مدل‌سازي رياضي جذب غيرهم‌دماى گاز در يک سامانه‌ي جذب داراي جريان‌هاي برخوردي محوري

امير رحيمي*+، اميرحسين هرندي‌زاده

اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشكده مهندسي، گروه مهندسي شيمي، صندوق پستي ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱

محمدرضا احسانی

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشكده مهندسي شيمي، كد پستي ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

چكيده: در اين پژوهش فرايند جذب غيرهم‌دماي گاز در يك سامانه‌ي جذب داراي جريان هاي برخوردي شامل دو فاز پيوسته و ناپيوسته مورد مدل‌سازي قرار گرفته است. بدين منظور معادله‌هاي حاكم بر رفتار هر فاز براساس قوانين بقاء شامل قوانين بقاي جرم، انرژي و ممنتوم تبيين و با روش عددي حل شده است. براي دستيابي به يك مدل واقعي‌تر، توزيع اندازه‌ي قطره‌ها در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. نتيجه‌هاي حاصل از مدل، با داده‌های تجربی مربوط به جذب گازهاي كربن دي اكسيد و استن در آب مقايسه و دقت نسبی پاسخ‌های مدل مورد تأييد قرار گرفته است. هم‌چنين تاثير پارامترهاي عملياتي شامل سرعت گاز ورودی، دماي گاز ورودي و اندازه‌ي قطره‌ها بر سرعت جذب و راندمان سامانه تعيين شده است. افزون بر اين راندمان عملكرد اين نوع از سامانه‌ها در مقايسه با سامانه‌هاي متداول تك جرياني مورد بررسي قرار گرفته است. نتيجه‌هاي به دست آمده حاكی از عملكرد بسيار مطلوب سامانه‌ي جذب دارای جريان‌هاي برخوردي است.بنابراين در صورت طراحي دقيق ابعاد اين نوع سامانه‌ها و بسته به شرايط عملياتی مورد استفاده در خصوص عمليات جذب گاز، راندمان كلي اين نوع جذب‌كننده، در مقايسه با ساير جذب‌كننده‌های متداول بسيار بيشتر است.

واژه‌های كليدي: مدل‌سازي، جذب گاز، جريان‌هاي برخوردي، غير هم‌دما.

***KEY WORDS**: Modeling, Gas absorption, Impinging streams, Non-isothermal.*

مقدمه

از هدف‌هاي مورد تعقيب پژوهشگران در طراحی واحدهای جذب گاز، به‌ويژه جذب‌های همراه با واكنش كه در آن‌ها عمده مقاومت در مسير انتقال جرم مقاومت نفوذ در فاز گاز است، طراحی واحدهاي عمليـاتی است كه در آن‌ها افزايـش سرعت نسبی بين دو فـاز و سطح تماس ميسر شـود. بديهی است واحدهای عملياتی متـداول فعلی نظيـر برج‌های پرشده يا پاششی به دليل برخی محدوديت‌های ساختاری و عملياتی امكان دستيابي به چنين خواسته‌هايی را ممكن نمی‌سازند. با عنايت به اين ديدگاه و توسعه نظري و كاربرد راكتورهای با جريان‌های برخوردی ISR_S[1]، به‌نظر می‌رسد كه امكان حصول خواسته پيش‌گفته در عمليات جذب نيز ميسر خواهد شد. اصول راكتورهای با جريان‌هاي

*عهده دار مكاتبات

+E-mail:Rahimi@eng.ui.ac.ir

(۱) Impinging streams reactors

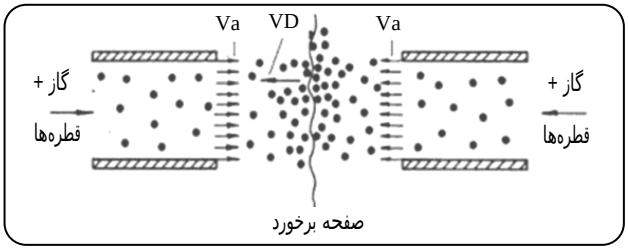
برخوردي در اوايل دهه ٦٠ ميلادي به منظور به‌كارگيري در فرايندهاي انتقال توسط *Elperin* مورد بررسي قرار گرفت[١]. با توجه به ويژگی‌های راکتورهای با جريان‌های برخوردی، اين روش براي جذب گازها در مايعات توسط *Gaddis*، *Vogelpohl*، *Ponikarov* و *Tamir* به‌كار برده شده و ويژگي‌هاي رفتاری اين سامانه‌ها شامل تقويت شدت جذب، نوع رژيم جريان و شرايط عملياتی بهينه بررسي شد [٦ ـ ٢].

در راکتورهای با جريان‌هاي برخوردی جهت عمليات جذب دو يا چند جريان گازي شامل قطره‌هاي مايع در مسيرهاي متقابل به سمت هم جريان يافته و درناحيه برخورد و مطابق شكل ١، با يكديگر برخورد مي‌كنند. ناحيه برخورد به‌طور عمومي به شكل دايره‌اي و در فضايي بين دو لوله ورودي به راكتور كه روي يک محور تعبيه شده‌اند، قرار دارد. بنابراين، اين نوع سامانه‌ها مي‌توانند خيلي كوچک باشند[٧]. قطره‌ها با توجه به اينرسي خود در جريان مقابل نفوذ كرده و سرعت آن‌ها تا رسيدن به ايستايي كامل، روند نزولي خواهد داشت كه اين امر ناشي از اعمال نيروي دراگ گاز در خلاف جهت حركت قطره‌هاست. سپس قطره‌ها در جهت حركت جريان گاز شتاب گرفته و در جريان اصلي نفوذ مي‌كنند و از مسير جريان و محفظه برخورد خارج مي‌شوند. به دليل حركت سريع و ناپاياي قطره‌ها در محفظه برخورد، زمان ماند متوسط آن‌ها در محفظه به طور قابل ملاحظه‌اي بالا مي‌رود و برخوردهاي ميان قطره‌ها نيز افزايش مي‌يابد كه در نتيجه فرايندهاي انتقال جرم و انتقال حرارت بين جريان گاز و قطرات شدت مي‌گيرد. بنابراين، سامانه‌ي حاوي جريان‌های برخوردي، فرايند جذب را بسيار تشديد مي‌كند درحالي كه عمليات جذب در زمان كوتاه‌تري صورت مي‌گيرد. بازده بالا،كيفيت مناسب فراورده و مصرف كم انرژي از مزيت‌هاي استفاده از راكتورهاي داراي جريان‌هاي برخوردي به شمار مي‌آيند و پيش‌بيني مي‌شود استفاده از راكتورهاي داراي جريان‌هاي برخوردي در فرايند جذب، كاربردهاي صنعتي بسياري در دنياي مهندسي داشته باشد [٧].

مشخصه جذب‌كننده‌ي با جريان‌هاي برخوردي اين است كه بخش اصلي فرايندهاي انتقال جرم و حرارت در ناحيه برخورد دو فاز شامل قطره‌ها صورت مي‌گيرد. به استناد ويژگي‌هاي هيدروديناميكي منحصر به فرد اين سامانه‌ها، برخي مشخصه‌ها در مقايسه با جذب كننده‌هاي رايج شديدتر به نظر مي‌رسند.

از آن جمله مي‌توان به موارد زير اشاره كرد:

حركت نوساني قطره‌هاي مايع، تلاطم شديد در ناحيه برخورد،



شكل ١ـ شِما و جريان‌های يک راكتور با جريان‌هاي برخوردي محوری.

افزايش ضريب‌هاي انتقال حرارت و جرم، افت شديد ممنتوم و فشار در ناحيه برخورد.

راكتورهاي داراي جريان‌هاي برخوردي با نازل‌هاي افشان در عمليات جذب و واكنش‌هاي شيميايي دوفازي بازده قابل توجهي از خود نشان داده‌اند. اين امر را مي‌توان به پديده‌هاي زير مرتبط دانست [٨]:

١ـ جريان متقابل قطره‌ها باعث افزايش در سرعت نسبي فازها و از اين‌رو، باعث كاهش مقاومت انتقال جرم در فاز گاز مي‌شود.

٢ـ حركت‌هاي نوساني قطره‌ها باعث افزايش در زمان ماند متوسط قطره‌ها مي‌شود.

٣ـ شكست قطره‌ها به قطره‌هاي كوچک ناشي از فرايند برخورد و نيروي تنشي وارد از طرف فاز گازي به قطره‌ها در صفحه برخورد باعث افزايش سطح بين فازي و هم‌چنين پديده تجديد سطوح مي‌شود.

٤ـ برخوردهاي بين قطره‌ها و تغيير شكل آن‌ها افزون بر نيروهاي تنش سطحي باعث ايجاد يک گردش داخلي ميان قطره‌ها و از اين‌رو تشديد فرايند انتقال جرم مي‌شود.

در اين مطالعه سعي شده است عليرغم پيچيدگي‌هاي عملكردي اين نوع سامانه‌ها, عملكرد يك جذب‌كننده با جريان‌هاي برخوردي به صورت بسيار ساده و مفهومی و براساس قوانين بقاء، مدل‌سازي شده و بازده آن در مقايسه با انواع متداول جذب‌كننده‌ها مورد بررسي و مقايسه قرار گيرد. در اين مطالعه موضوع اثبات مزيت اين نوع جذب‌كننده‌ها به طور صرف در زمينه تشديد تبادل حرارت و جرم مدنظر قرار گرفته است. هم‌چنين جهت دستيابی به مدل واقعی‌تر، توزيع اندازه‌ي قطره‌ها به جای استفاده از يک اندازه‌ي متوسط برای قطر قطره به كار برده شده است.

مدل‌سازي رياضي

در اين بخش با توجه به فيزيک و ساختار جذب‌كننده مدنظر، معادله‌ها مربوط به بقاي جرم, انرژي و ممنتوم با لحاظ توزيع

اندازه‌ي قطره‌ها براي فاز مايع تبيين مي‌شود. بدين منظور و با هدف درك صحيح عملكرد سامانه در شكل ۲ مسير حركت يك قطره مايع به عنوان مهم‌ترين مشخصه اين نوع راكتورها كه تأثير به‌سزايي در ميزان تبادل حرارت و جرم دارد نشان داده شده است. انتقال حرارت و جرم بين قطره و فاز گازی در مسير حركت رفت و برگشتی قطره و تا زمان خروج آن از سامانه صورت مي‌گيرد.

قطره در نقطه ۱ وارد سامانه مي‌شود، سپس به دليل اعمال نيروی دراگ از طرف فاز گاز شتاب می‌گيرد. نقطه ۲ سطح برخورد جريان گاز با توده گازي است كه به طور هم‌محور و در خلاف جهت آن جريان دارد. آرايش جريان در جهت مخالف در طول يک محور براي مخلوط سبب تشديد برخوردهاي بين قطره‌ها، نفوذ متقابل و چرخش قطره‌ها از يک جريان به جريان ديگر می‌شود. پديده نفوذ قطره‌ها با توجه به اينرسي آن‌ها اتفاق مي‌افتد و با نفوذ قطره به درون جريان مقابل، ناحيه شتاب منفي (كاهش سرعت) آغاز مي‌شود (از نقطه ۲ و تا رسيدن به نقطه ۳). قطره در پايان اين مسير دوباره شتاب گرفته و به جريان اصلي برمي‌گردد. پس از آن سرانجام سرعت آن كاهش يافته و به صفر مي‌رسد (نقطه ٤). بدين ترتيب حركت نوساني و رفت و برگشتي قطره از يك جريان به درون جريان مقابل تكرار شده تا جايي كه به هر دليل فضاي سامانه را در نقطه‌ای همانند نقطه ۵ ترك كند.

جهت بررسی شدت تقويت جذب گاز در سامانه‌های دارای جريان‌های برخوردی ناشی از افزايش ضريب‌هاي انتقال و زمان ماند قطره‌ها، شاخص شدت تقويت جذب به صورت زير تعريف می‌شود:

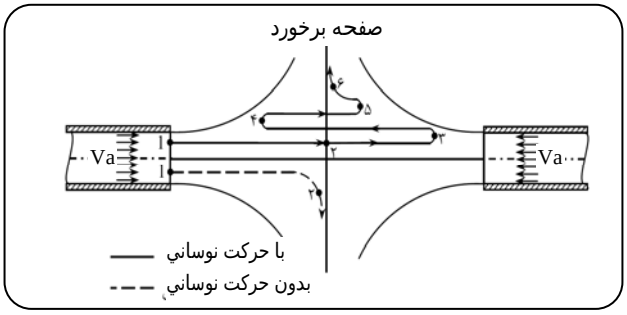
$$E = \frac{R_1}{2R_2} \qquad (1)$$

كه در آن R_1 ، سرعت جذب در سامانه‌های دارای جريان‌های برخوردی و R_2 سرعت جذب در سامانه‌های تک جريانی (در غياب حركات نوسانی قطره‌ها) مطابق شكل ۳ است. جذب‌كننده‌ی تک جريانی در واقع همان سامانه دارای دو جريان برخوردی با وجود تيغه حايل در فضای برخورد است. بديهی است كه E بزرگتر از واحد باشد.

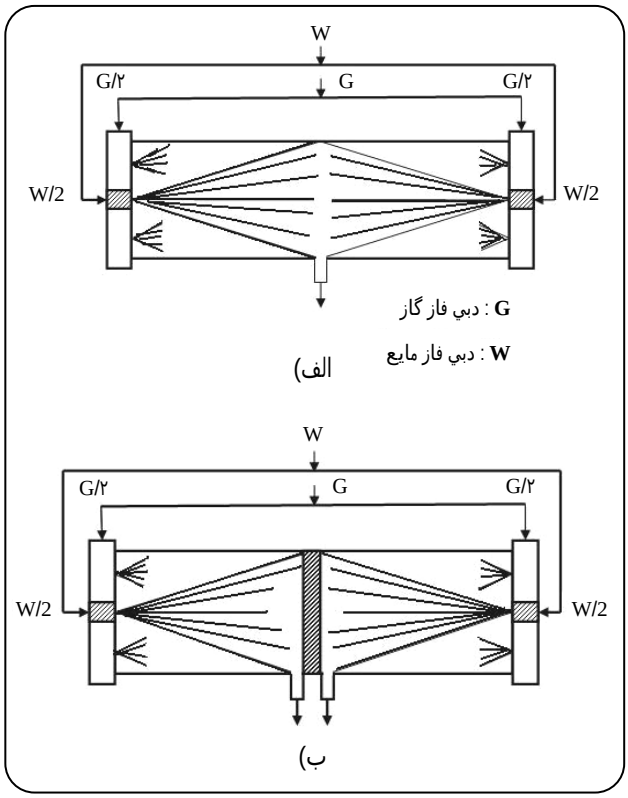
فرضيه‌هاي به‌كار رفته در اين مدل‌سازي به قرار زير هستند:

۱ـ جريان دو فاز در درون راكتور به صورت قالبي است لذا توزيع پارامترهای عملياتی نظير دما، سرعت و غلظت به‌طور صرف در جهت محور سامانه در نظر گرفته می‌شود.

۲ـ از رشد يا كاهش اندازه‌ي قطره‌ها ناشی از برخورد قطره‌ها به يكديگر يا شكست قطره‌هاي اوليه صرفنظر می‌شود.



شكل ۲ـ مسير فرضی حركت قطره درون راكتـور داراي جريـان‌هـای برخوردي محوري جهت مدل‌سازی فرايند.



شكل ۳ـ شمايی از الف) يك جذب كننده دارای دو جريـان برخـوردی ب) دو جذب‌كننده تک جريانی.

۳ـ خواص ترموفيزيكی گاز از قبيل چگالي، ظرفيت گرمايي، گرانروي و ... براي يك گاز مشخص ثابت و تنها با تغيير دماي گاز تغيير مي‌كنند.

۴ـ سامانه نسبت به محيط آديباتيک فرض می‌شود.

۵ـ از توزيع دمای درون قطره به‌دليل كوچک‌بودن قطر قطره‌ها صرف‌نظر می‌شود.

در ادامـه معادله‌هـاي حاكم بـر عملكرد يک جـذب‌كننـده با جريان‌های برخوردی محوری ارايه می‌شود.

معادله‌ي موازنه جرم جزیی برای CO_2 در فاز گازی

معادله‌ي تغییرهاي جزء جذب‌شونده CO_2 (جزء B) در فاز گازی با لحاظ توزیع اندازه‌ي قطره‌ها مایع درطي فرایند جذب به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{dy_B}{dZ} = -\sum_{i=1}^{N} \frac{6Q_W.P_i.D_{Di}^2}{G.D_{ii}^2.V_{Di}} N_{Bi}\left[1+\frac{N_{Ai}}{N_{Bi}}y_B\right] \qquad (۲)$$

که P_i درصد حجمی قطره‌هاي کلاس iام است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_i = f(D)dD \qquad (۳)$$

که در آن f(D) تابع توزیع حجمی فرکانسی است.

N_{Ai}، شار تبخیر از قطره iام است که به‌شکل زیر قابل محاسبه است:

$$N_{Ai} = k_{yi}(y_A^* - y_A) \qquad (٤)$$

در این معادله y_A^* کسر مولی رطوبت روی سطح قطره، y_A کسر مولی رطوبت در توده جریان گازی است.

N_{Bi} شار جذب جزء CO_2 از فاز گاز در قطره iام به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$N_{Bi} = k_{yBi}(y_B - y_B^*) \qquad (۵)$$

در این معادله y_B کسر مولي CO_2 در فاز گازی و y_B^* کسر مولي بخار اشباع CO_2 در حال تعادل روی سطح قطره است که با توجه به قانون رائولت به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$y_B^* = \frac{X_B.\gamma_B.P_B^{Sat.}}{P_t} \qquad (٦)$$

که در آن γ_B ضریب فیوگاسیته است که با تقریب قابل قبولی برابر با یک فرض می‌شود. X_B، جزء مولی CO_2 جذب شده در قطره است. با توجه به حلالیت بسیار کم CO_2 در آب، فشار بخار اشباع CO_2 در حال تعادل با قطره از قانون هنری به شکل زیر پیروي می‌کند:

$$P_B^{Sat.} = K_H.X_B \qquad (۷)$$

که در آن K_H ثابت قانون هنری به صورت تابعی از دما به شکل زیر است [۹]:

$$K_H = ۳۹/۲۹T_{Di} + ۶۴۴/۳ \qquad (۸)$$

معادله‌ي تغییرهاي جزء جذب شونده در فاز گاز، معادله‌ي (۲)، به پارامترهایی مانند قطر قطره، سرعت قطره، دمای قطره، دمای گاز، رطوبت گازي سامانه و CO_2 تجمعی در قطره آب به‌طور مستقیم یا مستتر در قالب برخي علایم موجود در معادله‌ي (۱) مرتبط است که در ادامه به معادله‌هاي تغییر این پارامترها بر حسب مکان پرداخته می‌شود.

معادله‌ي موازنه انرژی برای فاز گاز

تغییرهاي آنتالپی گاز در طول سامانه مورد مطالعه ناشی از فرایند تبادل حرارت جابجایی با قطره‌ها، تبخیر قطره‌ها و افزوده شدن آنتالپی بخار حاصل به گاز و کاهش آنتالپی آن ناشی از خروج جزء CO_2 از آن و انتقال آن به قطره‌هاست. لذا با برقراری معادله‌ي موازنه انرژی برای گاز، معادله تغییرهاي آنتالپی آن در طول سامانه با وجود توزیع اندازه‌ي قطره‌هاي مایع به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$G_y'H|_Z - G_y'H|_{Z+\Delta Z} - \sum_{i=1}^{N} h_{Di}.A_{Di}.\frac{\Delta Z}{V_{Di}}(T_g - T_{Di}) + \qquad (۹)$$
$$\sum_{i=1}^{N} N_{Ai}.M_A.A_{Di}.\frac{\Delta Z}{V_{Di}}\lambda_0 +$$
$$\sum_{i=1}^{N} N_{Ai}.M_A.A_{Di}.\frac{\Delta Z}{V_{Di}}.C_{PD}(T_g - T_{Di}) -$$
$$\sum_{i=1}^{N} N_{Bi}.M_B.A_{Di}.\frac{\Delta Z}{V_{Di}}.C_{PB}(T_g - T_{Di}) = 0$$

A_{Di} مساحت سطح قطره کلاس iام بر واحد زمان به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_{Di} = \frac{Q_W'}{\frac{\pi}{6}.D_{ii}^3}.\pi.D_{Di}^2.P_i \qquad (۱۰)$$

با عنایت به ناچیز بودن دو جمله آخر سمت چپ (گرمای محسوس گاز) معادله‌ي (۹) در مقایسه با جمله‌های مرتبط با گرمای نهان تبخیر و با لحاظ اینکه آنتالپی یک گاز به صورت زیر قابل تعریف است:

$$H|_{at\ T_g} = C_S(T_g - T_0) + Hu.\lambda_0 \qquad (۱۱)$$

معادله‌ي (۹) به معادله زیر که بیانگر تغییرهاي دمای گاز در طول سامانه است ساده می‌شود:

$$\frac{dT_g}{dZ} = -\sum_{i=1}^{N} \frac{6Q_W.P_i.D_{Di}^2.h_{Di}}{G_y'.C_S.D_{ii}^3.V_{Di}}.(T_g - T_{Di}) \qquad (۱۲)$$

معادله‌ي موازنه انرژی برای قطره آب

معادله‌ي تغييرهاي دماى قطره در طول سامانه به صورت زير به دست مى‌آيد:

$$\frac{dT_{Di}}{dZ}=\frac{\left[h_{Di}.\pi D_{Di}^{2}.(T_g-T_{Di})-N_{Ai}.\pi D_{Di}^{2}.M_A.\lambda_0\right]}{m_{Di}.C_{PD}.V_{Di}} \qquad (۱۳)$$

كه در سامانه‌ي مورد مطالعه تبادل حرارت جابه‌جايى قطره‌ها با گاز و تبخير قطره‌ها و افزوده شدن آنتالپى بخار حاصل از آن به گاز از عوامل اصلى تغييرهاي دماى قطره در طول سامانه است.

معادله موازنه جرم برای رطوبت سامانه

معادله تغييرهاي رطوبت گاز در طول سامانه مورد مطالعه به صورت زير به دست مى‌آيد:

$$\frac{dHu}{dZ}=\sum_{i=1}^{N}\frac{۶Q_W.P_i.D_{Di}^{2}.N_{Ai}.M_A}{D_{ii}^{2}.V_{Di}.G_y'} \qquad (۱٤)$$

معادله‌ي موازنه جرم برای قطره‌ي آب

تغيير قطر قطره با زمان، از برابرى سرعت تغيير جرم با سرعت انتقال بخار آن به توده گازى به دست مى‌آيد:

$$\frac{dm_{Di}}{dt}=-N_{Ai}.\pi D_{Di}^{2}.M_A \qquad (۱۵)$$

و در نهايت معادله‌ي تغييرهاي قطر قطره بر حسب طول سامانه با عنايت به وابستگى جرم و قطر قطره و هم‌چنين سرعت قطره به صورت زير بيان مى‌شود:

$$\frac{dD_{Di}}{dZ}=-\frac{۲N_{Ai}.M_A}{\rho_L.V_{Di}} \qquad (۱۶)$$

معادله‌ي موازنه جرم جزئى برای $CO_۲$ تجمعى در قطره آب

معادله‌ي تغييرات جزء جذب شونده در طي عمليات جذب در قطره به صورت زير مي‌باشد:

$$N_{Bi}.\pi D_{Di}^{2}-۰=m_{Di}.\frac{dx_B}{dt} \qquad (۱۷)$$

در نتيجه معادله‌ي تغييرهاي جزء جذب شونده برحسب طول سامانه به صورت زير قابل بيان است:

$$\frac{dx_B}{dZ}=\frac{N_{Bi}.\pi D_{Di}^{2}}{m_{Di}.V_{Di}} \qquad (۱۸)$$

در اين معادله x_B نسبت مول‌هاى $CO_۲$ موجود در قطره به جرم قطره است.

معادله‌ي موازنه مومنتوم برای قطره آب

محاسبه‌ي ضريب‌هاي انتقال جرم در معادله‌هاي پيش، منوط به دانستن سرعت لحظه‌اي قطره است. از سويي باتوجه به ساختار اين نوع راكتورها كه پيشتر درخصوص آن توضيح داده شد رفتار قطره‌ها از نظر حركتي پيچيده بوده و نيازمند تبيين معادله‌هاي مربوط به صورت جامع است. بدين لحاظ در ادامه به بيان معادله‌هاي مربوط به حركت قطره‌ها پرداخته شده است.

براساس قانون دوم نيوتن معادله‌ي موازنه ممنتوم براي قطره قابل بيان است[۷].

$$m_{Di}\frac{d\vec{V}_{Di}}{dt}=m_{Di}\vec{a}_e-\left(\frac{m_{Di}}{\rho_{Di}}\right)\rho_a\vec{a}_e- \qquad (۱۹)$$
$$۰/۵C_f\rho_aA_D\,|\vec{V}_{Di}-\vec{V}_a|\,(\vec{V}_{Di}-\vec{V}_a)$$

كه $\vec{a}_e$ شتاب حركت قطره، ρ_a چگالى گاز و A_D مساحت سطح تصوير قطره است و به صورت زير قابل محاسبه است:

$$A_D=\frac{\pi}{۴}D_{Di}^{2} \qquad (۲۰)$$

عبارت سمت راست معادله‌ي (۱۹) حاصل‌جمع برداري سه نيروي وزن، شناوري و دراگ است كه بر قطره وارد مي‌شوند. با ناچيز فرض كردن تاثير نيروي ثقل ناشي از زمان ماند اندك قطره و هم‌چنين نيروي شناوري وارد بر آن معادله‌ي موازنه ممنتوم به صورت زير به دست مي‌آيد:

$$\frac{dV_{Di}}{dZ}=-\frac{۰/۷۵C_f\rho_a}{V_{Di}.\rho_{Di}D_{Di}}\,|V_{Di}-V_a|\,(V_{Di}-V_a) \qquad (۲۱)$$

وقتي قطره دوره شتاب مثبت را مي‌پيمايد با توجه به اينكه $|V_{Di}-V_a|=V_a-V_{Di}$ معادله‌ي مورد استفاده به شكل زير است:

$$\frac{dV_{Di}}{dZ}=\frac{۰/۷۵C_f\rho_a(V_a-V_{Di})^{2}}{V_{Di}.\rho_{Di}D_{Di}} \qquad (۲۲)$$

در دوره شتاب منفي نيز با توجه به اينكه $|V_{Di}-V_a|=V_{Di}+V_a$ و $dV_{Di}/dt=-dV_{Di}/dt$ معادله‌ي اصلي عبارت خواهد بود از:

$$\frac{dV_{Di}}{dZ}=-\frac{۰/۷۵C_f\rho_a(V_a+V_{Di})^{2}}{V_{Di}.\rho_{Di}D_{Di}} \qquad (۲۳)$$

دو معادله (۲۲) و (۲۳) برحسب اینکه قطره در چه ناحیه‌اي واقع است بیانگر تغییرهاي سرعت آن نسبت بـه زمـان هستنـد و در کنار یکدیگر مورد استفاده قرار مي‌گیرند.

مسأله مهم عبارتي است که مقدار C_f (ضریب دراگ) به‌وسیله‌ي آن محاسبه مي‌شود. C_f تابعي از رینولدز است و عدد رینولدز نیز با تغییر سرعت تغییر مي‌کند و به این دلیل که سرعت قطره در هر لحظه از مسیر حرکت مقداري متفاوت از لحظه پیش است، رژیم‌هـاي متفاوتـي بـراي جریـان بـه وجـود مي‌آیـد. درنتیجـه ضروري است مقدار C_f به طور لحظه‌اي محاسبه شود و در عبارت معادله ممنتوم قرار گیرد که در این مطالعه نیز از معادله‌هاي ارایه شده در مرجع [۷] استفاده شده است.

براي محاسبه ضریب‌هاي انتقال جرم و حرارت مورد نیاز از معادله‌هاي تایید شده‌ي زیر استفاده مي‌شود [۷].

$$Nu_{Di} = ۱٫۵۹\,Re_{Di}^{۰٫۵۵} \qquad \beta_u < ۰٫۹\times۱۰^{-۳} \qquad (۲٤)$$

$$Nu_{Di} = ۰٫۱۷۳\,Re_{Di}^{۰٫۵۵}\,\beta_u^{-۰٫۶۱} \qquad ۰٫۹\times۱۰^{-۳} < \beta_u < ۲٫۱\times۱۰^{-۳}$$

در این معادله‌ها β_u، نسبت دبي حجمي مایع به دبي حجمي گاز ورودي به جذب‌کننده است که Re_{Di} در آن‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re_{Di} = \frac{D_{Di}.\rho_a.|V_{Di} - V_g|}{\mu_a} \qquad (۲۵)$$

توزیع اندازه‌ي قطره‌ها

بـراي هر نـازل در فشـار و سـرعت جریـان سیـال مشخص، یک توزیع اندازه واحد براي قطره‌ها وجود دارد. این ویژگی، به‌طور معمول با منحنی‌های توزیع اندازه فرکانسی یا تجمعی براي هر شرایط عملیاتی نشان داده می‌شود. در این بررسی داده‌هاي توزیع اندازه و منحنی تجمعی خروجی از یک نازل اسپري غیر مخلوط کننده استفاده شده است. داده‌هاي توزیع اندازه براي این نازل‌ها براي فشار bar ۱ و سرعت جریان آب kg/s ۰٫۰۱۹ گزارش شده است. توزیع فرکانسی اندازه قطره‌ها به عنوان تابعی از قطر قطره به طریق زیر به دست آورده شده است[۱۰]:

$$f(D) = \frac{۰٫۰۸۷۷ + ۰٫۱۱۲۳۷D - ۰٫۰۰۰۲۲۶D^{۲}}{۱ - ۰٫۰۱۵۳D + ۸٫۷۶۵\times۱۰^{-۵}D^{۲} - ۱٫۱\times۱۰^{-۷}D^{۳}} \qquad (۲۶)$$

همچنین منحنی توزیع تجمعی اندازه‌ي قطره با انتگرال‌گیري از معادله‌ي (۲٦) نیز می‌تواند به دست می‌آید. داده توزیع اندازه براي شرایط عملیاتی دیگر با معادله‌ها تصحیح‌کننده موجود در [۱۱] تصحیح می‌شود. در این مطالعه، توزیع‌هاي اندازه‌ي حجم تجمعی به بخش‌هاي مشخصی تقسیم می‌شود. تعداد و سهم این بخش‌ها به‌شکل منحنی تجمعی وابسته است. سپس با استفاده از یک اندازه‌ي متـوسط بـراي هـر بخش در مـدل ریاضی، توزیـع اندازه‌ي قطره بـه کار بـرده می‌شـود. یک برنامـه کامپیوتـري می‌توانـد تعـداد، قطر متوسط و درصـد آن‌ها را با توجـه به تغییرهاي منحنی تجمعی در مدل محاسبه کند. بـا این روش، توزیع اندازه قطره‌ها به ویژه در دو حالت حدی مهم، بـه‌طور مثال، کوچک‌تریـن و بزرگ‌ترین قطرها می‌تواند بررسی شود. واضح است که براي هر نوع نازل فشاري باید از منحنی تجمعی مخصوص آن استفاده شود.

شرایط و روش حل معادله‌هاي حاکم

پس از تبیین معادله‌هاي حاکم و به منظور حل این معادله‌ها، شرایط عملیاتي مربوط به جذب‌کننده حاوی $CO_۲$ خالص با نازل‌هاي پاششی غیرمخلوط‌کننده (اختلاط دو فاز بعد از خروج از نازل) با قطر نازل $۱٫۲*۱۰^{-۳}$ m براي فاز مایع (آب) و قطر نازل $۱٫۵*۱۰^{-۳}$ m براي فاز گاز استفاده شده است $z = 0$ معرف ناحیه برخورد و z منفي بیانگر بخش سمت چپ جذب‌کننده با جریان‌هاي برخوردي است. حل معادله‌هاي مذکور به‌طور همزمان و بـه روش عـددي بـا استفـاده از روش رانگ کاتـاي مرتبـه ٤ انجام مي‌شود. شرایط اولیه عبارت‌اند از:

$$\text{at } t = ۰ : \quad T_g = ۳۰^{\circ}C \quad ; \quad T_{Dii} = ۱۵^{\circ}C$$

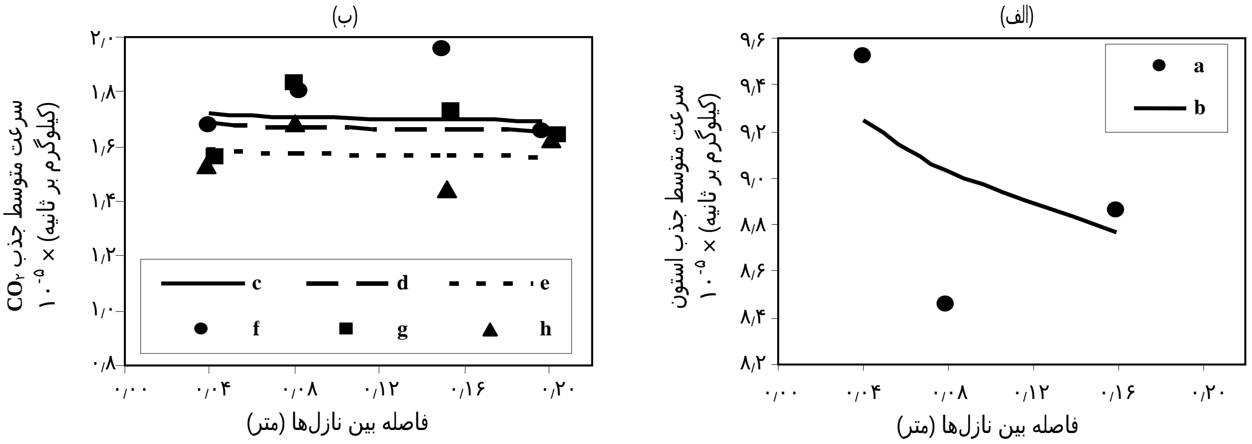
$$Hu = ۰ \quad \frac{\text{کیلوگرم رطوبت}}{\text{کیلوگرم گازخشک}};$$

$$x_B = ۰ \quad \frac{\text{مول } CO_۲}{\text{جرم قطره}};$$

$$V_{Di} = ۴\ m/s$$

قابل ذکر است که D_{Di} با توجه به منحنی تجمعی به‌عنوان شرط اولیه در معادله‌ها قرار می‌گیرد.

با حل همزمان معادله‌هاي مذکور مقدار ماده جذب‌شونده موردنظر در فازهاي مایع و گاز، دماي گاز و قطره‌ها، قطر قطره‌ها، سرعت قطره‌ها و رطوبت گازي سامانه در هر لحظه‌ی مکانی از سامانه‌ي مورد مطالعه به‌دست مي‌آید. خاطر نشان مي‌شود پس از حل معادله‌ها در هر بازه مکانی لازم است رژیم حاکم بر جریان حرکت کنترل شده و برحسب مورد مقدار ضریب دراگ، C_f محاسبه و در گام بعدي منظور شود. در حل مـدل مربوط بسته بـه موقعیت



شکل ٤- بررسي تاثير طول دستگاه جذب‌کننده بر میزان سرعت جذب الف) استون از هوا
ب)گاز CO_2 و مقايسه نتيجه‌هاي مدل با نتيجه‌هاي آزمايشگاهی[٤و٥].

a) تجربی: $Q_{air}=۱/۷۵\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$ b) مدل: $Q_{air}=۱/۷۵\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$ c) مدل: $Q_g=۶/۷۵\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$ d) مدل: $Q_g=۴/۵\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$
e) مدل: $Q_g=۲/۳\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$ f) تجربی: $Q_g=۶/۷۵\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$ g) تجربی: $Q_g=۴/۵\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$ h) تجربی: $Q_g=۲/۳\times۱۰^{-۴}\ m^{۳}/s$.

قطره ضريب‌هاي انتقال جرم و حرارت به‌عنوان پارامترهاي مورد استـفاده در هـر لحظه مکانی بایـد محاسبه و اعمال شونـد.

نتيجه‌ها و بحث

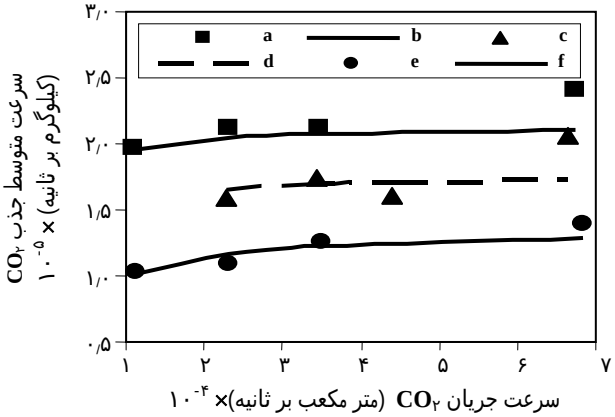
در اين بخش نتيجه‌هاي حاصل از حل مدل رياضي ارايه مي‌شود. هم‌چنين دقت نتيجه‌هاي مدل بر اساس مقايسه صورت گرفته با داده‌های آزمايشگاهی ارايه شده در مراجع [٤] و [٥] به‌دست آمده و با تغيير شرايط و پارامترهای عملياتی متفاوت عملکرد سامانه‌ي مورد مطالعه قرار مي‌گيرد.

در شکل ٤ تاثيـر طول دستگاه جذب‌کننـده بـر میزان سرعـت جذب CO_2 و استون ترسيم و نتيجه‌هاي مدل بـا نتيجه‌هاي آزمايشگاهی [٥،٤] مقايسه شده است. تطبيق مناسبی بين نتيجه‌هاي مدل و نتيجه‌هاي آزمايشگاهی در دو قسمت الف و ب از شکل وجود دارد. در قسمت ب از شکل ٤ مشاهده می‌شود طول دستگاه تاثير ناچيـزی روی ميـزان سرعت جـذب نشان می‌دهـد و تطبيق مناسبی بين نتيجه‌هاي مدل و داده‌های تجربی ابتدايی و انتهايی وجود دارد.

تفاوت بين نتيجه‌هاي مدل و نتيجه‌هاي تجربی در قسمت ميانی به ویژه $L=۰/۱۶\ m$ را می‌توان به خطای تصادفي آزمايشگاهی يا پديده اتمايزيشن ثانويه که در مدل مذکور در نظر گرفته نشده است مرتبط دانست. به عبارت ديگر اين تفاوت تا حدی به ضعف مدل رياضی که امری طبيعی است نيز بستگی دارد. هم‌چنين قابل مشاهده است کـه بـا افـزايش سرعت جريـان گاز ورودی بـه دستگاه، ميـزان سرعت جذب CO_2 بـه دليل کاهش مقاومت انتقال جرم در طرف گازی افزايش می‌يابـد. هر چنـد بـه دليل حلاليت کم گاز CO_2 در فاز آب و واقع شدن مقاومت کنترل‌کننده انتقال جرم در فاز مايع اين افزايش چشمگير نيست. بـا توجـه بـه داده‌های آزمايشگاهی طول بهينه را می‌توان $L=۰/۰۸\ m$ در نظرگرفت.

در شکل ٥ تاثير سرعت جريان‌های گاز و مايع بر ميزان سرعت جذب گاز ترسيم شده است. نتيجه‌هاي مدل با نتيجه‌هاي آزمايشگاهی موجود تطبيق قابل قبولی دارد. قابل مشاهده است که هر دو سرعت جريان گاز و مايع اثر افزايشی بر سرعت جذب دارند. در جذب CO_2 به‌وسيله‌ي آب، مقاومت طرف مايع کنترل کننده است و اثر سرعت جريان گاز روی سرعت جذب به‌طور مشخص کمتر از اثر مقدار مايع است. افزايش دبی مايع در سرعت جريان ثابت گاز، سطح تبادل انتقال جرم و در نهايت سرعت جذب CO_2 را افزايش می‌دهد. عدم تطبيق داده‌های تجربي با نتيجه‌هاي مدل در سرعت بالاي جريان گاز را می‌توان به پديده اتمايزيشن و شکست قطره‌ها مرتبط دانست [٥] که در مدل ارايه شده منظور نشده است.

در شکل ٦ تاثير سرعت جريان‌های گاز و مايع بر ميزان سرعت جذب گاز در سامانه‌ي تک جريانی ترسيم شده است. نتيجه‌هاي مدل با نتيجه‌هاي آزمايشگاهی موجود تطبيق قابل قبولی دارد. در اين سامانه، سرعت جريان مايع اثر افزايشی و سرعت جريان گاز اثـر ناچيـزی (بـرخلاف سامانـه دارای دو جريـان برخـوردی)



شکل ۵ـ بررسي تاثير سرعت جريان‌هاى گاز و مايع بر ميزان سرعت جذب گاز CO_2 و مقايسه‌ي نتيجه‌هاي مدل با نتيجه‌هاي آزمايشگاهى [5].

a) تجربى: Q_w=۰/۰۲۴۶ × 10^{-5} kg/s

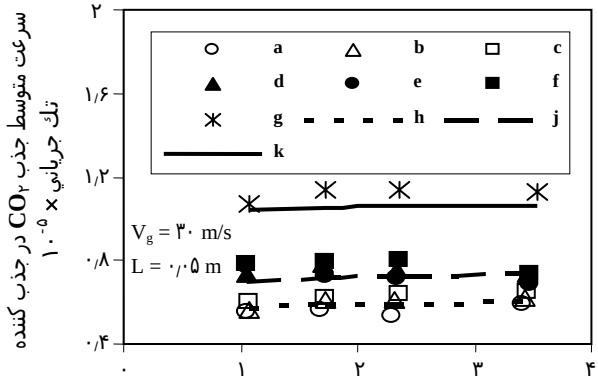
b) مدل: Q_w=۰/۰۲۴۶ × 10^{-5} kg/s

c) تجربي: Q_w=۰/۰۱۸۷ × 10^{-5} kg/s

d) مدل: Q_w=۰/۰۱۸۷ × 10^{-5} kg/s

e) تجربى: Q_w=۰/۰۱۵۷ × 10^{-5} kg/s

f) مدل: Q_w=۰/۰۱۵۷ × 10^{-5} kg/s



شکل ٦ـ بررسي تاثير سرعت جريان‌هاى گاز و مايع بر ميزان سرعت جذب گاز CO_2 در جذب‌كننده تک جريانى و مقايسه نتيجه‌هـاي مـدل با نتيجه‌هاي آزمايشگاهى [5].

a) تجربى: Q_w=۰/۰۰۸۲ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۳m

b) تجربى: Q_w=۰/۰۰۸۲ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۴۳m

c) تجربى: Q_w=۰/۰۰۸۲ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۶m

d) تجربى: Q_w=۰/۰۰۹۶ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۴۳m

e) تجربى: Q_w=۰/۰۰۹۶ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۳m

f) تجربى: Q_w=۰/۰۰۹۶ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۶m

g) تجربى: Q_w=۰/۰۱۲۷ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۱۰m

h) مدل: Q_w=۰/۰۰۸۲ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۳m

j) تجربى: Q_w=۰/۰۰۹۶ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۳m

k) تجربى: Q_w=۰/۰۱۲۷ × 10^{-4} kg/s ، D_{cell} = ۰/۰۳m

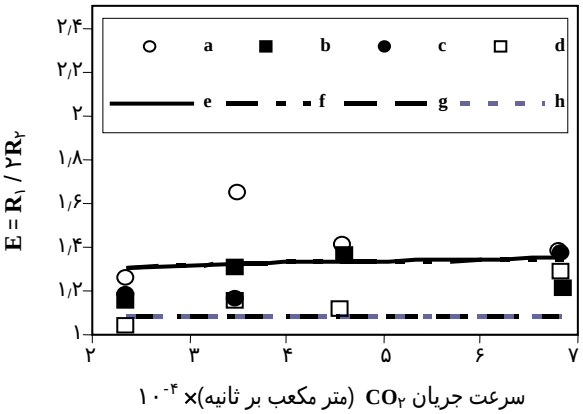
بر سرعت جذب از خود نشان مى‌دهد. هم‌چنين افزايش قطر سلول جذب كننده اثر ناچيزى در افزايش سرعت جذب به دليل كاهش اثرهاي ديواره‌اى دارد [5].

در شكل ۷ شدت تقويت سـرعت جـذب گـاز CO_2 در سـامانه داراى دو جريـان برخـوردى بـا شـاخص E، بررسـى شـده اسـت. افزايش سرعت جريان‌هاى گاز و مايع اثـر نـاچيزى در افـزايش E دارند واضح است كه با به كارگيرى دو جريان برخـوردى، سـرعت انتقال جرم افزايش يافتـه و حـداكثر مقـدار $E=R_1/2R_2$ بـه ۱/٦٥ مى‌رسد، يعنى ٦٥ درصد افزايش در سرعت جذب CO_2 در سـامانه داراى دو جريان برخوردى در مقايسه بـا سـامانه‌ي تـک جريـانى مشاهده مى‌شود. دلايل افزايش سـرعت جـذب در سيـستم داراى دو جريان برخوردى مى‌تواند افزايش سطح انتقال جـرم و افـزايش زمان ماند قطره‌ها ناشى از حركت‌هاي نوسانى آن‌ها باشد.

شكل ۸ تغييرهاي سرعت و نحوه حركت قطره آب در طول دستگاه جذب‌كننده با جريان‌هاى برخوردى را نشان مي‌دهد. شرايط گاز حامل عبارت است از سرعت ۳۰m/s، دما ۳۰ °C و درصد خلوص ۱۰۰ درصد كه سرعت قطره از مقدار اوليه خود در ابتداي دستگاه شروع به افزايش مي‌كند و در سطح برخورد به مقدار بيشينه دست مي‌يابد.

پس از اين قطره دوره شتاب منفي و نفوذ به درون جريان گاز مقابل را آغاز كرده تـا جايي‌كـه تحت تاثيـر جريـان مقابل سرعتش بـه صفر مي‌رسـد. در ايـن موقع دوبـاره در طول لولـه شتاب‌دهنـده سمت راست شتاب گرفته و سرعت آن در جهت منفي افزايش مي‌يابد. بدين ترتيب حركت‌هاي نوساني و رفت و برگشتي قطره تا زمان خروج از فضاي برخورد دو جريان ادامه مي‌يابد. در طى اين نوسان‌ها، پيوسـته سـرعت ماكسيمم قطره در سطح برخـورد و عمق نفوذ آن كاهش مى‌يابد.

شكل ۹ روند تغيير دماي گاز نسبت به زمان را نشان مي‌دهد. دماي گاز به محض قرار گرفتن در سامانه‌ي موردنظر كاهش و طي مدت زمان كوتاهي به مقدار ثابتى دست مي‌يابد. همان‌طور كه در شكل ديده مي‌شود در زمان t = ۰/۰۰۱۸ s دماي گاز ثابت مى‌شود. طى اين مدت زمان گاز با كلاس‌هاى متفاوتي از اندازه‌ي قطره‌ها (از خروجـى نـازل تـا صفحه برخـورد دو جـريـان) در تماس است. افزايش ضريب انتقـال دمـا بـه دليل افزايش سـرعت نسبى دو فاز در صفحه برخورد موجب كاهش ناگهاني دماي گاز در اين دوره زمانى مى‌شـود. قابـل توجـه است كـه قطره‌ها بـا كلاس‌هاى متفـاوت در مدت زمان يكسان به صفحه برخورد نمى‌رسند.



شکل ۷ـ بررسي شدت تقويت سرعت جذب گاز CO_2 در سامانه داراى دو جريان برخوردى و مقايسه‌ي نتيجه‌هاي مدل با نتيجه‌هاي آزمايشگاهى [۵].

a) تجربی: Q_w=۰/۰۱۵۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۰۸m
b) تجربی: Q_w=۰/۰۱۸۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۰۸m
c) تجربی: Q_w=۰/۰۱۵۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۱۰m
d) تجربی: Q_w=۰/۰۱۸۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۱۰m
e) مدل: Q_w=۰/۰۱۸۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۰۸m
f) مدل: Q_w=۰/۰۱۵۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۰۸m
a) مدل: Q_w=۰/۰۱۵۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۱۰m
a) مدل: Q_w=۰/۰۱۸۷ × ۱۰$^{-۴}$ kg/s ، L = ۰/۱۰m

شکل ۱۰ تغییرهاي جزء مولی جذب شونده در طول دستگاه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده مي‌شود در ابتدای دستگاه به‌دلیل سرعت نسبی بالای دو فاز در خروجی نازل و به تبع آن افزایش سرعت انتقال جرم، شیب تغییرهاي جزء جذب‌شونده (CO_2) در فاز گاز بسیار زیاد است. در صفحه برخورد با توجه به حداکثر بودن ضریب‌هاي انتقال در این منطقه از مسیر، شدت جذب افزایش می‌یابد. پایان دوره‌ی شتاب مثبت به دلیل کاهش سرعت نسبی دو فاز، شیب این تغییرها کمتر می‌شود. در آغاز دوره شتاب منفی با افزایش سرعت نسبی دو فاز، ضریب انتقال جرم و شیب تغییرهاي جزء جذب‌شونده نیز افزایش می‌یابد. قابل مشاهده است که بیش از ۸۰ درصد جذب در دو نوسان ابتدایی به‌دلیل بالا بودن سرعت نسبی و ضریب‌هاي انتقال نسبت به نوسان‌هاي بعدی اتفاق می‌افتد.

شکل ۱۱ روند تغییر دماي قطره در طول زمان را نشان مي‌دهد. دماي قطره به محض خروج از نازل و واقع شدن در جریان گاز گرم به دلیل تبخیر ناگهانی قطره و تامین این انرژی از قطره، کاهش یافته و سپس طي مدت زمان کوتاهي به ویژه به دلیل واقع شدن در فضای برخورد و افزایش ضریب انتقال حرارت به حداکثر دمای خود دست مي‌یابد. از این پس با عنایت به ثابت ماندن دماي قطره، مقدار حرارت دریافتي تنها صرف عمل تبخیر مي‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر قطره‌ها، تغییرهاي دمایی به دلیل جرم و ظرفیت انرژی گرمایی بالاتر آن‌ها کاهش می‌یابد. نکته قابل ذکر اینکه به دلیل بالا بودن نسبت مایع تزریقی به دبی گاز تغییرهاي دماى قطره در کل فرایند چندان قابل توجه نیست.

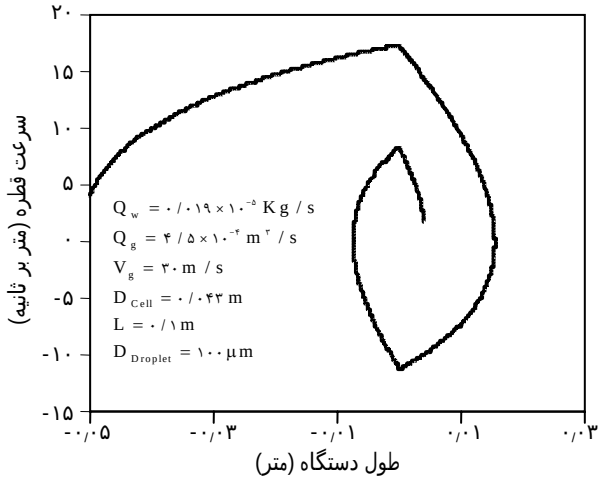
در شکل ۱۲ تغییرهاي رطوبت سامانه‌ي جذب کننده برحسب زمان ترسیم شده است. در این شکل رطوبت گاز به محض قرارگرفتن در سامانه‌ي جذب کننده افزایش و طي مدت زمان کوتاهي به مقدار بیشینه دست مي‌یابد. تبخیر ناگهاني قطره‌هاي آب و افزایش ضریب انتقال دما به دلیل افزایش سرعت نسبي دو فاز در صفحه برخورد، باعث این تغییرهاي به نسبت شدید در رطوبت سیستم گازي مي‌شود.

در شکل ۱۳ تاثیر سرعت گاز بر جزء مولی نهایی CO_2 در فاز گاز در سه سرعت جریان مایع متفاوت ترسیم شده است. شرایط عملیاتی سامانه نیز روی شکل آمده است. زمان ماند قطره‌ها درون سامانه جهت یکسان بودن شرایط فرض می‌شود که تحت تأثیر سرعت گاز قرار نخواهد گرفت. در این حالت با افزایش سرعت گاز میزان جزء مولی نهایی CO_2 در فاز گاز کاهش و سرعت جذب آن به‌علت افزایش آشفتگي سامانه و ضریب‌هاي انتقال افزایش مي‌یابد. نکته دیگر این است که افزایش دبی جریان مایع به سبب افزایش سطح انتقال جرم ناشی از میزان مایع بیشتر باعث افزایش سرعت جذب و کاهش جزء مولی نهایی CO_2 در فاز گاز می‌شود که در شکل ۱۳ این اثر به خوبی مشاهده می‌شود.

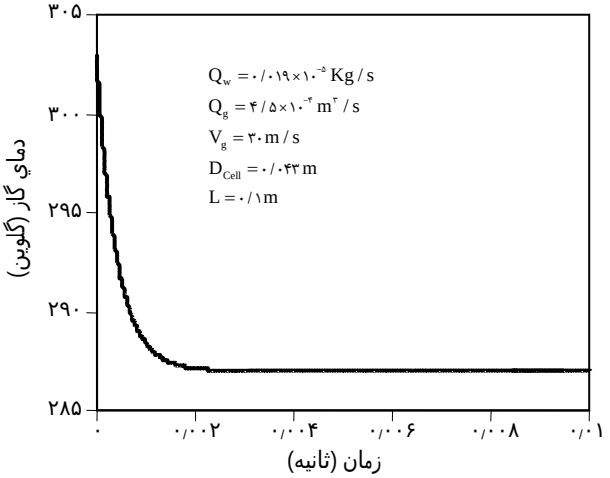
در شکل ۱۴ تاثیر دماي گاز گرم بر میزان سرعت جذب گاز CO_2 ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دما موجب کاهش جزیی سرعت جذب فیزیکی CO_2 در فاز آب شده و جزء مولی نهایی CO_2 در فاز گاز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

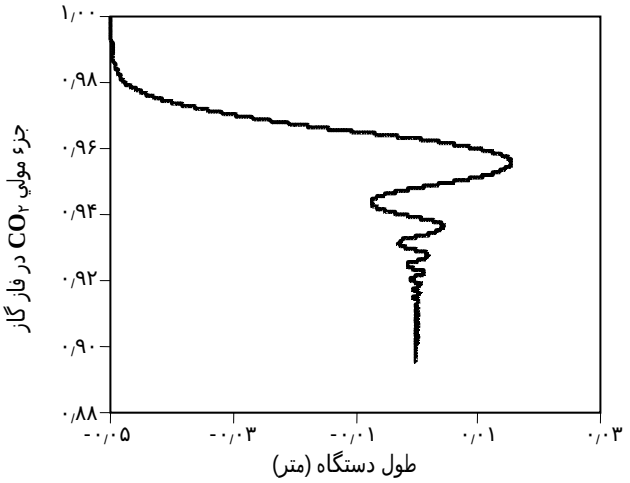
عملکرد یک جذب کننده داراي جریان‌هاي برخوردي مورد مدل‌سازي قرار گرفت. نتیجه‌هاي حاصل از مدل با نتیجه‌هاي آزمایشگاهي گزارش شده با خطاي نسبي ۸ ± درصد تطابق دارد که مبین دقت نسبی نتیجه‌هاي مدل پیشنهادی است. در این مطالعه شدت تقویت سرعت جذب گاز در سامانه دارای دو جریان برخوردی در مقایسه با سامانه‌ي تک جریانی و تاثیر پارامترهاي عملیاتي و



شکل ۸- تغییرهاي سرعت قطره در طول دستگاه.



شکل ۹- تغییرهاي دماي گاز بر حسب زمان.

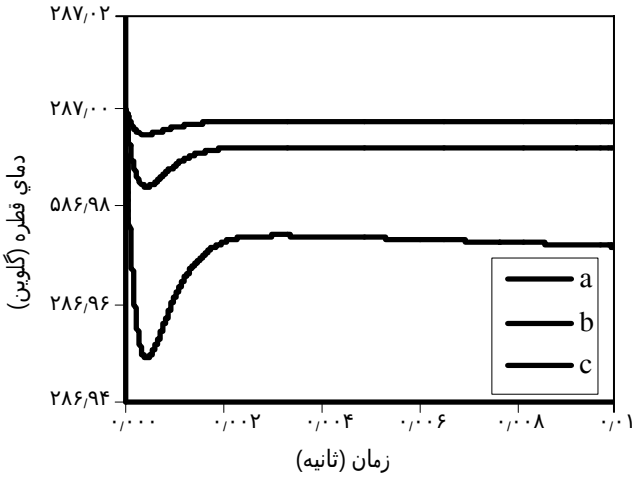


شکل ۱۰ـ تغییرهاي جزء CO_2 فاز گاز در طول دستگاه.

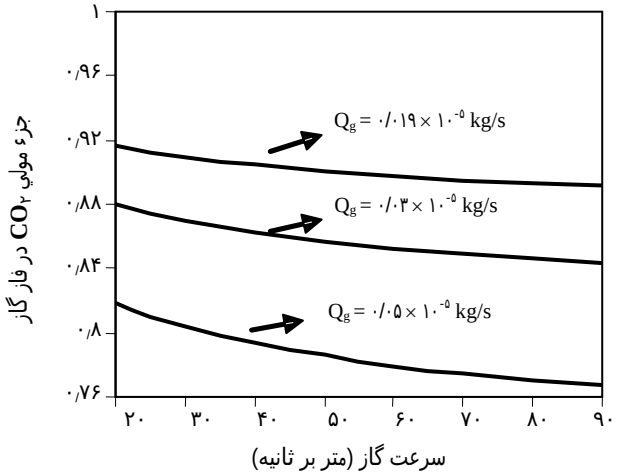
ساختاري نظير دماي گاز، سرعت گاز، طول دستگاه، سرعت جريان مايع و گاز روي متوسط سرعت جذب CO_2 سامانه‌ي موردنظر، بررسي و تحليل شد. از نتيجه‌هاي مدل ارايه شده مي‌توان به افزايش شدت تقويت سرعت جذب گاز در اين سامانه‌ها نسبت به سامانه‌هاي تک جريانی و افزايش متوسط سرعت جذب CO_2 تحت‌تاثير افزايش سرعت گاز يا سرعت جريان گاز، سرعت جريان مايع و کاهش دماي گاز اشاره کرد. تاثير افزايش دبی مايع بر متوسط سرعت جذب CO_2 به‌لحاظ افزايش سطح تماس از ساير پارامترهاي عملياتي بيشتر است. هم‌چنين افزايش طول دستگاه جذب کننده به دليل در تقابل بودن دو عامل افزايش زمان ماند و کاهش شدت اختلاط (کاهش ضريب‌هاي انتقال) تاثير ناچيزي بر متوسط شدت جذب CO_2 از خود نشان‌مي‌دهد.

فهرست علايم

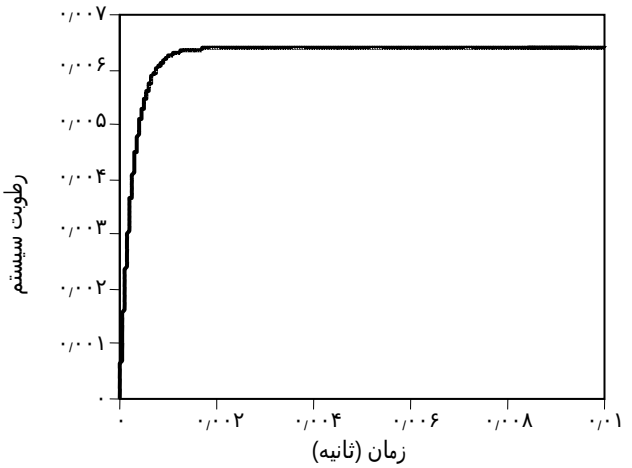
$\vec{a}_e$	شتاب حرکت قطره (m^2/s)
A_D	A سطح تصوير قطره (m^2)
A_{Di}	سطح قطره (m^2)
C_f	ضريب دراگ
C_s	گرماي ويژه مخلوط گاز (J/kg.°C)
C_{PB}	گرماي ويژه CO_2 (J/kg.°C)
C_{PD}	گرماي ويژه قطره آب (J/kg.°C)
D_{cell}	قطر جذب کننده (m)
D_i	قطر قطره کلاس iام (m)
D_{ii}	قطر اوليه قطره کلاس iام (m)
E	شاخص شدت تقويت جذب
G	دبي گاز (kg mol gas/s)
G'_y	دبي گاز خشك (kg dry gas/s)
h_{Di}	ضريب انتقال دما قطره کلاس iام ($W/m^2°C$)
H	آنتالپي (J/kg dry gas)
Hu	رطوبت (kg vapor/kg dry gas)
k_y	ضريب انتقال جرم در فاز گاز جهت تبخير ($mol/m^2.s$)
k_{yB}	ضريب انتقال جرم در فاز گاز جهت جذب ($mol/m^2.s$)
k'_a	ضريب انتقال حرارت هدايتي (W/m.°C)
K_H	ثابت هنري (bar/mole fraction of CO_2)
L	فاصله بين دو نازل
m_{Di}	جرم قطره iام (kg)
M_A	جرم مولكولي آب (kg/kg mol)



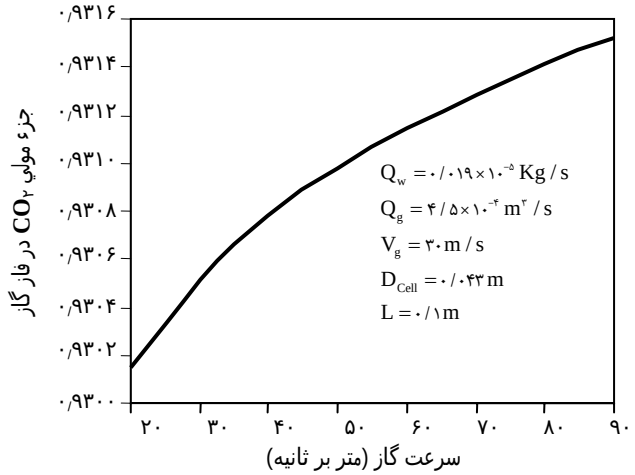
شكل ۱۱ـ تغييرهاي دماى قطره بر حسب زمان. **a**) قطره با قطر ۱۰۰ ميكرون **b**) قطره با قطر ۲۰۰ ميكرون **c**) قطره با قطر ۴۰۰ ميكرون.



شكل ۱۳ـ بررسي تاثير سرعت گاز بر جزء مولي نهايي CO_2 در فاز گاز.
a) $Q_g = ۰/۰۱۹ \times ۱۰^{-۴}\ m^۳/s$ **b**) $Q_g = ۰/۰۳ \times ۱۰^{-۴}\ m^۳/s$ **c**) $Q_g = ۰/۰۵ \times ۱۰^{-۴}\ m^۳/s$



شكل ۱۲ـ تغييرهاي رطوبت گاز بر حسب زمان.



شكل ۱۴ـ بررسي تاثير دماي گاز بر جزء مولي نهايي CO_2 در فاز گاز

جرم مولكولي CO_2 (g/gmol)	M_B	سرعت جذب گاز در سامانه‌ي تك جرياني	R_2
شار تبخير از قطره كلاس iام (mol/m^2.s)	N_{Ai}	دماي مبنا (K)	T_o
شار جذب در قطره كلاس iام (mol/m^2.s)	N_{Bi}	دماي قطره كلاس iام (K)	T_{Di}
فشار جزئي اشباع CO_2 در سطح قطره (bar)	P_B^*	دماي گاز (K)	T_g
درصد حجمي كلاس iام قطره‌ها	P_i	سرعت هوا (m/s)	V_a
فشار هوا (bar)	P_t	سرعت قطره iام (m/s)	V_{Di}
سرعت جريان هوا (m^2/s)	Q_{air}	مقدار CO_2 قطره بر مبناي جرم قطره (kgmol/kg)	x_A
سرعت جريان گاز(m^2/s)	Q_g	جزء مولي CO_2 در قطره	X_B
دبي جرمي آب (kg/s)	Q_W	كسر مولي رطوبت در فاز گاز	y_A
دبي حجمي آب (m^3/s)	Q'_W	كسر مولي CO_2 در فاز گاز	y_B
سرعت جذب گاز در سامانه‌ي دو جريان برخوردي	R_1	كسر مولي رطوبت در سطح قطره (اشباع)	y_A^*

کسر مولي بخار اشباع جزء CO_2 در حال تعادل روي سطح قطره	y_B^*	گروه‌هاي بدون بعد	
		عدد پرانتل	Pr
طور جذب‌کننده با جريان‌هاي برخوردي (m)	Z	عدد رينولدز	Re
		عدد اشميت	Sc
علايم اختصاري يوناني		عدد شروود	Sh
نسبت دبي حجمي مايع به دبي حجمي گاز ورودي	β_u		
تابع توزيع حجمي فركانسي	f(D)	زيروندها	
چگالي هوا (kg/m^3)	ρ_A	حالت مرجع	o
چگالي مايع (kg/m^3)	ρ_L	کلاس iام	i
گراديان دما (°C)	ΔT	حالت اوليه	ii
ويسکوزيته گاز ($N.s/m^3$)	μ_a	گاز	a
ويسکوزيته سينماتيك فاز گاز (m^2/s)	v_a	قطره مايع	D
گرماي نهان تبخير (kJ/kg)	λ_o	گاز	g

تاريخ دريافت: ۱۳۸۷/۵/۳۰ ، تاريخ پذيرش: ۸۷۱۳/۱۲/۵

مراجع

[1] Elperin, I. T., Heat and Mass Transfer in Opposing Currents, *Journal of Engineering Physics*, **6,** p. 62 (1961).

[2] Tamir, A., Stephan, K., Elperin, I., Method, Device and Apparatus for Carrying out Gas-Liquid Mass-Exchange Operations and Process Employing the Same, *Israeli Patent Application*, No. 73301 (1987).

[3] Herskowits, D., Herskowits, V., Tamir, A., Desorption of Acetone in a Two Impinging Streams Spray Desorber, *Chemical Engineering Science*, **42**, p. 2331 (1987).

[4] Tamir, A., Absorption of Acetone in a Two Impinging Streams Absorber, *Chemical Engineering Science*, **41**, p. 3023 (1986).

[5] Tamir, A., Herskowits, D., Absorption of CO_2 in a New Two Impinging Stream Absorber, *Chemical Engineering Science*, **40**, p. 2149 (1985).

[6] Gaddis, E.S., Subramanian, D., Vogelpohl, S., Geissen, Biologische Abwassereinigung: Turbulenzen fur den Umweltschutz, *Chemische Industrie*, **12**, p. 18 (1990).

[7] Tamir, A., "Impinging-Stream Reactors: Fundamental and Applications", Amsterdam. Elsevier. (1994).

[8] Sohrabi, M., Jamshidi, A.M., Studies on the Behaviour and Application of the Continuous Two Impinging Streams Reactors in Gas-Liquid Reactions, *Journal of Chemical Technology Biotechnol*, **69**, p. 415 (1997).

[9] John J., Carroll and Alan E. Mather, The System Carbon Dioxide-Water and the Krichevsky-Kasarnovsky Equation, *Journal of Solution Chemistry*, **21**, p. 607 (1992).

[10] Rahimi, A., Taheri, M., Fathikalajahi, j., Mathematical Modeling of Heat & Mass Transfer in Hot Gas Spray System, *Chem. Eng. Comm*., **189**, p. 959 (2002).

[11] Perry, R.H. and Green, D., Perry' Chemical Engineering Handbook, 6th Ed., Mc Grow Hill Internationa Edition, New York, (1984).