinate$
E	$extract$
F	$feed$
S	$solvent$
c	$continuous phase$
d	$dispersed phase$
I	$interphase$
i	$ith stage, ith fraction$
n	$nth stage$

Superscripts

*	$at equilibrium$
---	------------------

نمادگذاری‌ها

a	$specific area, m^2 / m^3$
A	$extraction factor (= U_x / mU_y)$
d	$drop diameter, m$
e	$dispersion coefficient \varepsilon / \varepsilon, m^2 / s$
ε	$longitudinal diffusivity, m^2 / s$
f_i	$fraction of hold-up of ith fraction$
h	$height, m$
h_c	$height of column, m$
h_m	$height of stage, m$
H	$height of transfer unit (= U / Ka), m$
H_s	$height equivalent of a theoretical stage, m$
i	$stage number$
J	$mass flux, Kg / m^2 s$
k	$coefficient of mass transfer, m / s$
K	$overall coefficient of mass transfer, m / s$
m	$distribution coefficient [m = (y/x)^*]$
n	$number of stages$
n_s	$number of theoretical stages$
N	$number of transfer units (= Ka h_c / U)$
Pe	$Peclet number (= U h_c / e)$
u_i	$velocity of ith fraction$
U	$superficial velocity, m / s$
U_i	$superficial velocity of ith fraction (= u_i / \varepsilon_i)$
x	$concentration, Kg / m^3$
X	$auxiliary variable, eq.(1-21) or eq.(1-39)$
y	$concentration, Kg / m^3$
Y	$auxiliary variable, eq.(1-22) or eq.(1-39)$
z	$dimensionless height (= h / h_c)$
α	$backflow ratio$
Δ	$solvent flow, Kg / m^3 s$
ε	$volume fraction of phase$
φ_i	$fraction of throughput of ith fraction$

مراجع:

- 1- J. C. Godfrey and M. J. Slater, Liquid/Liquid Extraction Equipment, John Wiley, New York (1994).
- 2- C. Hanson, Recent Advances in Liquid/Liquid Extraction, Program Press, New York (1971).
- ۳- صفدری، س ج، "بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرم در ستونهای استخراج کننده مایع-مایع"، دانشگاه تهران، پایان نامه (۱۳۷۹).
- 4- Ch. Gourdon and G. Casamatta, "Influence of Mass Transfer Direction on the Operation of a Pulsed Sieve-Plate Column", Chemical Eng. Sci., Vol. 46, 2799 (1991).
- 5-G.S. Luo, H.B. Li, X.J. Tang, J.D. Wang, "Drop Break gage in a Coalescence- Dispersion Pulsed- Sieve- Plate Extraction Column", Chem. Engng., (2004) 185-191
- 6-C. Sayer, M. Palma, R. Giudici, "Modeling Continuous Vinyl Acetate Emulsion Polymerization Reactions in a Pulsed Sieve Plate Column", Ind. Eng. Chem. Res. 41, (2002) 1733-1744
- 7- G. Angelov and C. Gourdon, A. Line, "Simulation of Flow Hydrodynamics in a Pulsed Solvent Extraction Column under Turbulent Regimes", Chem. Eng. Jl., Vol. 71, No. 1 (1998).
- 8- M. Aoun Nabli and P. Guiraud and C. Gourdon, "Numerical Experimentation: a tool

to calculate the axial dispersion coefficient in discs and doughnuts pulsed solvent extraction columns", Chem. Eng. Sci., Vol. 52, 2353 (1997).

- 9- A. Chouai, and M. Cabassud, M.V. Le Lann, , C. Gourdon, G. Casamatta, "Use of Neural Networks for Liquid/Liquid Extraction Column Modelling:an Experimental Study", Chem. Engng. Proc., Vol. 39, 171 (2000).