

مدل سازی برج پرلینگ اوره با جریان طبیعی و ارایه روش‌های مناسب جهت رفع کلوخه در برج

غلامرضا سلطانیان*⁺

فراهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فراهان، صندوق پستی ۳۹۵۳۱

عبدالحسین جهانمیری

شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۵۸۵ - ۷۱۳۴۵

مریم ادیمی

فراهان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فراهان، صندوق پستی ۳۹۵۳۱

چکیده: پرلینگ یکی از روش‌های دانه‌بندی کودهای شیمیایی (اوره و نترات آمونیوم) و مواد خاص از جمله مواد منفجره می‌باشد. در این پژوهش، مدل‌سازی برج دانه‌بندی اوره منطقه یک پتروشیمی شیراز انجام شده است. در این برج، از هوا به عنوان عامل اصلی انتقال حرارت و انتقال جرم به صورت طبیعی و ناهمسو استفاده می‌شود. معادله‌های پیوستگی، هیدرودینامیک، جرم و انرژی برای هوا و دانه‌های اوره نوشته شده و به صورت همزمان در یک بسته نرم‌افزاری حل شدند. در مطالعه حاضر از دو مدل به صورت جداگانه استفاده شده است. در مدل اول، توزیع دما درون دانه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. نتیجه‌های حاصل از این مدل با داده‌های واقعی تطابق خوبی ندارند. ولی با در نظر گرفتن توزیع دما در داخل دانه‌ها داده‌های تجربی انطباق بهتری را با نتیجه‌های مدل پیدا می‌کنند. نتیجه مطالعه نشان می‌دهد که میزان انتقال حرارت بر روی دانه‌های متوسط و بزرگ در برج‌های دانه‌بندی کافی نبوده و شاید بروز مشکلات عدیده‌ای مانند تمایل به کلوخه شدن در این واحدها احتمالاً ناشی از این امر است.

واژه‌های کلیدی: برج دانه‌بندی، مدل‌سازی، اوره، فن، بندر پاشی، بستر سیال.

KEY WORDS: Prilling tower, Modeling, Urea, Fan, Seeding, Fluidize bed.

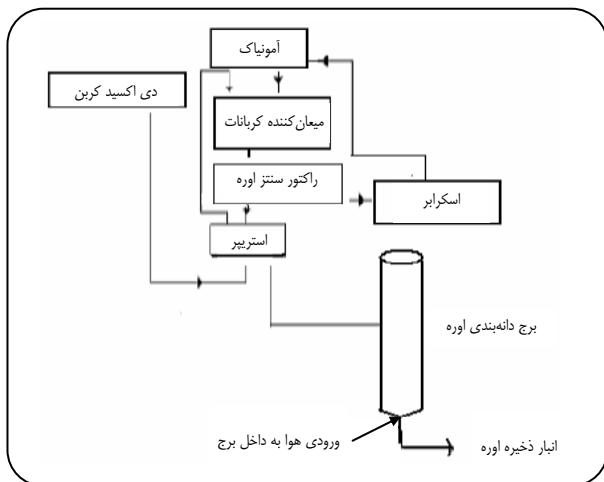
مقدمه

با این کار، می‌توان به جای تغییر پارامترهای واقعی در صنعت، نتیجه‌های حاصل از مدل ریاضی را جهت بهبود عملکرد آنها به کار برد. این در حالی است که مدل استفاده شده بایستی دقیق و قابل اطمینان باشد. در غیر این صورت نمی‌توان به نتیجه‌های

امروزه مدل‌های ریاضی، کمک شایانی به پیش بینی و تخمین رفتار فرایندها نموده است. هزینه‌های زیاد ساخت واحدهای نیمه صنعتی^(۱) و آزمایشگاهی، و همچنین پی آمدهای تغییر پارامترهای واقعی در واحدهای صنعتی، از دلایل انجام این مهم می‌باشد.

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: ghrs_soltanian@yahoo.com



شکل ۱- شمایی از واحد تولید اوره پتروشیمی شیراز.

عریان ساز^(۱) یک مبدل پوسته و لوله^(۲) است که در آن کربامات^(۳) موجود در محلول اوره تجزیه شده و گازهای حاصل به وسیله جریان پرفشار CO₂ از محلول جدید دفع می‌شود. این دستگاه در اصل یک تبخیر کننده فیلمی^(۴) نا همسو است. به عریان ساز از نوع موجود در واحد اوره، در جاهای دیگر تجزیه کننده گفته می‌شود، زیرا در اصل باعث تجزیه می‌شود. نخستین مرحله تغلیظ اوره در عریان ساز انجام می‌شود و همانطور که بیان شد در آن، کربامات موجود در محلول اوره خروجی از راکتور تجزیه شده و اوره تغلیظ می‌شود. واکنش تجزیه کربامات یک واکنش گرماگیر است.

کندانسور کربامات، دستگاهی است که نخستین مرحله تولید اوره و واکنش ابتدایی سنتز اوره، یعنی تولیدات کربامات آمونیم از آمونیاک و گاز کربنیک در آن انجام می‌شود. اسکرابر (برج شستشو دهنده گازها در فشار بالا)، نیز یک مبدل پوسته و لوله است که در آن عملیات کربامات سازی صورت می‌گیرد.

نحوه خشک کردن اوره

اوره نگهداری شده در مخزن فولادی، به کمک پمپ پروانه‌ای^(۵) به بالای برج منتقل می‌شود.

برج دانه‌بندی اوره حدود ۶۰ متر ارتفاع دارد و ماده مذاب

حاصل از مدل و استفاده آن در واحدهای صنعتی مطمئن بود. در این مطالعه، برج دانه‌بندی اوره منطقه یک پتروشیمی شیراز مدل‌سازی و نتیجه‌های حاصل از آن با واحدهای صنعتی دیگر نیز مقایسه شده است.

اوره از مهمترین کودهای نیتروژن‌دار است که دارای ۴۶٪ ازت می‌باشد. بیشتر از ۹۰٪ محصولات کشاورزی در دنیا از کودهایی تغذیه می‌کنند که دارای نیتروژن باشند. اوره پس از اضافه شدن به خاک، هیدرولیز شده و آمونیاک و دی اکسید کربن آزاد می‌کند. آمونیاک به کمک باکتری‌های داخل خاک اکسیده شده و به نترات، که قابل جذب در گیاه باشد تبدیل می‌شود. اوره در سال ۱۸۲۸ میلادی توسط فردریش آلمانی، از واکنش زیر به دست آمد [۲].



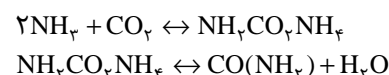
امروز اوره از ترکیب دی اکسید و آمونیاک به دست می‌آید [۴، ۵]. بیوره ماده سمی است که حدود ۲٪ از کودهای اوره را شامل می‌شوند، این ماده از رشد گیاهان جلوگیری نموده و به عنوان سم برای گیاهان محسوب می‌شود.



اوره در دمای ذوب خود، به کمک پمپ‌های ویژه‌ای به بالای برج دانه‌بندی منتقل می‌شود. در بالای برج، نازل‌هایی به شکل دوش‌های ثابت نصب شده‌اند که اوره در آن به شکل دانه‌های کروی در می‌آید. دانه‌ها، با نیروی وزن خود به پایین برج سقوط می‌کنند. از طرفی هوای خشک به شکل غیر هم‌جهت و به طور طبیعی از پایین، وارد برج می‌شود. عملیات انتقال حرارت و انتقال جرم بین دانه‌ها و هوا باعث خشک و چروکیده شدن آن می‌شود. دانه‌های خشک در پایین برج به عنوان فرآورده‌ی نهایی به کمک تسمه نقاله به انبار منتقل می‌شود.

فرایند تولید اوره مذاب [۴]

(۱) راکتور واحد اوره که در آن، واکنش اصلی سنتز اوره، یعنی تبدیل کربامات آمونیم به اوره و آب صورت می‌گیرد.



(۱) Stripper

(۲) Shell and tube

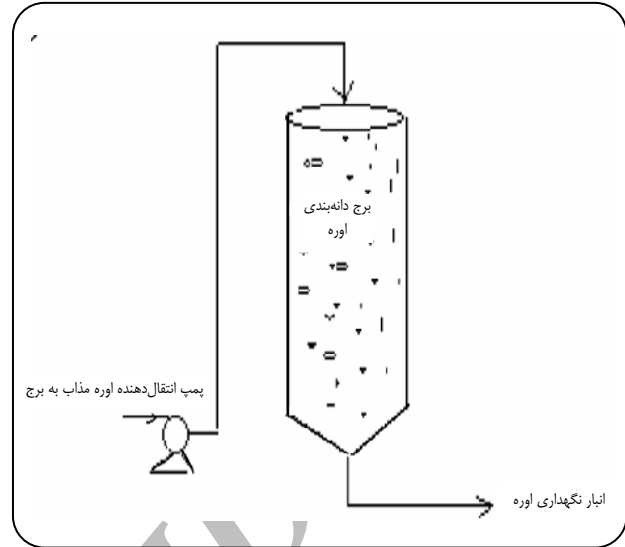
(۳) Carbamate

(۴) Thin film evaporator

(۵) Centrifugal pump



شکل ۳- تصویر برج های پرلینگ جدید پتروشیمی شیراز [۱۹].



شکل ۲- شمایی از برج دانه بندی اوره.

دانه های اوره پس از ریزش در پایین برج، وارد دستگاه بستر سیال^(۳) شده و در آنجا حرارت خود را بخوبی از دست می دهد [۴].

بخش نظری

مدل یکپارچه^(۴)

در این مدل، توزیع دما در دانه ها به صورت یکپارچه در نظر گرفته می شود و فرض می شود که دما در جهت شعاع تغییر نمی کند و از مرکز دانه تا پوسته آن، ثابت بماند. دمای دانه ها، فقط از بالا به پایین برج و بشکل یکپارچه کاهش می یابد. رابطه های مدل مذکور در قسمت معادله ها به طور خلاصه آمده است.

مدل توزیعی^(۵)

به دلیل عدم تطابق مدل یکپارچه با داده های تجربی، از مدل توزیع دما در جهت شعاع، استفاده می شود. شرایط مرزی این معادله ها به دلیل تغییر مرز بین دو فاز (مایع و جامد)، با حالت یکپارچه کاملاً متفاوت می باشد و برای استفاده آن در معادله های دیفرانسیل بایستی از روش های عددی خاصی (شرایط مرزی متحرک)^(۶) استفاده شود. این نوع شرایط مرزی، مانند ذوب شدن یخ می باشد، که هر لحظه مرز بین حالت جامد و مایع در حال حرکت می باشد.

در آن به وسیله لوله های فولاد ضد زنگ در شاخه های متعدد و به کمک نازل های دوشی شکل، به صورت دانه های کروی در می آید. دانه ها از بالای برج با نیروی وزن خود سقوط می کنند و در اندازه های ۰/۵ - ۲/۵ میلی متر در پایین برج جمع آوری و به کمک تسمه نقاله به انبار جمع آوری محصول منتقل می شوند. دانه های اوره در طول برج به کمک هوا، خشک و خنک می شوند. جریان هوا در این گونه برج ها، به صورت طبیعی و به کمک اختلاف چگالی، ایجاد می شود، ولی در برخی دیگر از برج ها جریان هوا به صورت اجباری^(۱) و به کمک چندین فن مکنده در بالای برج جاری می شود. در برج های جدید (منطقه دو پتروشیمی شیراز و پتروشیمی بجنورد) به جای نازل های ثابت، از سبدهای چرخان^(۲) سوراخ داری استفاده می شود که در آنها اوره مذاب با سرعت بالا دوران می کند. این سبدها دارای سوراخ هایی است که با چرخش حول محور خود، باعث می شود اوره های مذاب در آن، چرخیده و با زمان ماند بالاتری طول برج را طی نماید. دو برتری مهم این دستگاه عبارت است از:

- (۱) به دانه ها سرعت دورانی می دهد و باعث افزایش زمان ماند و در نهایت افزایش راندمان برج می شود.
- (۲) دانه های تشکیل شده در این سبدها، به تقریب هم اندازه بوده و از تشکیل دانه های درشت تر، جلوگیری می نماید.

(۱) Force Convection

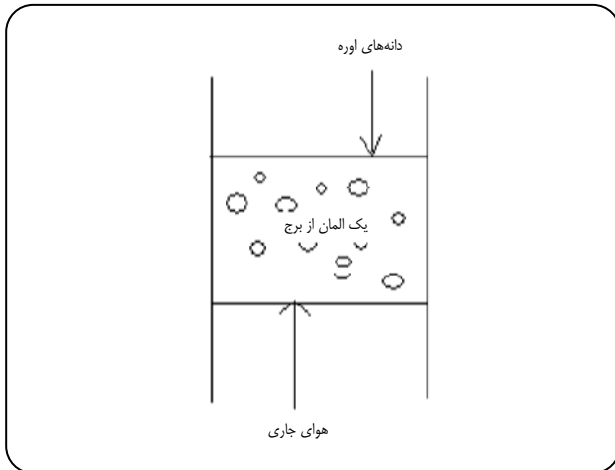
(۲) Rotary Blasket

(۳) Fluidize Bed

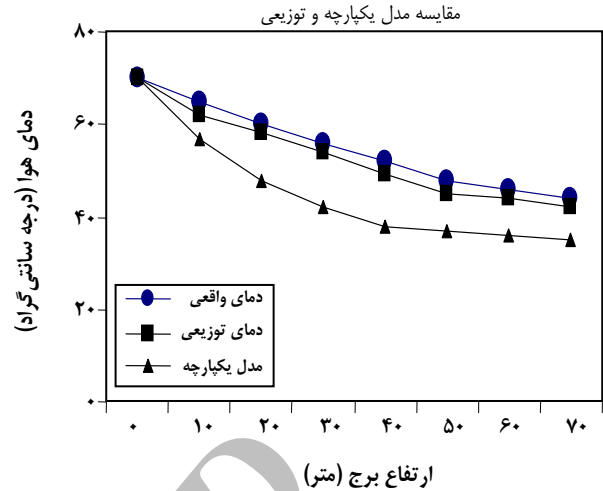
(۴) Lumped Model

(۵) Distributed Model

(۶) Moving Boundary Condition



شکل ۵ - المان یک مقطع از برج پریلینگ.



شکل ۴ - مقایسه مدل یکپارچه و مدل توزیعی با داده‌های واقعی واحد دانه بندی اوره پتروشیمی شیراز منطقه ۱.

معادله‌های هیدرودینامیک برج

معادله‌های پیوستگی هوا

اوره مذاب پس از عبور از نازل‌های نصب شده در قسمت بالایی برج، به شکل دانه‌های کروی درآمد و به سمت پایین سقوط می‌کند. این دانه‌ها در طول برج با جریان طبیعی هوا، خشک شده و در پایین برج به کمک جمع‌کننده‌هایی^(۱) به سمت انبار فرآورده هدایت می‌شوند.

همانگونه که در المان شکل ۵ مشاهده می‌شود، هوا و دانه‌های اوره به صورت ناهمسو تبادل حرارت، و رطوبت می‌نمایند. با توجه به پایداری سیستم معادله‌ها به شکل زیر خلاصه می‌شوند.

$$\rho_a \pi R^2 V_a \Big|_z \Delta t - \rho_a \pi R^2 V_a \Big|_{z+\Delta Z} \Delta t = \pi R^2 \Delta Z dp_a \quad (1)$$

$$-\frac{\partial(\rho_a V_a)}{\partial Z} = 0 \quad (2)$$

معادله‌های حرکت دانه

هنگام سقوط دانه‌ها، سه نیروی عمودی بر آنها، تاثیر می‌گذارد

- ۱- نیروی وزن، ۲- شناوری ۳- دراگ

می‌توان از نیروی شناوری بدلیل اختلاف دانسیته هوا و دانه‌ای اوره ($\rho_p \gg \rho_a$) صرف نظر کرد [۶].

رابطه نیروی دراگ و ضرایب آن در رژیم‌های مختلف معادله (۳) تعریف شده است:

همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود دمای هوای اندازه‌گیری شده با نتیجه‌های به دست آمده از مدل توزیعی، انطباق بسیار خوبی دارد این درحالی است که مدل یکپارچه با داده‌های مذکور منطبق نمی‌باشد.

فرضیات مدل

- ۱- فرایند در حالت ناپایا در نظر گرفته شده است.
- ۲- فضای تهی برج (جزء حجمی برج به دانه‌ها، که توسط هوا اشغال شده) واحد نظر گرفته شده است.
- ۳- مخلوط هوا و بخار آب در برج ایده‌آل در نظر گرفته شده است.
- ۴- با توجه به قطر زیاد برج، می‌توان تغییرات سرعت هوا در جهت شعاع برج را صاف در نظر گرفت.
- ۵- انتقال حرارت هدایتی دانه به دانه ناچیز در نظر گرفته می‌شود.
- ۶- ظرفیت حرارتی هوای مرطوب، دانه‌های مذاب و جامد ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- ۷- رطوبت تعادلی دانه‌ها ثابت فرض می‌شود و تابعی از دما نمی‌باشد.
- ۸- برج کاملاً عایق در نظر گرفته می‌شود.
- ۹- هیچگونه انتقال حرارت از نوع تابشی وجود ندارد.
- ۱۰- اوره مذاب به صورت خالص در نظر گرفته می‌شود و مقدار بیوره آن در حد بالا ۰/۰۹ درصد وزنی و رطوبت (آب) در اوره بین ۰/۵ - ۰/۳ درصد وزنی و رطوبت هوا، ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

(۱) Hopper

جدول ۱- ضریب های استوک در رژیم های مختلف سیال [۶].

رژیم سیال	عدد رینولدز	b	n
Stock	> ۲	۲۴	۱
Intermediate	۲ > Re < ۵۰۰	۱۸٫۵	۰٫۶
Newton's	Re > ۵۰۰	۰٫۴۴	۰

توزیع دما در هوا

توزیع دمای هوا را در طول برج، با مساوی قرار دادن مقدار گرمای خروجی و رطوبت دانه ها و از معادله زیر به دست می آید.

$$\frac{dT_a}{dZ} = \frac{ha(T_a - T_u)}{G_a C_{pa} + G_a C_{pv} W} \quad (11)$$

توزیع رطوبت در هوا

رطوبت موجود در هوا، همان رطوبتی است که دانه ها در طول برج حین خشک شدن، به محیط اطراف خود پس می دهند. این تغییرها از معادله زیر به دست می آید.

$$\frac{dW}{dZ} = \frac{G_u}{G_a} \times \frac{dM}{dZ} \quad (12)$$

توزیع رطوبت در دانه ها

خشک کردن دانه ها تابعی از مشخصات فیزیکی آنهاست. رطوبت دانه ها به مشخصات فیزیکی هوای اطراف آن نیز بستگی دارد. زمانی که دانه ها از بالا به پایین برج سقوط می کنند با از دست دادن آب همراه خود، چروکیده و متخلخل^(۱) می شود، همین عامل بهتر آزاد شدن ازت در خاک را باعث می شود. به منظور به دست آوردن توزیع دما در دانه ها بایستی موازنه رطوبت در دانه های کروی، با فرض ثابت بودن ضریب ثابت نفوذ برای دانه ها نوشته شود.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{rD}{r} \times \frac{\partial M}{\partial r} \quad (13)$$

شرایط اولیه و مرزی

$$M(r, 0) = M_{in} \text{ @ } r < R_p \quad (14)$$

$$M(R_p, t) = M_{eq} \text{ @ } t > 0 \quad ; \quad \frac{dM}{dr} = 0 \text{ @ } t > 0$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a C_D V^2 A_p \quad (3)$$

$$C_D = f(Re) \quad \text{and} \quad Re = \frac{\rho_a V_{rel} D_p}{\mu_a}$$

$$C_D = \frac{b}{Re^n}$$

موازنه انرژی کلی

کل انرژی گرمایی وارد شده به برج، مربوط به هوا و اوره می باشد، که به صورت غیر همجهت وارد برج می شوند و پس از انتقال حرارت، از برج خارج می شوند.

$$m_u H_{uin} + m_a H_{ain} = m_u H_{ue} + m_a H_{ae} \quad (4)$$

موازنه رطوبت کلی

$$m_u (\bar{M}_{in} - \bar{M}_e) = m_a (W_{in} - W_e) \quad (5)$$

توزیع رطوبت و دما در دانه ها

از معادله زیر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت به کمک عدد بدون بعد ناسلت استفاده می شود [۸، ۷].

$$Nu = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{hD_p}{K_u} \quad (7)$$

سرعت هوا در طول برج حدود ۲ m/s بوده، که برای این مقدار، h برابر ۴۰ W/m² c می باشد. (در قطر متوسط ۱/۸ mm)، ضریب حرارتی جامد و مایع به ترتیب ۰/۱۹۱ و ۰/۱۷۴ و همچنین عدد بایوت بین ۰/۰۸ - ۰/۸ (Bi=hs/k) از منابع به دست آمده است [۱۱]. با توجه به پایین بودن این عدد می توان از انتقال حرارت بیرونی در مقابل انتقال حرارت داخلی صرف نظر نمود.

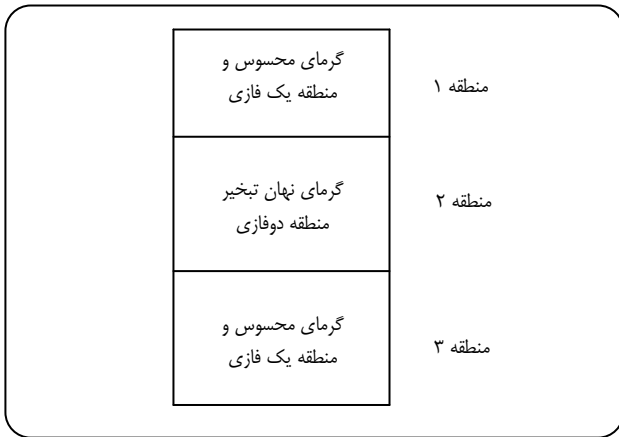
توزیع دما در دانه ها

با نوشتن موازنه جرم و انرژی دانه ها و هوا دور برج، تغییر دمای دانه های اوره در طول برج از معادله زیر به دست می آید.

$$\frac{dT_u}{dZ} = \frac{ha(T_a - T_u)}{G_u C_{pu} + G_u C_{pw} M} \quad (10)$$

$$\frac{h_{fg} - C_{pv}(T_a - T_u)}{G_u C_{pu} + G_u C_{pw} M} G_a \frac{dW}{dZ}$$

(1) Porous



شکل ۶- تقسیم برج به سه ناحیه مجزا.

با دفع حرارت به شکل گرمای نهان تبخیر به شکل معادله دیفرانسیل نوشته می شود [۱۳، ۱۴].

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = \rho_s \lambda V_p \frac{\partial S(z)}{\partial Z} \quad (21)$$

λ گرمای نهان تبخیر اوره به واحد جرم، k_s و k_l به ترتیب ضریب هدایتی اوره جامد و مایع می باشد

$$T \begin{cases} \frac{H}{c_p} < c_p T_m \\ T_m & c_p T_m \leq H \leq c_p T_m + \lambda \\ \frac{H - \lambda}{c_p} & H > c_p T_m \end{cases} \quad (22)$$

T_m : دمای ذوب اوره

c_p, H : آنتالپی و ظرفیت حرارتی اوره

با توجه به اینکه $T=f(H)$ می باشد، برای معادله (۲۱) ابتدا یک Δz_k° حدس زده می شود، در این Δz ، آنتالپی $[H_1^{n+1}]$ با توجه به معادله (۲۲)، به دست می آید. همچنین دما را می توان در این نقطه به دست آورد و حدس مربوطه را در هر مرحله با معادله زیر تصحیح کرد.

$$\Delta z_k^{p+1} = \Delta z_k^p + \Delta z_k^p \left\{ \frac{H_{k+1}^{z+\Delta z_k^p}}{c_p T_m + \lambda} - 1 \right\} \quad (23)$$

همان گونه که ملاحظه می شود، اگر $H_{k+1}^{z+\Delta z_k^p}$ با معادله $(c_p T_m + \lambda) / \lambda = \Delta z_k^{p+1} = \Delta z_k^p$ مساوی شود Δz_k^{p+1} شده و حدس تصحیح می شود.

با حل معادله به روش فوریه به دست می آید [۹، ۱۸]:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{9} S^2\right) \quad (15)$$

$$MR = \frac{M(t) - M(eq)}{M_{in} - M_{eq}} \quad (16)$$

$$S = \frac{A_p}{V_p} (Dt)^{1/2}$$

$$D = 1.5 \times 10^{-7} e^{\left\{ -0.4 \bar{M} + 0.7 \Delta \bar{M} T_{abs} - \frac{250}{T_{abs}} \right\}} \quad (17)$$

شرایط مرزی معادله های دیفرانسیل

شرایط مرزی حل معادله های دیفرانسیل در بالا و پایین برج به شکل زیر می باشد.

$$T_a = T_a(\text{input}) @ Z = H \quad (18)$$

$$T_u = T_u(\text{initial}) @ Z = 0$$

$$W = W(\text{input}) @ Z = H$$

$$\bar{M} = \bar{M}(\text{initial}) @ Z = 0$$

در مدل توزیع دما از شکل ۶ جهت ساده سازی محاسبه ها استفاده می شود. در این شکل، برج به سه منطقه مجزا، از نظر نواحی تغییر فاز مایع به جامد تقسیم می شود.

در منطقه ۱، دانه ها به طور کامل به صورت مذاب بوده و از سطح بیرونی، حرارت را به صورت گرمای محسوس به محیط اطراف انتقال می دهد [۱۳-۱۱].

$$k_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{2k_l}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} = \rho_l c_{p_l} v V_p \frac{\partial T_l}{\partial Z} \quad (19)$$

در منطقه ۲، دانه ها تغییر فاز داده و از سطح بیرونی به سمت مرکز هسته خشک می شوند. شرایط مرزی دانه ها به صورت مرز متحرک بوده و برای حل عددی این معادلات از روش استفان^(۱) استفاده می شود. $S(z)$ را سطح مشترک بین قسمت خشک و مذاب دانه در نظر گرفته می شود و این مرز از 0 تا R_p تغییر می کند.

$$k_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{2k_l}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} = \rho_l c_{p_l} v V_p \frac{\partial T_l}{\partial Z} \quad 0 \leq r < S(z) \quad (20)$$

$$k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{2k_s}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} = \rho_s c_{p_s} v V_p \frac{\partial T_s}{\partial Z} \quad S(z) \leq r < R_p$$

شرایط اولیه و مرزی

موازنه انرژی بین دانه ها و هوا از حالت مایع به جامد، همراه

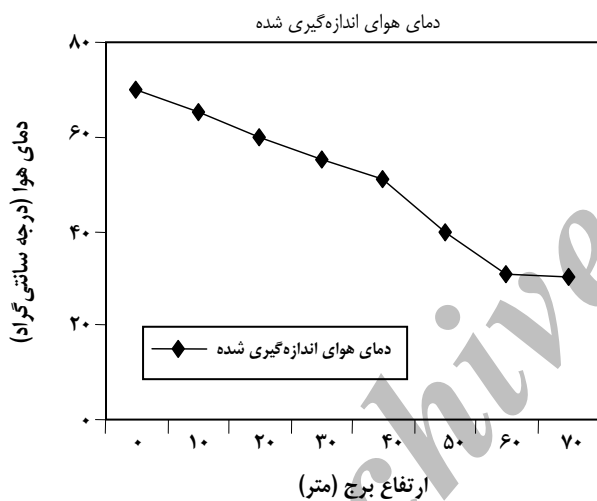
(1) Stephan Method

جدول ۲- معادله‌های تجربی ظرفیت گرمایی اوره با دما [۲۱].

State	Solid	Solid	Melting Point
Temperature Range	۳۱٫۵-۱۲۸٫۰	۱۲۸-۱۳۱٫۳	۱۳۱٫۳-۱۳۸٫۰
Cp(cal/g K)	A+BT+CT ^۲ +DT ^۳	A+BT	A+BT+CT ^۲
A	-۶۳٫۶۱	-۱۲۵٫۹	-۱۰۸۱٫۶
B	-۰٫۳	۰٫۳	۵۳۰٫۶۷
C	۰٫۰۰۰۱۸	-----	-۰٫۶۵
D	۹٫۲	-----	-----

جدول ۳- تغییرهای دما برحسب جریان الکتریسته [۲۲].

مقاومت (Ω)	۱۰۰	۱۱۱٫۶۷	۱۱۹٫۴	۱۳۸٫۵
دما (°C)	۰	۳۰	۵۰	۱۰۰



شکل ۷- تغییرهای دمای هوا در طول برج.

(۱) اندازه دانه‌ها، دمای اولیه، رطوبت اولیه دانه‌ها و هوا، طول برج، همچنین ویژگی‌های فیزیکی آنها، به‌عنوان اطلاعات اولیه به برنامه داده می‌شود.

(۲) معادله‌های دیفرانسیل مربوط به موازنه جرم و انرژی حل می‌شود.

(۳) معادله‌های پیوستگی هوا و حرکت دانه‌ها محاسبه می‌شوند.

اطلاعات تجربی

(الف) دمای هوا، تنها پارامتر قابل اندازه‌گیری در این مدل می‌باشد. این کار در فصل‌های مختلف سال و در شرایط گوناگون آب و هوایی انجام گرفته است. برای به‌دست آوردن پروفیل واقعی دما، از دستگاه اندازه‌گیر^(۱) غیرخطی (Pt-100) متحرک^(۲) استفاده می‌شود. این کار توسط یک کابل ۶۰ متری جهت اندازه‌گیری دما در طول برج استفاده می‌شود. یک سر اندازه‌گیر حرارتی، در برج و سر دیگر آن به یک اهم متر متصل می‌باشد. دمای برج در هر نقطه تبدیل به جریان الکتریکی شده و توسط اهم ثبت می‌شود. جریان اهم متر به کمک منحنی کالیبراسیون^(۳) فاکس پرو^(۴) برحسب دما، رسم می‌شود. خطای اندازه‌گیری دما با این روش، در مدارک فنی^(۵) به میزان $\pm 5\%$ خطا گزارش شده است. برخی از این داده‌ها در جدول ۳ آمده است.

شکل ۷ تغییرهای دمای هوا در طول برج را نشان می‌دهد. در این شکل پروفیل واقعی دمای هوا در طول برج رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بیشترین شیب خط از بالا تا اواسط برج می‌باشد و تغییرهای دما در پایین برج تقریباً ناچیز است. این منحنی نشان می‌دهد که ارتفاع برج به‌خوبی طراحی شده و ارتفاع بیشتر از آن تاثیری بر تغییر شرایط فیزیکی دانه‌ها نخواهد داشت. پارامترهای دیگر مانند رطوبت دانه‌ها، رطوبت هوا و دمای دانه‌ها را فقط به عنوان شرایط ابتدایی و انتهایی می‌توان اندازه‌گیری نمود و امکان اندازه‌گیری آن به‌صورت نقطه‌ای فراهم نمی‌باشد. (ب) توزیع دانه‌ندی اوره در آزمایشگاه به وسیله الک‌های لرزان^(۶) انجام می‌شود. محدوده اندازه این دانه‌ها، در پتروشیمی شیراز در آزمایشگاه کنترل کیفیت به‌دست می‌آید. (ج) تغییرهای ظرفیت گرمایی ویژه اوره برحسب دما به‌صورت داده‌های عددی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ نشان می‌دهد که اوره در حالت جامد دارای ظرفیت گرمایی پایین بوده و در دمای حدود ۴۰۵ K، تغییر فاز می‌دهد.

روش حل مدل

الگوریتم محاسباتی حل این معادله‌ها را می‌توان به این صورت خلاصه نمود [۱۰].

(۱) Transmitter temperature

(۲) Portable

(۳) Calibration

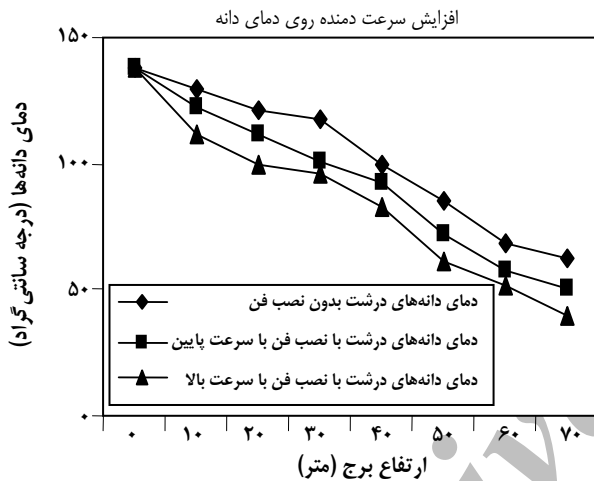
(۴) FoxPro

(۵) Data Sheet

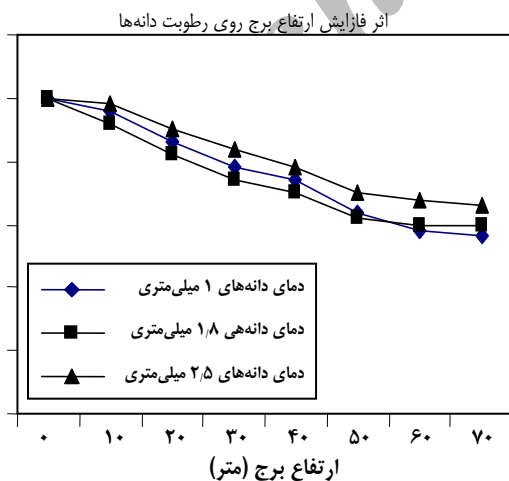
(۶) Shaker Mesh

جدول ۵ - ظرفیت گرمایی ویژه اوره بر حسب دما [۲۰].

T(K)	$C_p \left(\frac{J}{moleK}\right)$	T(K)	$C_p \left(\frac{J}{moleK}\right)$
۳۰۰	۱۲۵	۳۸۰	۱۶۱
۳۱۰	۱۲۹	۳۹۰	۱۶۶
۳۲۰	۱۳۳	۴۰۰	۱۷۰
۳۳۰	۱۳۸	۴۰۲	۲۷۰
۳۴۰	۱۴۲	۴۰۵	۲۰۰۰
۳۵۰	۱۴۷	۴۱۰	۲۹۰
۳۶۰	۱۵۱	۴۲۰	۲۱۰
۳۷۰	۱۵۵	۴۳۰	۱۹۰



شکل ۸ - مقایسه نصب فن و افزایش سرعت فن روی دمای دانه‌های درشت.



شکل ۹ - اثر افزایش طول برج وی کاهش رطوبت در دانه‌ها.

۴) در پایان، نتیجه‌ها را با پارامترهای ابتدایی و انتهایی برج که در فصول مختلف اندازه‌گیری شده، مقایسه می‌شود. در صورت انطباق با داده‌های تجربی، برنامه به پایان می‌رسد.

نتیجه‌ها و بحث

پس از مقایسه نتیجه‌های مدل و داده‌های تجربی نتیجه‌های زیر حاصل می‌شود:

۱- همانگونه که ملاحظه می‌شود مدل یکپارچه همخوانی خوبی با داده‌های تجربی ندارد، ولی مدل توزیعی که توزیع دما را در جهت شعاع دانه‌ها در نظر گرفته، تحلیل بهتری از مدل را نشان می‌دهد.

پس از اطمینان از صحت نتیجه‌های معادله‌ها با داده‌های تجربی، نوبت به بررسی (رطوبت دانه‌ها، رطوبت هوا، دمای دانه‌ها) می‌رسد، نتیجه‌های حاصل از این پارامترها در نمودارهای بعدی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به اینکه در حال حاضر واحدهای تولید اوره کشور، بیشتر از ظرفیت طراحی خود تولید دارند، همین عامل باعث خوب خشک نشدن دانه‌های درشت و متوسط شده و راندمان برج را به شدت کاهش می‌دهد. خوب خشک نشدن دانه‌ها عامل اصلی چسبیدن دانه‌ها در دیواره و پایین برج و تشکیل کلوخه می‌باشد. در نهایت کلوخه‌ها به عنوان محصول دورریز^(۱) انبار می‌شوند.

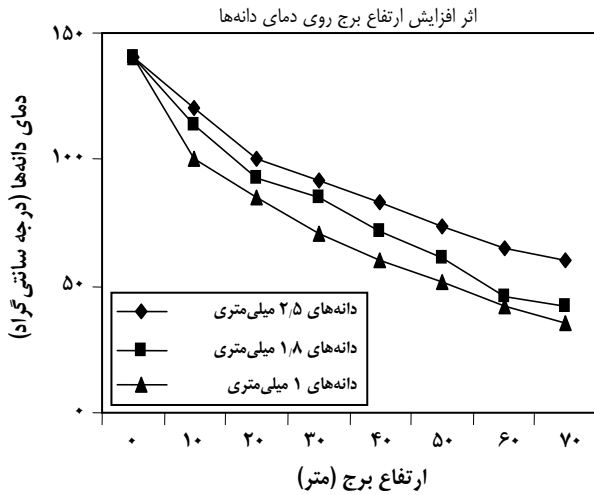
نتیجه‌های به دست آمده از مدل، نشان می‌دهد افزایش دبی هوای ورودی می‌واند تاثیر به‌سزایی روی عملکرد برج در شرایط کنونی داشته باشد، در نتیجه به نظر می‌رسد نصب و تقویت مکند^(۲) هوا در بالای برج راندمان آنرا به‌طور چشمگیری افزایش دهد. شایان ذکر است افزایش سرعت هوا به تنهایی حلال مشکل نخواهد بود، و سرد و خشک بودن هوا از مواردی است که حتماً بایستی برای هوا به عنوان عامل اصلی انتقال حرارت و جرم مد نظر گرفته شود. به همین دلیل در شهرهایی مانند شیراز و بجنورد که دارای رطوبت کمتری نسبت به ماهشهر هستند، برج‌های دانه بندی در آنها از عملکرد بهتری برخوردار است.

۲- در شکل ۸ مشاهده می‌شود که افزایش سرعت هوا در برج، باعث افزایش عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت (h) و دفع بهتر رطوبت در دانه‌ها می‌شود. این افزایش سرعت بر روی دانه‌های درشت، تاثیر چشمگیری دارد.

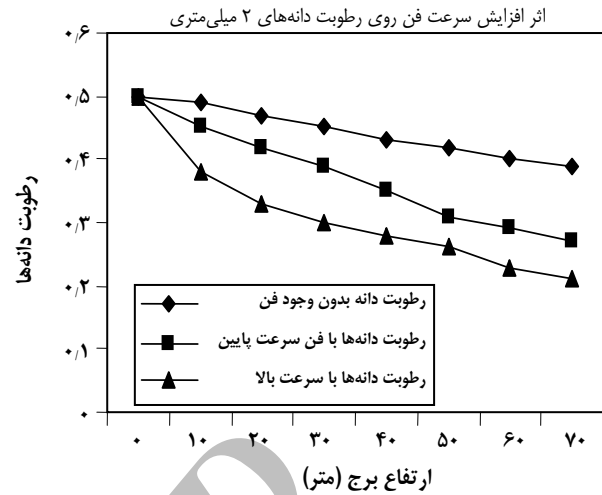
۳- افزایش طول برج، تاثیر چندانی بر تغییر پارامترهای حساس

(۱) Off Spec

(۲) Fan



شکل ۱۱- توزیع دما در دانه‌های با اندازه‌های مختلف.



شکل ۱۰- اثر نصب فن روی کاهش رطوبت دانه‌ها.

برروی استقامت دانه‌ها و هم شکل بودن آنها در مرحله ابتدایی و هسته‌زایی داشته باشد. این عملیات باعث ایجاد هسته‌های ریز و مقاوم در دانه‌ها می‌شود.

(۴) پیشنهاد می‌شود، یک سیستم بستر سیال در پایین برج نصب شود، این سیستم موجب خنک شدن دانه‌ها و سیال نمودن آنها می‌شود و از کلوخه شدن آنها جلوگیری می‌نماید.

(۴) ایجاد یک لایه لاستیکی^(۱) روی دیواره‌ها و انتهای برج جهت پیشگیری از وارد آمدن ضربه و شکسته شدن آنها و در نهایت جلوگیری از تشکیل پل کریستالی و کلوخه در طرفین انتهای برج؛

(۵) استفاده از یک ماده شیمیایی ضد کلوخه از جنس اوره فرمالدئید در همزن ذخیره اوره مذاب، بی‌تأثیر نمی‌باشد.

(۶) نصب سبدهای چرخان در بالای برج و تنظیم دور آن جهت تشکیل دانه‌هایی با اندازه ریز و متوسط

(۷) ایجاد یک پوشش گوگردی برروی دانه‌های اوره جهت عدم تشکیل کلوخه در انبارهای نگهداری محصول

فهرست نمادها

A_p	سطح دانه‌ها به واحد حجم (m^2/m^3)
a	ضریب دراگ (بدون بعد)
C_{pa}	ظرفیت حرارتی هوا ($J/kg \text{ } ^\circ C$)
C_{pu}	ظرفیت حرارتی اوره مذاب

(۱) Seeding

(۲) Rubber Lining

از جمله رطوبت نخواهد داشت. در ارتفاع بیش از ۵۰ متر شیب ثابت می‌شود. که این امر نشان دهنده این است که ارتفاع بیشتر از ۶۰ متر تأثیری بر کاهش رطوبت در دانه‌ها ندارد.

(۴) شکل ۱۰ اثر افزایش سرعت فن، را جهت کاهش رطوبت به خوبی نشان می‌دهد. افزایش مقدار هوا که توسط مکنده به داخل برج انجام می‌شود، موجب کاهش دما و رطوبت دانه‌ها در اوره می‌شود. این امر باعث کاهش میزان کلوخه می‌شود.

۵- شکل ۱۱ توزیع دما در اندازه‌های مختلف دانه‌ها را نشان می‌دهد. دمای دانه‌های درشت در پایین برج از دمای دانه‌های ریز بیشتر است و این امر باعث عدم خشک‌شدن بهتر دانه‌ها و ایجاد کلوخه در پایین برج می‌باشد.

نتیجه‌گیری

(۱) با توجه به نمودارها، افزایش جریان هوا در برج باعث کاهش رطوبت و دما در دانه‌ها می‌شود و با توجه به اینکه این دو متغیر از عامل‌های اساسی کاهش کلوخه می‌باشد. بنابراین اضافه نمودن فن مکنده در بالای برج پیشنهاد می‌شود.

(۲) خشک کردن هوای ورودی می‌تواند تأثیر بسزایی بر عملیات خشک‌سازی دانه‌ها و انتقال حرارت داشته باشد. این کار به کمک نصب چند هیتر در ورودی هوا امکان‌پذیر می‌باشد.

(۳) الگو برداری از برج دانه‌بندی پتروشیمی رازی و بجنورد که در آنها عملیات بذر پاشی^(۱) انجام می‌شود، می‌تواند تأثیر زیادی

m	جریان جرمی اوره (kg/s)	C_{Ps}	ظرفیت حرارتی اوره جامد
Nu	ناسلت (بدون بعد)	C_{Pv}	ظرفیت حرارتی بخار آب
Pr	عدد پراتل (بدون بعد)	D	ضریب نفوذ بخار آب در هوا
R	شعاع برج (m)	d_p	قطر دانه‌ها (mm)
R_p	شعاع دانه‌ها (m)	G_a	جریان جرمی هوا (kg/m^2s)
Re	عدد رینولدز (بدون بعد)	G_U	جریان جرمی اوره (kg/m^2s)
W	رطوبت نسبی هوا	h	ضریب جابجایی (W/m^2C)
W_{in}	رطوبت ورودی هوا	M	رطوبت دانه‌ها بر مبنای خشک
		\bar{M}	رطوبت متوسط دانه‌ها
		m_a	جریان جرمی هوا (kg/s)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۲/۲۱ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۱۲

مراجع

- [1] Considine D.M., "Chemical and Process Technology Encyclopedia", McGraw-Hill, New York (1974).
- [2] Hanti G.D., "The Nitrogen Industry", Academia Kiado, Budapest (1976).
- [3] UNIDO, United Nations, Fertilizer Manual, Development and Transfer of Technology, Series No. 113, New York (1980).
- [4] Shiraz Petrochemical Complex, Manual of Urea Plant, Stamicarbon co., Netherlands, (1975).
- [5] Razi Petrochemical Complex, Manual of New Urea Plant. Stamicarbon Co., Netherlands (1974).
- [6] Perry H.R., Chilton H.C., "Chemical Engineering Hand Book", 6th ed., McGraw-Hill, New York (1984).
- [7] Holman J.P., "Heat Transfer", SI metric ed., McGraw-Hill, Singapore (1989).
- [8] Chapman A.J., "Heat Transfer", 4th ed., McGraw-Hill, New York (1984).
- [9] Crank J., "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press., Oxford, England (1957).
- [10] Hustruid A., Flicker A.M., Theoretical Curve for Shelled Corn, *Trans. ASAE*, **2**, p. 112 (1959).
- [11] Brodkey R.S, Hary C.H., "Transport Phenomena", McGraw-Hill, Singapore (1988).
- [12] Ranz W.E., Maeshall W.R., Evaporation from Drop, *Chem. Eng. Prog.*, **48**(3), p. 141 (1952).
- [13] Crowley A.B., Numerical Solution of Stefan Problems, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **21**, p. 215 (1978).
- [14] Voller V., Cross M., Accurate Solution of Moving Boundary Problems Using the Enthalpy Method, *Int. J. Heat and Mass transfer*, **24**, p. 545 (1983).
- [15] Tacke K.H., Discrimination of the Explicit Enthalpy Method for Planar Phase Change, *Int. J. Num. Methods in Eng.*, **21**, p. 543 (1985).
- [16] Arpaci V.S, "Conduction Heat Transfer", Addison Wesley, Handcover (1960).
- [17] Ozisik M.N., "Heat Conduction", John Wily, New York (1980).
- [18] Hustrild A., Flikkled, Theoretical Curve for Shelled Corn, *Trans. ASAE*, **2**, p. 112 (1959).

- [19] www.npc-rt.ir
- [20] Anderson O., Matsuo T., Suga H., Ferloni P., Low- Temperature Heat Capacity Of urea, *J Thermo physics*, **14**(1), p. 149 (1993).
- [21] Gambino M., Bros J.P., Capacity Calorifique De L' Urea ET De Quelques Melanges Eutectiques a Base D'Urea, "30 et Thermo Chim Acta.", **127**, pp. 223-236 (In French) (1988).
- [22] Fox Pro. Data sheet. Issue in Instrumentation unit. Shiraz petroc[1]. Considine D.M., Chemical and Process Technology Encyclopedia, McGraw-Hill, New York (1974).

Archive of SID