مقايسه آناليز احتمال Markov-Chain و مدل تانک‌هاي همزده سري در مدل سازي رياضي عملکرد خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي

امير رحيمي*[۱] و آرزو نيك‌سير[۲]

[۱]استاديار گروه مهندسي شيمي- دانشکده مهندسي- دانشگاه اصفهان

[۲]دانش‌آموخته کارشناسي ارشد گروه مهندسي شيمي- دانشکده مهندسي- دانشگاه اصفهان

(تاريخ دريافت ۸۷/۴/۲۵ , تاريخ تصويب ۸۸/۵/۱۹)

چکيده

علي‌رغم اين که بيش از نيم قرن از تبيين و بسط تئوري و کاربرد راکتورهاي داراي جريان‌هاي برخوردي مي‌گذرد، با اين وجود، تلاش‌هاي بسيار محدودي در زمينه مدلسازي عملکرد خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي، صورت پذيرفته است. در اين مطالعه فرايند خشك‌کردن ذرات مرطوب با استفاده از خشک‌کن‌هاي سيکلوني داراي جريان‌هاي برخوردي بر اساس مدل احتمال Markov-Chain و مدل تانک‌هاي همزده سري، مورد مدل سازي رياضي و شبيه‌سازي قرار گرفته است. پارامترهاي مورد نياز در بسط هر مدل، با استفاده از توزيع زمان ماند تجربي ذرات درون يک نمونه خشک‌کن داراي جريان‌هاي برخوردي مماسي، تعيين و معادلات حاکم، به روش عددي حل گرديده است. مقايسه نتايج به دست آمده با داده‌هاي تجربي گزارش شده، نشان مي‌دهد مدل تانک‌هاي همزده سري، به طور موفقيت‌آميزي عملکرد خشک‌کن‌هاي برخوردي را پيش‌بيني مي‌کند. اين در حالي است که نتايج مدل Markov-Chain انحراف بيشتري از مقادير تجربي نشان داده است. بررسي تاثير برخي پارامترهاي عملياتي نشان مي‌دهد راندمان عمليات خشک‌کردن در خشک‌کن‌هاي برخوردي با کاهش نسبت جامد به گاز، کاهش رطوبت ذرات ورودي و افزايش دماي گاز، افزايش مي‌يابد.

واژه‌هاي كليدي: خشك‌کردن، جريان‌هاي برخوردي، آناليز Markov-Chain ، تانک‌هاي همزده سري

مقدمه

اگرچه از ديرباز خشک‌کن‌هاي حرارتي، بخش عمده‌اي از سيستم‌هاي خشک‌کردن در مقياس صنعتي را به خود اختصاص داده‌اند، در طي سال‌هاي اخير انجام مطالعات بنيادي در زمينه ساخت، عمليات و بهينه‌سازي تجهيزاتي که فرايند خشک‌کردن را با صرف هزينه کمتر، ارائه محصولي با کيفيت مناسب‌تر و تاثيرات جانبي کمتر بر محيط زيست انجام دهند، بسيار ضروري به نظر مي‌رسد. خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي از جمله تجهيزاتي هستند که علاوه بر کوچک‌تر بودن ابعاد فيزيکي، از راندمان عملياتي بالايي در مقايسه با ساير خشک‌کن‌هاي متداول از جمله خشک‌کن‌هاي پاششي، غلياني و بستر سيال، برخوردارند [۱]. در اين نوع خشک‌کن‌ها جريان‌هاي گازي که از دما و سرعت بسيار بالايي برخوردارند، پس از عبور از لوله‌هاي شتاب‌دهنده جريان جامد، در فضاي خشک‌کن با شدت بسيار زياد با يکديگر برخورد مي‌کنند و به اين ترتيب، شرايط بسيار مناسبي براي عمليات انتقال جرم و حرارت، مهيا مي‌گردد [۲]. علي‌رغم بالا بودن راندمان جداسازي اين نوع خشک‌کن‌ها، تا به امروز مطالعات بسيار محدودي در زمينه بررسي، شناخت و معرفي روش‌هايي براي استفاده بهينه از خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي و نيز مدل سازي رياضي عملکرد اين خشک‌کن‌ها صورت گرفته است.

Huai و همکاران [۳] نوع خاصي از خشک‌کن‌هاي برخوردي نيمه‌حلقوي را مورد مطالعه آزمايشگاهي و مدل سازي رياضي قرار داده‌اند. خشک‌کن‌هاي برخوردي نيمه‌حلقوي، علاوه بر حرکت سريع و ناپاياي ذرات جامد در فضاي برخورد، از امتياز تاثير نيروي سانتريفيوژ در افزايش شدت آشفتگي و تشديد سرعت انتقال جرم و حرارت نيز برخوردارند. نتايج مطالعات آزمايشگاهي و مدل سازي صورت گرفته، نشان مي‌دهد که ضريب انتقال حرارت حجمي و شدت انتقال جرم و حرارت، با افزايش دماي گاز، رطوبت اوليه جامد و نسبت گاز به جامد ورودي به خشک‌کن به شدت افزايش يافته و در اين شرايط، راندمان جداسازي رطوبت به ميزان قابل توجهي افزايش مي‌يابد [۳]-[۵]. همچنين، مطالعات آزمايشگاهي در زمينه تاثير آرايش فيزيکي خشک‌کن‌هاي برخوردي بر عملکرد آن‌ها از جمله نوع جريان، زاويه خروجي و فاصله

---

* نويسنده مسئول : تلفن : ۰۳۱۱-۷۹۳۴۰۳۹ ، فاکس : ۷۹۳۴۰۳۱ – ۰۳۱۱ Email: rahimi@eng.ui.ac.ir

بين لوله‌هاي شتاب‌دهنده، صورت پذيرفته است. نتايج اين مطالعات نشان مي‌دهد كه جريان‌هاي شعاعي، از پتانسيل بسيار بالايي در فرآيند خشک‌کردن محصولات حساس به دما و در شرايطي كه شدت بالاي خشک‌کردن مورد نظر باشد برخوردار هستند. در اين نوع خشک‌کن تنها با تغيير زاويه خروجي لوله‌هاي شتاب‌دهنده در مقايسه با حالت قرار داشتن لوله‌ها به صورت افقي، راندمان جداسازي به مقدار قابل توجهي افزايش مي‌يابد؛ [۶] كه اين مسئله از جمله مزاياي اين دسته از خشک‌کن‌ها در خصوص سهولت دست يابي به شرايط بهينه عملياتي و اقتصادي است.

Niksiar و Rahimi [۷] با مدل سازي رفتار يک ذره منفرد درون يک خشک‌کن داراي جريان‌هاي برخوردي محوري، نشان دادند كه در اين خشک‌کن‌ها شرايط بسيار مناسبي جهت تشديد فرايندهاي انتقال جرم و حرارت مهيا است. نتايج اين مطالعه نشان مي‌دهد، كارآمدي خشک‌کن‌هاي داراي جريان برخوردي، با افزايش سرعت گاز و اندازه ذرات، افزايش مي‌يابد.

به طور كلي، با توجه به پيچيدگي الگوي حركتي ذرات جامد در درون خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي، تاكنون تلاش‌هاي انگشت‌شماري در زمينه پيش‌بيني عملكرد اين دسته از خشک‌کن‌ها، از نقطه نظر مدل سازي و شبيه‌سازي، صورت گرفته است. اين در حالي است كه به نظر مي‌رسد با تكيه بر مشاهدات تجربي و به كارگيري مدل‌هاي چندپارامتري و تنظيم و تعيين پارامترهاي مورد نياز اين مدل‌ها كه بر اساس نتايج تجربي صورت مي‌گيرد بتوان گام مفيدي در زمينه مدل سازي رياضي و شبيه‌سازي عملكرد اين نوع از خشک‌کن‌ها برداشت.

بديهي است به دليل انحراف بسيار زياد عملكرد اين سيستم‌ها از حالت‌هاي مربوط به رفتار ايده‌ال، تعيين تجربي توزيع زمان ماند ذرات جامد درون خشک‌کن‌هاي برخوردي، از جمله مواردي است كه كمک زيادي به ارائه مدل‌هاي رياضي مناسب در اين خصوص، خواهد نمود.

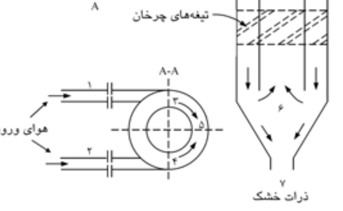
از جمله مدل‌هاي پيشنهاد شده در اين زمينه، استفاده از مدل تانک‌هاي همزده سري به منظور پيش‌بيني رفتار گاز-جامد در فضاي برخوردي است [۲]. به اين ترتيب فضاي غيرايده‌ال برخورد جريان‌هاي مختلف، در قالب تعداد مشخصي تانک با اختلاط كامل، مورد بررسي و تحليل قرار مي‌گيرد.

كاربرد توابع احتمال، از ديگر روش‌هايي است كه در خصوص سيستم‌هاي پيچيده فيزيكي، مورد توجه قرار گرفته است. در اين زمينه، يكي از مهمترين روش‌ها، استفاده از تابع احتمال Markov-Chain است كه توسط برخي محققان در بررسي عملكرد سيستم‌هاي مختلف انتقال جرم و حرارت، مورد استفاده قرار گرفته است [۲]، [۸] و [۹].

با عنايت به موارد پيش گفته، هدف از اين مطالعه، مدل سازي رياضي عملكرد خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي بر اساس قوانين بقاي جرم و حرارت و خصوصيات فيزيكي اين سيستم‌ها است. در اين راستا سعي گرديده است تا به كمک مدل تانک‌هاي همزده سري و انجام مستقل آناليز Markov-Chain و تعيين پارامترهاي مرتبط بر اساس داده‌هاي تجربي مربوط به توزيع زمان ماند، نتايج مدل‌هاي پيشنهادي، مورد تجزيه و تحليل قرار گرفته و در صورت نياز، اصلاحات لازم بر روي مدل‌ها صورت گيرد.

مدل سازي رياضي

در شكل (۱) شماتيک خشک‌کن برخوردي مورد مطالعه، ترسيم شده است. در اين نوع خشک‌کن دو جريان خوراک ورودي پس از عبور از لوله‌هاي شتاب‌دهنده به طور مماسي در ناحيه سيكلوني خشک‌کن با يكديگر برخورد مي‌كنند. ذرات جامد بر اثر برخوردهاي مكرر با ديواره‌هاي سيكلون و ذرات ديگر به تدريج انرژي جنبشي خود را از دست داده و از بخش پاييني سيكلون خارج مي‌شوند [۱] و [۲]. به دليل پيچيدگي رفتار ذرات جامد در اين نوع خشک‌کن‌ها به ويژه در ناحيه متلاطم برخورد دو جريان، پيش‌بيني توزيع زمان ماند (RTD) ذرات درون خشک‌کن از اهميت بسزايي در مدل سازي اين سيستم‌ها برخوردار است.



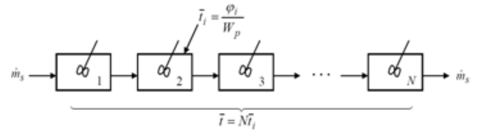
شكل۱: شماتيک خشک‌کن سيكلوني داراي جريان‌هاي برخوردي مماسي.

با استفاده از داده‌هاي توزيع زمان ماند، مي‌توان رفتـار غيرايده‌ال سيستم را به رفتار مجموعه‌اي از سيسـتم‌هـاي ايده‌ال نظير تانک همزده ايده‌ال يا راکتور با جريان قـالبي ايده‌ال، شبيه نمود و از معـادلات حـاکم بـر عملکـرد ايـن سيستم‌ها براي مدل سازي سيستم واقعـي اسـتفاده کـرد. همان طور که پيش تر بيان شد، در اين مطالعه، بر اسـاس داده‌هاي مربوط به زمان ماند مواد خشـک‌شـونده در يـک خشک‌کن سيکلوني با جريان‌هاي برخوردي مماسـي و بـه کمک تطبيق آن با مدل تانک‌هاي همـزده سـري و مـدل احتمـال Markov-Chain رفتـار خشـک‌کـن بـا جريـان برخوردي، مورد مدل سازي قرار گرفته است. در ادامه، بـه طور خلاصه، هر يک از مدل‌هـاي فـوق توصـيف و سـپس معادلات حاکم بر عملکرد خشک‌کن، استخراج شده اسـت. فرضيات مدل رياضي مربوط به فرآيند خشـک کـردن، بـه شرح زير است:

- ذرات جامد، به صورت کروي هستند.
- از تبادل حـرارت خشـک‌کـن بـا محـيط، صـرف نظـر مي‌شود.
- حجم مفيد خشـک‌کـن برخـوردي در فرآينـد تبخيـر رطوبت ذرات، شامل دو لوله ورودي خـوراک و فضـاي سيکلوني ماقبل تيغه‌هاي چرخشي است.
- ذرات جامد و محتواي رطوبت آن‌ها همدما هستند.

مدل تانک‌هاي همزده سري

از جمله روش‌هاي ممکن بـراي معـادل‌سـازي فضـاي غيرايده‌ال برخورد دو جريان گاز- جامد، اسـتفاده از مـدل تانک‌هاي همزده سري است. شکل (۲)، شماتيک سيسـتم مورد بررسي را نشان مي‌دهد.



شکل ۲: آرايش مخازن جايگزين خشک‌کن برخوردي جريان مماسي مربوط به مدل تانک‌هاي همزده سري.

معادلات حاکم در مدل تانک‌هاي همزده سري

در فرآيند خشک‌کردن ذرات جامـد، معـادلات حالـت پاياي تغيير رطوبت ذرات جامد، آنتالپي ذرات، آنتالپي گاز و رطوبت گاز به صورت زير هستند:

$$\dot{m}_s(X_{A,in} - X_{A,out}) - N_A M_A A_p^* \Delta t\Big|_{out} = 0 \qquad (۱)$$

$$\dot{m}_s(H_{x,in} - H_{x,out}) + hA_p^* \Delta t (T_a - T_p)\Big|_{out} \qquad (۲)$$

$$- N_A M_A A_p^* \Delta t \lambda\Big|_{out} = 0$$

$$G'_y(H_{y,in} - H_{y,out}) - hA_p^* \Delta t (T_a - T_p)\Big|_{out} \qquad (۳)$$

$$+ N_A M_A A_p^* \Delta t \lambda\Big|_{out} = 0$$

$$G'_y(y'_{A,in} - y'_{A,out}) + N_A M_A A_p^* \Delta t\Big|_{out} = 0 \qquad (۴)$$

در اين معادلات A_p^* سطح ذرات ورودي به خشک‌کن بر واحد زمـان ($A_p^* = \frac{6W_p}{\rho_p d_p}$)، Δt زمـان مانـد متوسـط ذرات درون هر تانک همـزده و N_A شار تبخيـر اسـت. در صورتي که ذره، تنها داراي رطوبـت سـطحي باشـد N_A از معادله زير به دست مي‌آيد:

$$N_A = k_y(y_A^* - y_A) \qquad (۵)$$

که در آن y_A و y_A^* کسر مولي بخارآب به ترتيب در توده جريان گازي و در فصل مشترک گـاز- مـايع و k_y ضـريب انتقال جرم در فاز گاز است. در صورتي که ذره، عـلاوه بـر رطوبت سطحي داراي محتواي رطوبـت درونـي نيـز باشـد براي حل معادلات فوق، معادلـه توزيـع رطوبـت درون ذره جامد (X_C) نيز مورد نياز خواهد بود. در اين حالت:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(D_{CD} r^2 \frac{\partial X_C}{\partial r}\right) - \frac{\partial X_C}{\partial t} = 0 \qquad (۶)$$

تحت اين شرايط، N_A براي به کـارگيري در معـادلات (۱)- (۴) به صورت زير خواهد بود:

$$N_A = -D_{CD}\rho_B \frac{\partial X_C}{\partial r}\Big|_{r=R_p} \qquad (۷)$$

کـه D_{CD} ضـريب نفـوذ رطوبـت درون ذره جامـد و X_C محتواي رطوبت درونـي ذره و تـابعي از r و t اسـت. مقدار متوسط رطوبت دروني ذره در هر لحظه، بـه صـورت زير به دست مي‌آيد:

$$\overline{X}_C = \frac{3}{R_p^3}\int_0^{R_p} X_C(r,t) r^2 dr \qquad (۸)$$

کاربرد داده‌های زمان ماند برای تعيـين پارامترهـای مدل تانک‌های همزده سری

در مورد N تانک همزده سـري، معادلـه توزيـع زمـان ماند و همچنين واريانس تئوري، σ^2_{model} چنين خواهد بود [۱۰]:

$$\bar{t}_{model} E = \left(\frac{t}{\bar{t}_{model}}\right)^{N-1} \frac{N^N}{(N-1)!} e^{-tN/\bar{t}_{model}} \qquad (۹)$$

$$\sigma^2_{model}(t) = \frac{\bar{t}_{model}}{N} \qquad (۱۰)$$

در مدل تانک‌هاي همزده سري، دو پارامتر مهمي که بايد به کمک داده‌هاي تجربي توزيع زمان ماند مشخص شود، تعداد تانک‌هاي همزده N و Δt است تا شرايط زير برقرار شود:

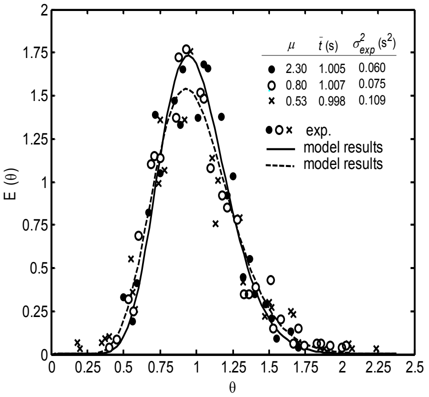
$$\sigma^2_{exp} = \sigma^2_{model} \quad ; \quad \bar{t}_{exp} = \bar{t}_{model} \qquad (۱۱)$$

به طوري‌که:

$$\sigma^2_{exp}(t) = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t}_{exp})^2 Cdt}{\int_0^{\infty} Cdt} \qquad (۱۲)$$

$$\bar{t}_{exp} = \frac{\int_0^{\infty} tCdt}{\int_0^{\infty} Cdt} \qquad (۱۳)$$

به اين منظور، داده‌هاي تجربي RTD يک نمونه آزمايشگاهي که در شکل (۳) نشان داده شده است، با تعدادي تانک همزده سري مورد مطابقت قرار گرفته است. نتايج، نشان مي‌دهد به طور کلي، بسته به شرايط عملياتي مربوط به هر دسته از آزمايش‌هاي تجربي، واريانس توزيع زمان ماند حاصل از ۱۴ تا ۱۸ تانک همزده سري به خوبي با مقادير تجربي به دست آمده، مطابقت دارد. لازم به ذکر است که اين تعداد، تنها در مورد دامنه عملياتي مورد بررسي در اين مطالعه که در خصوص يک نمونه خشک‌کن برخوردي مماسي بوده، به دست آمده است.



شکل ۳: مقايسه توزيع زمان ماند ذرات در خشک‌کن جريان برخوردي براساس مدل تانک‌هاي همزده سري با داده‌هاي تجربي موجود [۲].

$\left(n = 14; \sigma^2_{model} = 0.071 \_\_\_\_ \right.$ و $\left. n = 18; \sigma^2_{model} = 0.056 - - - \right)$

مدل احتمال Markov-Chain

Markov-Chain يک مدل احتمال است که در مورد سيستم‌هاي فيزيکي پيچيده، توزيع زمان ماند خروجي به ازاء يک ورودي ضرباني يا پله‌اي ايده‌ال را پيش‌بيني مي‌کند. بر اساس اين تحليل با معلوم بودن ماتريس احتمال گذر P و بردار احتمال موقعيت قبل S(m)، بردار احتمال موقعيت جديد، پس از يک گذر (پرش) S(m+1) از رابطه زير مشخص مي‌گردد [۲]:

$$S(m+1) = S(m).P \qquad (۱۴)$$

به عبارت ديگر، احتمال اينکه يک سيستم پس از $m+1$ گذر در موقعيت j قرار گيرد، از رابطه زير قابل محاسبه است:

$$s_j(m+1) = \sum_{i=1}^{N} s_i(m) p_{ij} \qquad m = 1,2,3,\ldots \qquad (۱۵)$$

که در آن $s_i(m)$ عضو i بردار $S(m)$ و p_{ij} عضو i, j ماتريس احتمال P هستند؛ به طوري‌که:

$$\sum_{i=1}^{N} s_i(m) = 1 \quad ; \quad \sum_{j=1}^{N} p_{ij} = 1 \qquad (۱۶)$$

بنابراين با معلوم بودن تابع احتمال هر پديده فيزيکي P و شرايط اوليه موقعيت اشغال شده سيستم، به راحتي مي‌توان موقعيت احتمالي آتي يا نقطه هدف فرآيند را پيش‌بيني نمود. با بکارگيري مدل Markov مي‌توان بدون افزايش پيچيدگي حل مسائل ناشي از بکارگيري روابط و معادلات پيچيده رياضي، راه حل ساده و يا تحليلي براي سيستم‌هاي نامنظم ارائه کرد [۲].

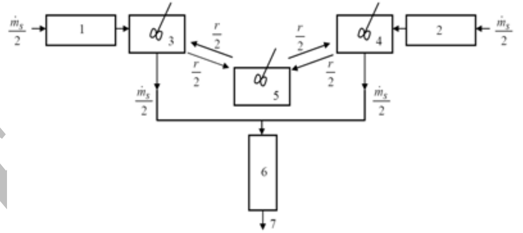
شکل (۴) آرايش مخازن مربوط به مدل Markov را نشان مي‌دهد. در اين شکل، با توجه به رفتار حرکتي خشک‌کن، نواحي اختلاط دو جريان (۳، ۴ و ۵) در قالب تانک‌هاي همزده و بخش‌هاي ورودي و خروجي خشک‌کن (۱، ۲ و ۶) به صورت مخازني با جريان قالبي ايده‌ال، لحاظ شده است (شماره‌گذاري مطابق با شکل (۱) است). اين آرايش، پيش‌تر در مورد يک راکتور جامد- مايع که از لحاظ فيزيکي، کاملاً مشابه با خشک‌کن برخوردي مماسي است معرفي شده است [۹].

تابع احتمال سيستم شکل (۴) در معادله (۱۷) نشان داده شده است. در اين ماتريس R نسبت جريان برگشتي ($r/\dot{m}_s$)، $\Delta\theta$ نسبت حداقل زمان ماند ذرات در هر مخزن به زمان ماند متوسط ذرات درون خشک‌کن جريان مماسي ($\Delta t/\bar{t}$) و n_v تعداد مخازن به کار رفته در آناليز Markov (در اينجا ۶) است. در اين ماتريس p_{ii} احتمال باقي ماندن ذره درون مخزن i پس از طي حداقل بازه

$$P=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & e^{-0.5n_v\Delta\theta(1+R)} & 0 & \frac{R}{R+1}(1-e^{-0.5n_v\Delta\theta(1+R)}) & \frac{1}{R+1}(1-e^{-0.5n_v\Delta\theta(1+R)}) & 0\\ 0 & 0 & 0 & e^{-0.5n_v\Delta\theta(1+R)} & \frac{R}{R+1}(1-e^{-0.5n_v\Delta\theta(1+R)}) & \frac{1}{R+1}(1-e^{-0.5n_v\Delta\theta(1+R)}) & 0\\ 0 & 0 & 0.5(1-e^{-n_v\Delta\theta R}) & 0.5(1-e^{-n_v\Delta\theta R}) & e^{-n_v\Delta\theta R} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (۱۷)$$

زماني Δt را نشان مي‌دهد. بديهي است $1-p_{ii}$ احتمال خروج ذره از مخزن i پس از اين بازه زماني خواهد بود. بردار شرايط اوليه در مورد خشک‌کن برخوردي مورد مطالعه، به صورت زير است:

$$S(0)=[0.5\quad 0.5\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0] \qquad (۱۸)$$



شکل ۴: آرایش مخازن مربوط به آنـالیز Markov-Chain ، ۱، ۲ و ۶ جریان قالبی ایده‌ال، ۳، ۴ و ۵ مخلوط‌شونده ایده‌ال.

معادلات حاکم در مدل احتمال Markov-Chain

همان طور که در شکل (۴) ديده مي‌شود در مدل Markov مخازن همزده و جريان قالبي در کنار هم مورد ااستفاده قرار گرفته‌اند. در مورد تانک‌هاي همزده، معادلات حاکم، کاملاً مشابه با معادلاتي است که براي مدل تانک‌هاي همزده سري، استخراج گرديد. در مورد يک راکتور با جريان قالبي معادلات تغيير رطوبت، سرعت و دماي ذره و معادلات تغيير رطوبت و دماي گاز در طول خشک‌کن به صورت زير هستند [۷] و [۱۱].

$$\frac{dX_A}{dz}=-\frac{N_A M_A A_p^*}{U_p \dot m_s} \qquad (۱۹)$$

$$\frac{dU_p}{dz}=\frac{1}{m_p U_p(1+\overline{X}_C+X_A)}\left[-\frac{1}{2}C_f\rho_a A'_p\,|U_p-U_a|\,(U_p-U_a)\right] \qquad (۲۰)$$

$$\frac{dT_p}{dz}=\frac{hA_p^*(T_a-T_p)-N_A M_A A_p^*\lambda_0}{\dot m_s U_p(C_{ps}+y'_A C_{pw})} \qquad (۲۱)$$

$$\frac{dy'_A}{dz}=\frac{N_A M_A A_p^*}{U_p G'_y} \qquad (۲۲)$$

$$\frac{dT_a}{dz}=-\frac{hA_p^*(T_a-T_p)}{(C_{pa}+y'_A C_{pA})G'_y U_p} \qquad (۲۳)$$

به طوري‌که A'_p سطح تصوير يک ذره کروي ($A'_p=\frac{\pi}{4}d_p^2$) و m_p جرم ذره خشک ($m_p=\frac{\pi}{6}d_p^3\rho_p$) است.

کاربرد داده‌های زمان ماند برای تعیین پارامترهای مدل Markov-Chain

در مورد سيستم شکل (۴)، $s_6(m)$ پاسخ خشک‌کن برخوردي به يک ورودي ضرباني است؛ به طوري‌که m تعداد گذر يا بازه‌هاي زماني سپري شده از لحظه شروع نمونه‌گيري است. بنابراين، رسم نمودار $s_6(m)$ بر حسب t ($m\Delta t$) به منحني RTD سيستم مورد نظر، منجر خواهد شد و يا:

$$E(t)=RTD=\frac{s_6(t)}{\int_0^{\infty}s_6(t)\,dt} \qquad (۲۴)$$

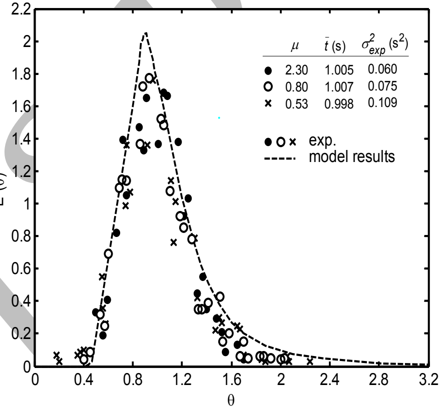
در اين آناليز، مسئله اساسي، تعيين پارامترهاي مدل، R و $\Delta\theta$ به گونه‌اي است که بهترين تطابق با داده‌هاي تجربي RTD حاصل شود. براي اين منظور با سعي و خطا R و $\Delta\theta$ طوري تنظيم مي‌شوند که شرايط رابطه (۱۱) برقرار شود. با توجه به اينکه $s_6(m)=C_{6,m}/\sum_{i=1}^{m}C_{6,m}$ و $t_i=i\Delta t$ هستند، شرايط تطبيق نتايج مدل با داده‌هاي تجربي، به صورت زير تبديل مي‌شود [۲]:

$$\sigma_{\mathrm{model}}^2=\sum_{i=1}^{m}s_6(i)[\bar t(i\Delta\theta-1)]^2 \qquad (۲۵)$$

$$1=\Delta\theta\sum_{i=1}^{m}is_6(i) \qquad (۲۶)$$

در شکل (۵) منحني گوسي شکل توزيع زمان ماند حاصل از حل مدل *Markov* براي خشک‌کن برخوردي

ترسيم شده است. علاوه بـر ايـن، در شـكل (۵) داده‌هـاي تجربي *RTD* موجود براي خشك‌كن مورد نظر، نشـان داده شده است. اطلاعات كامل‌تر در خصوص شرايط عملياتي و ابعاد فيزيكي خشك‌كن، در مراجع [۲] و [۱۲] آورده شده است. در اين تحليل، زمان ماند متوسط بـه كـار رفتـه در مدل *Markov* برابر s ۱/۰۱ = $\bar{t}$ در نظر گرفته شده اسـت. نتايج آناليز *Markov* نشـان مـي‌دهـد اگـر ۰/۰۵۲ = R و ۰/۴۴ = $\Delta\theta$ انتخاب گردد، كمترين انحـراف ممكـن بـين نتايج تئوري *RTD* و داده‌هـاي تجربـي مربوطـه، مشـاهده مي‌شود.



شكل ۵: مقايسه توزيع زمان ماند ذرات در خشك‌كن جريان برخوردي براساس مدل Markov **با داده‌هاي تجربي موجود [۲].**

$$\left(R = 0.052; \Delta\theta = 0.44; \sigma^2_{model} = 0.283 s^2 \; --- \right)$$

پارامترهاي مورد نياز

آنتالپی جريان‌های گاز و جامد

در معادلات (۲) و (۳)، H_y و H_x به ترتيـب آنتـالپي جريان‌هاي گاز و جامـد اسـت كـه بـه صـورت زيـر بيـان مي‌شوند [۱۳] و [۱۴]:

$$H_y = (C_{pa} + y'_A C_{pv})(T_a - T_0) + y'_A \lambda_0$$
$$H_x = (C_{ps} + X_A C_{pw})(T_p - T_0) \qquad (۲۷)$$

ضرايب انتقال جرم و حرارت

رابطه تجربي زير، براي محاسبه عدد ناسلت در مـورد جريان‌هاي برخوردي جامد- هوا ارائه شده است [۲]:

$$Nu_p = 1.59 \mathrm{Re}_p^{0.55} \quad : \beta_u < 0.9\times10^{-3}$$
$$Nu_p = 0.173 \mathrm{Re}_p^{0.55}\, \beta_u^{-0.61} : 0.9\times10^{-3} < \beta_u < 2.1\times10^{-3} \qquad (۲۸)$$

در ايــن روابــط β_u نسبت دبي‌هاي حجمي جامد به گاز ورودي به خشك‌كن است. عـدد رينولـدز بـه صـورت زيـر است:

$$\mathrm{Re}_p = \frac{U_a d_p}{\nu_a} \qquad (۲۹)$$

ضرايب انتقال جرم و حـرارت، از روابـط زيـر مشـخص مي‌شوند ($Sh_p = Nu_p$):

$$h = \frac{k_a}{d_p} Nu_p$$
$$k_y = k_g \frac{p_t}{RT_a} = \frac{D_{AB}}{d_p} \frac{p_t}{RT_a} Sh_p \qquad (۳۰)$$

سطح تماس موثر

همـانطور كـه در معـادلات اسـتخراج شـده مشـاهده مي‌شود، حل اين معادلات، مشروط به تعيـين زمـان مانـد متوسط ذرات درون هر مخزن از طريق تطبيق با داده‌هـاي تجربي است. بنابراين، به نظر مي‌رسد هـر گونـه تغييـر در شرايط عملياتي مورد بررسـي، مسـتلزم داشـتن داده‌هـاي تجربــي در آن شــرايط اســت كــه طبعــاً بــه ســبب محدوديت‌هاي موجود، امكان‌پذير نيست. Tamir براي رفع اين مشكل در مورد خشك‌كن برخـوردي جريـان مماسـي مورد مطالعه، سطح موثر انتقال جرم و حرارت را به صورت زير تعريف كرد [۲]:

$$A_{eff} = 6 \frac{V_r}{d_p} \frac{W_a}{W_p} \frac{\rho_a}{\rho_p} \qquad (۳۱)$$

سپس بر مبناي A_{eff} و شرايط مختلف عملياتي، رابطه زير را براي Nu_{eff} در خشك‌كن برخوردي مورد نظر، ارائـه داد [۲]:

$$Nu_{eff} = 1.386\times10^{-8} \mathrm{Re}_p^{3.46} \qquad (r = 0.983) \qquad (۳۲)$$

بنابراين، در شرايط مختلف عمليـاتي كـه داده‌هـاي تجربـي از قبيـل توزيـع زمـان مانـد، تجمـع ذرات درون خشك‌كـن (Hold-up) و در نتيجـه، زمـان مانـد متوسـط ذرات درون خشك‌كن در اختيـار نيسـت، A_{eff} جـايگزين سطح واقعي انتقال جرم و حرارت ($A_p^* \Delta t$) شده و بر ايـن مبنا ضريب انتقال حرارت جابجـايي مـوثر، بـا اسـتفاده از معادله برازش شده فوق و $Nu_{eff} = h_{eff} d_p / k_a$ محاسـبه مـي‌شـود. در معادلـه مربـوط بـه A_{eff}، $\mathrm{V_r}$ حجـم مفيـد خشك‌كـن برخـوردي جريـان مماسـي در فرآينـد تبخيـر رطوبت است (به بخش فرضيات مراجعه كنيد).

ضرایب نفوذ

به منظور محاسبه ضریب انتقال جرم، لازم است ضریب نفوذ بخارآب درون هوا (D_{AB}) تعیین گردد. D_{AB} از رابطه زیر محاسبه مي‌شود [۱۵]:

$$D_{AB} = 4.56 \times 10^{-9} T_a^{1.5} \qquad (۳۳)$$

همچنین براي تعیین توزیع رطوبت درون ذره جامد در شرایط وجود رطوبت دروني، به ضریب نفوذ آب درون ذره جامد (D_{CD}) نیاز است. این پارامتر از رابطه زیر تعیین مي‌شود [۳]:

$$D_{CD} = 0.32 \times 10^{-2} \exp(4.35 \times 10^{-12} T_p) \times \exp\left\{17.1 \exp[-1.8 \times 10^{-4} (T_p - 77.2)^2] X_C\right\} \qquad (۳۴)$$

ضریب دراگ

در معادله (۲۰) C_f ضریب دراگ بوده و به صورت زیر، به رینولدز ذره مرتبط است [۱۶]:

$$\begin{array}{lll} C_f = 24/\mathrm{Re}_p & : & \mathrm{Re}_p < 2 \\ C_f = 18.5/\mathrm{Re}_p^{0.6} & : & 2 < \mathrm{Re}_p < 1000 \\ C_f = 0.44 & : & \mathrm{Re}_p > 1000 \end{array} \qquad (۳۵)$$

همچنین، در مورد دیگر پارامترهاي ترموفیزیکي مورد نیاز (شامل y_A^*، C_p، v_a، ρ_a، k_a و λ) از روابط وابسته به دما، ارائه شده در مراجع معتبر استفاده شده است [۱۵] و [۱۷].

حل مدل‌ها و محاسبات عددي

پس از تبیین معادلات حاکم بر عملکرد خشک‌کن جریان برخوردي، در مورد هر تانک همزده ایده‌ال، معادلات (۱) تا (۴) به صورت همزمان و با استفاده از روش‌هاي سعي و خطا حل شده است. هم چنین در مورد هر مخزن با جریان قالبي معادلات (۱۹) تا (۲۳) به طور همزمان و با استفاده از روش رانگ‌کاتا درجه چهارم حل شده است.

به منظور حل معادلات حاکم بر عملکرد خشک‌کن برخوردي جریان مماسي، مشابه با شرایط عملیاتي به کار رفته در استخراج نتایج تجربي Tamir و همکاران [۱]، ذرات گندم با رطوبت اولیه $X_0 =$ ۰/۲۴ رطوبت بحراني $X_C =$ ۰/۱۹ (هر دو بر مبناي خشک)، قطر $d_p =$ ۱/۹*۱۰$^{-۳}$ m و دانسیته $\rho_p =$ ۱۱۵۳ kg/m^3 انتخاب شد. دبي جرمي جامد، در کلیه شرایط عملیاتي، ثابت و برابر $W_p =$ ۴/۸۲ *۱۰$^{-۳}$ kg/s و حجم موثر خشک‌کن برخوردي مماسي $V_r =$ ۶/۳ *۱۰$^{-۴}$ m^3 بوده است. رطوبت اولیه هواي ورودي، با توجه به دماي حباب خشک و حباب تر هوا و با استفاده از منحني رطوبت‌سنجي، به دست آمده است. این مقدار، در تمام شرایط ثابت و برابر با $y'_A =$ ۰/۰۰۷۱۹ مي‌باشد [۱۴].

نتایج و بحث

پس از انتخاب تعداد تانک‌هاي همزده سري، معادلات موازنه جرم و انرژي، در مورد هر تانک، حل شده و رطوبت نهایي محصول جامد، به دست آمده است. این نتایج به همراه شرایط عملیاتي به کار رفته در جدول (۱) آورده شده است. به طور کلي، نتایج به دست آمده نشان مي‌دهد مدل تانک‌هاي همزده سري، به طور رضایت‌بخشي رفتار خشک‌کن برخوردي مورد نظر را شبیه‌سازي مي‌کند. این در حالي است که مدل Markov در پیش‌بیني رفتار خشک‌کن برخوردي، اندکي دچار ضعف است. در ادامه، به جزئیات نتایج به دست آمده پرداخته مي‌شود.

نتایج حاصل از مدل تانک‌های همزده سری

مقایسه نتایج حاصل از این مدل با داده‌هاي تجربي ارائه شده توسط Tamir و همکاران [۱] نشان مي‌دهد مدل تانک‌هاي همزده سري از دقت قابل قبولي در پیش‌بیني درصد کاهش رطوبت ذرات، در خشک‌کن برخوردي جریان مماسي برخوردار است. لازم به ذکر است درصد خطا بین نتایج مدل ریاضي و داده‌هاي تجربي براي هر سري داده i از جدول (۱) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

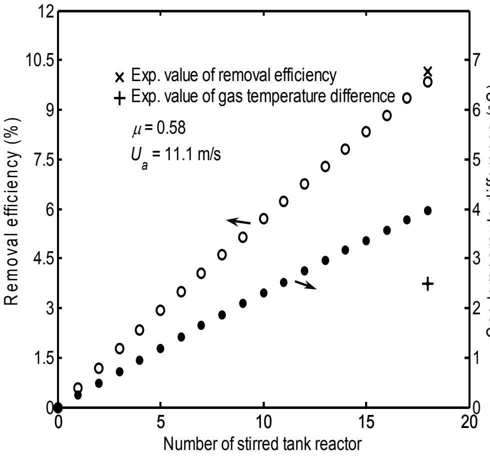
$$e_i = \frac{(\eta_{\exp,i} - \eta_{calc,i})^2}{\eta_{\exp,i}^2} \times 100 \qquad (۳۶)$$

میانگین حسابي درصد خطاهاي محاسباتي براي مجموع داده‌هاي جدول نیز محاسبه شده است که مقدار قابل قبول آن به خوبي قابلیت مدل تانک‌هاي همزده سري را در پیش‌بیني رفتار خشک‌کن برخوردي، نشان مي‌دهد.

نکته مهمي که باید به آن اشاره نمود این است که در شرایط عملیاتي موجود، حداکثر میزان کاهش رطوبت در حدود ۱۵% بوده است. بنابراین، حداقل رطوبت نهایي ذرات برابر با X_{out} =۰/۲۴*(۱-۰/۱۵) =۰/۲۰ خواهد بود. در نتیجه، تحت شرایط عملیاتي مورد مطالعه، تمام تبخیر

در دوره سرعت، ثابت اتفاق افتاده و محتواي رطوبت دروني ذره ثابت باقي مانده است. نتيجه مهمي كه از اين بخش قابل استنباط است، عدم تغيير محتواي رطوبت دروني ذرات درون جريان‌هاي برخوردي است. در حقيقت به دليل زمان ماند بسيار كوتاه ذرات درون خشك‌كن‌هاي داراي جريان برخوردي، به نظر مي‌رسد محتواي رطوبت دروني ذرات در اين خشك‌كن‌ها، به طور محسوسي كاهش نيابد و بنابراين به نظر مي‌رسد اين دسته از خشك‌كن‌ها براي كاهش رطوبت سطحي، از كارآيي بيشتري برخوردارند.

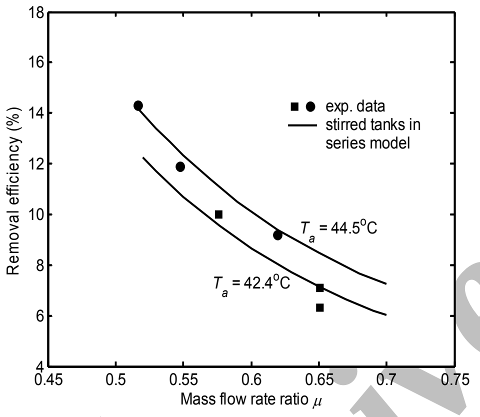
در شكل (۶) روند تغيير رطوبت ذرات جامد و اختلاف دماي گاز به ازاء ۱۸ تانک همزده سري نشان داده شده است. شرايط عملياتي به كار رفته، مشابه با شرايط مندرج در رديف ۵ جدول (۱) است. در اين شكل، منظور از اختلاف دماي گاز، تفاوت دماي خروجي از هر تانك همزده با مقدار ورودي به خشك‌كن برخوردي است. در شكل (۶) مشاهده مي‌شود كه علي‌رغم تطابق قابل قبول ميزان رطوبت نهايي محصول پيش‌بيني شده توسط مدل تانک‌هاي همزده سري با مقادير تجربي، دماي نهايي گاز با دماي گزارش شده، متفاوت بوده است. علت اين تفاوت، احتمالاً ناشي از عدم برقراري كامل شرايط عمليات آدياباتيک، در هنگام استخراج نتايج تجربي Tamir و همكاران [۱] است؛ با اين وجود، اختلاف مشاهده شده تقريباً ناچيز و همواره كمتر از ۳°C بوده است.



شكل ۶: تغييرات پله‌اي راندمان كاهش رطوبت و اختلاف دماي گاز به ازاء ۱۸ تانك همزده سري.

شكل (۷) تاثير نسبت دبي جرمي جامد به گاز را بر راندمان عمليات رطوبت‌گيري بر اساس مدل تانک‌هاي همزده سري، نشان مي‌دهد. مطابق با نتايج به دست آمده راندمان كاهش رطوبت ذرات جامد با كاهش نسبت جريان جامد به گاز، افزايش مي‌يابد. با اين وجود، كاهش جريان جامد ورودي، موجب كاهش ظرفيت كاركرد خشك‌كن بوده و اين مسئله با محدوديت‌هاي اقتصادي همراه است. بنابراين، ضروري است مقدار بهينه‌اي براي نسبت جريان جامد به گاز ورودي به خشك‌كن انتخاب شود.

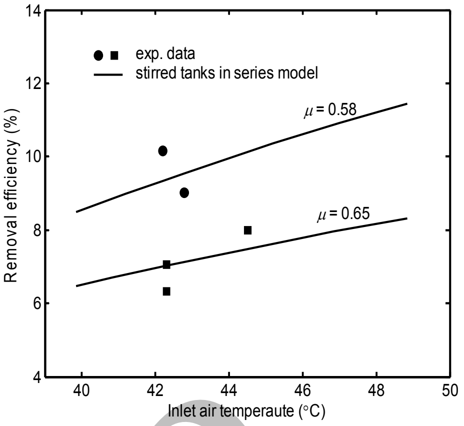
همچنين در شكل (۷) مقادير تجربي گزارش شده در اين خصوص، آورده شده است. با توجه به شكل (۷) و علي‌رغم محدود بودن داده‌هاي تجربي موجود، نتايج حاصل از مدل تانک‌هاي همزده سري از دقت مناسبي در پيش‌بيني درصد كاهش رطوبت جريان جامد، برخوردار است.



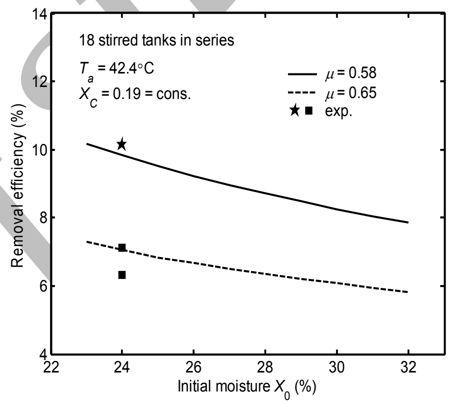
شكل ۷: بررسي تاثير نسبت دبي جرمي جامد به گاز بر راندمان كاهش رطوبت و مقايسه با داده‌هاي تجربي موجود [۱].

در شكل (۸) تاثير دماي هواي ورودي بر درصد كاهش رطوبت جامد، نشان داده شده است. مطابق با نتايج حاصل از مدل پيشنهادي و همچنين نتايج تجربي گزارش شده، افزايش دماي گاز ورودي، موجب افزايش راندمان جداسازي خشك‌كن برخوردي است. البته در اين خصوص نيز، محاسبات مربوط به بهينه‌سازي اقتصادي و عملياتي، ضروري خواهد بود.

در شكل (۹) تاثير ميزان رطوبت اوليه ذرات بر راندمان جداسازي خشك‌كن برخوردي، مورد بررسي قرار گرفته است. در مطالعه صورت گرفته، همواره محتواي رطوبت بحراني ذرات برابر با ۱۹% بوده كه براي اطمينان از انجام تبخير در ناحيه سرعت ثابت، بدون تغيير در نظر گرفته شده است.



شکل ۸: بررسي تاثیر دماي هواي ورودي بر راندمان کاهش رطوبت و مقایسه با داده‌هاي تجربي موجود [۱].

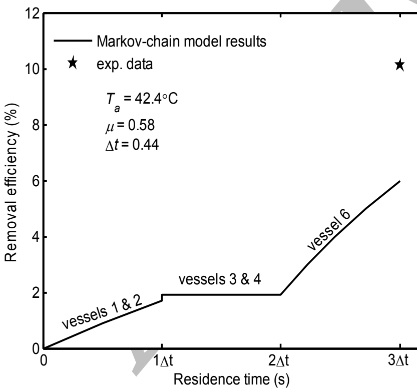


شکل ۹: بررسي تاثیر میزان رطوبت اولیه ذرات بر راندمان کاهش رطوبت و مقایسه با داده‌هاي تجربي موجود [۱].

نتایج حاصل از مدل Markov

راندمان کاهش رطوبت حاصل از مدل Markov به همراه شرایط عملیاتي در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که از درصد خطاي محاسبه شده در ستون آخر جدول دیده مي‌شود، نتایج حاصل از مدل Markov اختلاف قابل توجهي با مقادیر تجربي دارد. احتمال مي‌رود علت این اختلاف، عدم برقراري کامل شرط $(\sigma^2/\bar{t})_{mod\,el} = (\sigma^2/\bar{t})_{exp}$ در هنگام تعیین توزیع زمان ماند تئوري، بر اساس آرایش معرفي شده در شکل (۴) باشد. در واقع، تطبیق کامل واریانس تئوري و تجربي در مدل Markov در شرایطي که زمان ماند متوسط ذرات درون سیستم بسیار کم است (کمتر از ۵ s)، به راحتي امکان‌پذیر نیست [۲] که این مسئله از جمله نقاط ضعف مدل Markov در مدل سازي سیستم‌هاي داراي زمان ماند کوتاه است.

لازم به ذکر است؛ در آنالیز صورت گرفته، علاوه بر این، آرایش‌هاي متفاوتي از مخازن مدل Markov مورد بررسي قرار گرفت. به این ترتیب، از تعداد بیشتري تانک همزده سري، در فضاي متلاطم درون خشک‌کن استفاده شد. همچنین نحوه تبادلات جریاني هر مخزن با مخازن مجاور، به مراتب پیچیده‌تر از خطوط جریاني معرفي شده در شکل (۴) انتخاب گردید. با این وجود، غالباً تغییر آرایش مخزن‌ها تاثیر چنداني در بهبود نتایج مدل، نشان نداده است. بنابراین، به نظر مي‌رسد اگرچه مدل Markov از مزایاي متعددي در سهولت به کارگیري و قابلیت توسعه برخوردار است، با این وجود در پیش‌بیني رفتار خشک‌کن‌هاي برخوردي، به دلیل شرایط منحصر به فرد این خشک‌کن‌ها، دچار ضعف است. نتایج به دست آمده در این مطالعه، با نتایج حاصل از مدل ارائه شده توسط Sohrabi و Marvast [۸] براي مدل سازي رفتار یک راکتور جریان برخوردي مشابه، مطابقت داشته است. همانطور که بیشتر ذکر گردید، Sohrabi و Marvast فضاي غیرایده‌ال یک راکتور جریان برخوردي که در آن واکنش‌هاي جامد- مایع اتفاق مي‌افتد را با آرایش Markov معرفي شده در شکل (۴)، جایگزین نمودند. در مطالعه صورت گرفته، اختلاف قابل توجهي بین نتایج مدل و داده‌هاي تجربي، مشاهده شده است [۹].



شکل ۱۰: تغییرات راندمان کاهش رطوبت در طول سیستم مربوط به مدل Markov **و مقایسه با داده‌هاي تجربي موجود [۱].**

شکل (۱۰) منحني کاهش رطوبت در مدل Markov را نشان مي‌دهد. در این شکل، منحني مربوط به مخازن ۱ و ۲، تغییرات رطوبت جریان جامد در طول راکتور باجریان قالبي در بخش ورودي خشک‌کن و منحني مربوط به

جدول ۱: شرايط عملياتي و نتايج تجربي و تئوري حاصل از دو مدل پيشنهادي.

مدل Markov			مدل تانک‌هاي همزده سري			داده‌هاي تجربي [۱]	U_a	$\mu = \frac{W_p}{W_a}$	$T_{wet,in}$	$T_{dry,in}$
$e(\%)$	$\eta\ (\%)$		$e(\%)$	$\eta\ (\%)$		$\eta\ (\%)$	m/s		$(^\circ C)$	$(^\circ C)$
24.50	3.02		0.15	5.75		5.98				
11.22	4.21		1.58	7.12		6.33	9.8	0.65	21.1	42.4
16.71	4.18		0.01	7.12		7.07	9.8	0.65	21.1	42.4
5.41	7.03		0.04	9.35		9.16	10.4	0.63	22.1	44.5
16.13	6.05		0.07	9.84		10.11	11.1	0.58	21.1	42.4
4.04	7.12		0.52	9.55		8.91	11.1	0.58	21.6	42.9
5.41	8.81		1.47	12.87		11.48	11.7	0.55	21.8	44.1
10.11	9.76		0.00	14.27		14.31	12.5	0.52	22.1	44.5
$\bar{e} = 11.69$			$\bar{e} = 0.48$							

مخزن ۶، تغييرات مذكور در طول بخش خروجي خشک‌کن را نشان مي‌دهد. مخازن ۳ و ۴، تانک‌هاي همزده‌اي هستند كه در آن‌ها تغييرات رطوبت جريان جامد به طور ناگهاني اتفاق افتاده و در طول زمان ماند ذرات درون اين مخازن، ثابت بوده است. در مخازن ۳ و ۴ و همچنين مخازن ۱و ۲، به دليل تقارن سيستم، مقدار تغييرات رطوبت صورت گرفته، برابر بوده است. همچنين در شكل (۱۰) مقدار آزمايشگاهي كاهش رطوبت در مورد شرايط عملياتي مورد نظر، نشان داده شده است. بنابر نتايج به دست آمده كه در شكل فوق و همچنين جدول ۱ قابل مشاهده است، به نظر مي‌رسد مدل Markov از دقت مناسبي در زمينه پيش‌بيني عملكرد خشک‌کن برخوردي مورد نظر، برخوردار نيست.

نتيجه‌گيري كلي

- به كمک دو مدل Markov-Chain و تانک‌هاي همزده سري، فرآيند خشک‌شدن ذرات جامد در خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي مورد مدل سازي رياضي و نتايج حاصل از هر مدل با مقادير تجربي گزارش شده در خصوص يک خشک‌کن برخوردي با جريان مماسي، مورد مقايسه قرار گرفت.
- نتايج اين مطالعه نشان مي‌دهد با استفاده از مدل تانک‌هاي همزده سري، به خوبي مي‌توان عملكرد خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي را پيش‌بيني نمود. اين در حالي است كه مدل Markov به دليل شرايط خاص خود، در پيش‌بيني رفتار اين خشک‌کن‌ها داراي ضعف است.
- بررسي‌هاي صورت گرفته درباره تاثير برخي پارامترهاي عملياتي، نشان مي‌دهد راندمان كاهش رطوبت ذرات درون خشک‌کن‌هاي برخوردي با كاهش نسبت جريان جامد به گاز ورودي به خشک‌کن، كاهش رطوبت ذرات ورودي و افزايش دماي گاز، افزايش مي‌يابد.
- خشک‌کن‌هاي داراي جريان‌هاي برخوردي، راندمان بسيار بالايي در عمليات خشک‌كردن ذرات داراي رطوبت سطحي دارند؛ با اين حال، به دليل زمان ماند بسيار كوتاه ذرات درون اين خشک‌کن‌ها، محتواي رطوبت دروني ذرات، به مقدار محسوسي كاهش نمي‌يابد. در نتيجه، به نظر مي‌رسد استفاده از خشک‌کن‌هاي برخوردي، براي ذرات با محتواي رطوبت بسيار زياد (رطوبت دروني) با محدوديت‌هايي همراه باشد كه البته نياز به بررسي‌هاي علمي بيشتري دارد.

تقدير و تشكر

اين تحقيق با حمايت هاي مادي و معنوي معاونت تحقيقات و فن آوري دانشگاه اصفهان و تحت عنوان طرح درون دانشگاهي به شماره ۸۶۰۲۰۲ به انجام رسيده است، كه نويسندگان، به اين وسيله مراتب تشكر و قدرداني خود را اعلام مي‌دارند.

فهرست علائم

A_p^* : سطح ذرات بر واحد زمان، m^2/s

A_p' : سطح تصوير شده يک ذره كروي، m^2

A_{eff} : سطح موثر ذرات درون خشک‌کن، m^2

C_f : ضريب دراگ، بدون بعد

C_p : ظرفيت گرمايي، J/ kg. K

C : غلظت نشانگر (يا تعداد ذرات) در خروجي به

	ازاء یک ورودي ضرباني
D_{AB}	: ضریب نفوذ بخارآب در هوا، m^2 / s
D_{CD}	: ضریب نفوذ آب درون ذره جامد، m^2 / s
d_p	: قطر ذره، m
E	: تابع توزیع زمان ماند ذرات (RTD)، s^{-1}
G'_y	: دبي جرمي هوا (مبناي خشک)، kg /s
h	: ضریب انتقال حرارت جابجايي، W/ m². K
h_{eff}	: ضریب انتقال حرارت جابجايي موثر، W/ m². K
K_y	: ضریب انتقال جرم، mol /m².s
k_a	: ضریب هدایت حرارتي هوا، W/ m. K
M_A	: جرم مولکولي آب، kg /mol
$\dot{m}_s$	: دبي جرمي جامد (مبناي خشک)، kg /s
m_p	: جرم ذره خشک، kg
m	: تعداد گذر یا تعداد بازه‌هاي زماني در مدل Markov
N_A	: شار انتقال جرم، mol /m².s
N	: تعداد تانک‌هاي همزده سري
n_v	: تعداد مخازن در آناليز Markov
P	: ماتریس احتمال گذر، بدون بعد
p_{ii}	: احتمال باقي ماندن سیستم در موقعیت i ، بدون بعد
p_{ij}	: احتمال گذر سیستم از موقعیت i به j ، بدون بعد
Q	: دبي حجمي جریان سیال، m³ /s
R	: ثابت عمومي گازها، J /mol.K
r	: جریان برگشتي در مدل Markov، kg /s
$S(0)$	: بردار شرایط اولیه، بدون بعد
$S(m)$	: بردار احتمال موقعیت پس از m گذر، بدون بعد
$s_p(m)$	: احتمال پاسخ بردار موقعیت $S(m)$ به یک ورودي ضرباني
T	: دما ، K
$\bar{t}$	: زمان ماند متوسط درون خشک‌کن برخوردي، s
t	: زمان، s
U	: سرعت، m /s
V_r	: حجم مفید خشک‌کن برخوردي، m³
W_p	: دبي جرمي جامد (مبناي تر)، kg /s
W_a	: دبي جرمي هوا (مبناي تر)، kg /s
X_A	: رطوبت سطحي ذره بر مبناي خشك، kg / kg
X_C	: رطوبت دروني ذره بر مبناي خشك، kg / kg
$\bar{X}_C$	: مقدار متوسط رطوبت دروني ذره، kg / kg
y'_A	: رطوبت مطلق هوا، kg / kg
y_A	: کسر مولي رطوبت در هوا
y^*_A	: کسر مولي رطوبت در شرایط اشباع
β_u	: نسبت جامد به گاز، (m³/m³)
ρ	: چگالي، kg / m³
η	: راندمان کاهش رطوبت، %
μ	: نسبت جامد به گاز، (kg/kg)
λ	: گرماي نهان تبخیر آب، J / kg
Δt	: حداقل زمان ماند درون مخزن مربوط به مدلMarkov، s
σ^2	: واریانس، s²
φ	: ماندگي ذرات جامد، kg
ν_a	: ویسکوزیته سینماتیک هوا، N. s /m²
A	: رطوبت
a	: هوا
0	: شرایط اولیه
p	: ذره
in	: ورودي
out	: خروجي
dry	: مربوط به دماي حباب خشک
v	: بخارآب
wet	: مربوط به دماي حباب تر
w	: آب مایع

مراجع

1- Tamir, A., Elperin, I. T. and Kfir, L. (1984). “Drying in a new two impinging streams reactor.” *Chemical Engineering Science,* Vol. 39, PP. 139-146.

2 - Tamir, A. (1994). *Impinging Stream Reactors: Fundamental and Application*, Elsevier, Amsterdam.

3 - Huai, X. L., Peng, X. F., Wang, G. X. and Liu, D. Y. (2003). “Multi- phase flow and drying characteristics in a semi-circular impinging stream dryer.” *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 46, PP. 3061-3067.

4 - Huai, X. L. and Liu, D. Y. (1998). “Analysis of the flow dynamic characteristics of semi-circular impinging stream drying.” *Trans. CASE*, Vol. 14, PP. 67-72.

5 - Liu, D. Y. (1998). “Impinging stream drying, modern drying technology.” *Chemical Industry Press*, Beijing, PP. 621-636.

6 - Peper, F., Leiner, W. and Fiebig, M. (2005). “Drying performance and surface forces of a pair of impinging redial jets.” *Heat and Mass Transfer,* Vol. 30, No. 5, PP. 313-320.

7 - Niksiar, A. and Rahimi, M., (2006). “Mathematical modeling and simulation of drying of the wet particles in an axial impinging stream dryer.” *Iranian Chemical Engineering Journal,* Vol. 5, No. 25, PP. 37-47.

8 - Sohrabi, M. and Jamshidi, A. M. (1999). “Application of the continues two impinging streams reactors in chemical absorption.” *Studies in Surface Science and Catalysis,* Vol. 122, PP. 423-426.

9 - Sohrabi, M. and Marvast, M. A. (2000). “Application of a continuous two impinging streams reactor in solid-liquid enzyme reactions.” *Ind. Eng. Chem. Res.,* Vol. 39, PP. 1903-1910.

10 - Levenspiel, O. (1998). *ChemicalReaction Engineering, 3rd Ed.,* John Wiley & Sons, New York.

11 - Rahimi, A., Taheri, M. and Fathikalajahi, J. (2002). “Mathematical modeling of heat and mass transfer in hot gas spray systems.” *Chemical Engineering Communications,* Vol. 189, No. 7, PP. 959-973.

12 - Tamir, A. and Shalmon, B. (1988). “Scale up of TIS reactors.” *Industrial and Engineering Chemistry Research,* Vol. 27, PP. 238-242.

13 - Lague, C. (1991). “Modeling pre-harvest stress-cracking of rice kernels. Part 2: implementation and use of model.” *Trans. ASAE,* Vol. 34, No. 4, PP. 1797-1811.

14 - Treybal, R. E. (1999). *Mass Transfer Operations. 3rd Ed.,* Chemical Engineering Series, McGraw Hill.

15 - Perry, R. H. and Green, D. (1984). *Perry's Chemical Engineer's Handbook. 6th Ed.,* McGraw Hill International Edition, New York.

16 - Douglas, J. F., Gasiorek, J. M. and Swaffield, J. A. (1985). *Fluid Mechanics. 2nd Ed*., John Wiley & Sons, New York.

17 - Smith, J. M., Van ness, H. C. and Abbott, M. M. (2001). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 6th Ed.,* McGraw Hill, New York.