

# بررسی آزمایشگاهی فرایند پوشش دهی پودر سدیم پرکربنات با محلول سدیم سیلیکات در بستر سیال

مهدی ارجمند\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه تحصیلات تکمیلی مهندسی شیمی

سید حسن الحسینی، سید هادی سیدین

تهران، دانشگاه تهران، گروه پژوهشی فرآوری مواد فلزی جهاد دانشگاهی

**چکیده:** در این مقاله سامانه پوشش دهی ذره‌ها در بستر سیال، مطالعه شده است. سامانه بستر سیال مورد مطالعه، شامل دو مرحله، پوشش و خشک شدن در بستر است، و برای پوشش دهی ذره‌های سدیم پرکربنات از سدیم سیلیکات، استفاده شده است. این سامانه از نوع ناپیوسته و نوع پوشش دهی پاشش از بالا است. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و بررسی بهتر نتیجه‌ها، طرح آزمایش به روش پاسخ سطح (RSM) انجام شد و از نرم افزار Minitab نسخه ۱۵ استفاده شد. در آزمایش‌ها، الگوی شناوری ذره‌ها و جریان هوا و مایع، مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های آزمایش نشان داد، که مقدار پوشش متناسب با شدت جریان مایع بوده و نسبت وارون با شدت جریان هوا دارد. معادله تجربی جرم پوشش روی ذره، بر حسب متغیرهای شدت جریان هوای سیال ساز، شدت جریان مایع، شدت جریان هوای افشان کننده و نیز جدول‌ها و نمودارهای غربالی RSM برای بهینه سازی فرایند و بررسی عملکرد سامانه، به دست آمد. نتیجه‌هایی مانند ارتفاع شناورسازی ذره‌ها با زمان، محاسبه جرم پوشش با شدت جریان‌های گوناگون هوا و مایع، نمودارها و نمودارهای غربالی برای تأثیر متغیرهای شدت جریان هوای شناورسازی، شدت جریان هوای افشان کننده و شدت جریان مایع، برای بهترین حالت در پوشش دهی ذره‌ها، به دست آمده و مورد بررسی قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** پوشش دهی، ذره‌ها، گرانول سازی، بستر سیال، نازل دو سیاله، طرح آزمایش، بهینه سازی.

**KEY WORDS:** Coating, Particles, Granulation, Fluid bed, Two-fluid nozzle, Experiment design, Optimization.

## مقدمه

شبهه‌سازی دو فازی راکتورهای بستر سیال گاز - جامد با مدل مخزن‌های متوالی، توسط روزبه جعفری و همکاران [۳]، پیش‌بینی افت فشار خشک کن بستر سیال سدیم پرپورات با استفاده از دینامیک سیال‌های محاسباتی، توسط مجتبی سمنانی رهبر و اصغر علی‌زاده [۴]، بررسی اثر دیواره روی هیدرودینامیک راکتور

سامانه‌های بستر سیال در صنایع گوناگون، مانند داروسازی، مواد غذایی و صنایع شیمیایی کاربرد دارند. تازه ترین مطالعه‌های تجربی و مدل‌سازی انجام شده در زمینه، پوشش ذره‌ها در بستر سیال شامل مدل‌سازی CFD جریان سه فاز گاز، ذره‌های جامد و قطره‌های مایع در داخل بستر سیال، توسط وحید عبدالکریمی [۱]،

\*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: m\_arjmand@azad.ac.ir

بررسی مقدار پوشش مذاب داغ<sup>(۳)</sup> برای پوشش دهی مواد دارویی در بستر سیال توسط *Gorkem Kulah* و همکاران [۱۹] و نیز پوشش دانه‌های کروی شیشه به قطر ۰/۳۵ میلی متر، با لایه بسیار نازک از کربن دی اکسید در بستر سیال نوع Wurster، توسط *Fenghui Niu* و همکاران [۱۶] انجام شده و روشی برای پوشش دهی در بستر سیال با استفاده از کربن دی اکسید نزدیک به شرایط بحرانی<sup>(۴)</sup>، به صورت محیط شناور و خشک کننده توسط *Fenghui Niu* و همکاران [۲۱] به کار گرفته شده است. بررسی اثرهای دمای هوای ورودی و نرخ اسپری محلول پوشش دهنده روی کیفیت برنج پوشش داده شده با عصاره زرد چوبه، با استفاده از فناوری پوشش دهی بستر سیال اسپری از بالا توسط *Arkom Palamanit* و همکاران [۲۰] و گرانول سازی<sup>(۵)</sup> ذره‌ها توسط محلول آبکی آمونیوم سولفات<sup>(۶)</sup>، برای تولید دانه‌های بزرگ کروی، در بستر سیال توسط *Guanda Wang* و همکاران [۲۲] انجام شده است. همچنین مدل سازی حرکت سراسری ذره<sup>(۷)</sup> در بسترهای سیال پوشش دهی افشانه از بالا، توسط *Mike Vanderroost* و همکاران [۲۳] صورت گرفته است.

در این مقاله به بررسی فرایند پوشش دهی ذره‌های سدیم پرکربنات با محلول سدیم سیلیکات ۳۰ درصد (رقیق سازی با آب)، در سامانه بستر سیال نوع افشانه از بالا و طرح آزمایش به روش پاسخ سطح پرداخته شده است. این کار روشی جدید برای تولید پودرهای شستشو است و در صنایع پودرهای شوینده کاربرد دارد. همچنین متغیرهایی مانند شناورسازی ذره‌ها، جرم پوشش روی ذره‌ها و پاشش افشانه مایع مورد بررسی قرار گرفته است.

سامانه‌های بستر سیال افشانه از بالا، در پوشش دهی ذره‌ها کاربرد دارند و به عنوان خشک کن نیز استفاده می شوند. مواد اولیه تحت پوشش، به شکل پودر، ذره‌های ریز خام، مواد دانه‌ای<sup>(۸)</sup> و پودری<sup>(۹)</sup> شکل هستند. در این فرایند، مواد پوشش دهنده را به شکل خمیری، دوغاب، محلول شیمیایی و یا ذوب شده در آورده و به صورت افشانه<sup>(۱۰)</sup> به روی ذره‌ها می‌پاشند و مایع با ذره‌های شناور در بستر واکنش داده یا سطح آنها را پوشش می‌دهد [۱]. در این فرایند ماده افشانه شده در اثر برخورد

بستر ثابت با استفاده از دینامیک سیال‌های محاسباتی، توسط *علیرضا میراولیائی* و همکاران [۵]، مدل سازی ضریب انتقال گرمای تابشی در بستر سیال گردشی، توسط سعید رسولی و همکاران [۶]، شبیه سازی ناپایایی بستر سیال شده حبایی، دارای ذره‌های نوع B با استفاده از CFD توسط سید حسین حسینی و همکاران [۷] هستند. همچنین پوشش ذره‌های سدیم کلرید به اندازه ۵۰۰ میکرون، که بایک محلول پروتئینی و به روش پاسخ سطح و برحسب جرم پوشش روی ماده پایه، همراه با مطالعه متغیرهای شدت جریان و فشار هوای شناور سازی، قطر ذره‌ها و دمای محیط بستر، توسط *Hede* و همکاران انجام شده است [۸]. حرکت و الگوی شناورسازی ذره‌های گوناگون، در سامانه بستر سیال و همچنین مدل سازی جریان سه فازی، گاز، جامد و قطره‌های مایع، در فرایند پوشش دهی ذره‌ها در بستر سیال، در سال ۱۹۹۸ میلادی توسط *Maronga* و همکاران بررسی شده است [۹]. پوشش ذره‌های هیدروژل متخلخل<sup>(۱)</sup> با افشانه در بستر سیال، برای تولید سدیم دیکلوفناک<sup>(۲)</sup> آزاد، و بررسی نسبت جرم ماده پوشش دهنده برحسب اندازه ذره [۱۱، ۱۰]، درصد ذره‌های شناور برحسب شدت جریان سیال سازی و تصویر دقیق میکروسکوپی از ذره‌ها، بعد و قبل از عملیات گرانول سازی و پوشش دهی در بستر، توسط *Dachuna* و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. محاسبه کمترین سرعت شناورسازی، برای دانه‌های شیشه‌ای با اندازه‌های گوناگون [۱۳]، در زمینه دستگاه‌های پوشش دهی نیز، بررسی سامانه پوشش دهی بستر سیال اسپری از پایین، توسط *Cedric Briens*، و نیز پوشش دهی ذره‌های شیشه با محلول ژلاتین و ارایه رابطه‌ای تجربی برای اندازه گیری ضخامت پوشش، به وسیله *Koen Dewettinck* انجام شده است [۱۴، ۱۵]. افزون بر این، مدل سازی و شبیه سازی بستر سیال گرانول ساز، برای ذره‌های آلومینیوم اکسید در بستر نوع *Wurster* توسط *DEM-CFD* با نرم افزارهای *Fluent* و *EDEM* توسط *Lennart Fries* و همکاران [۱۷] و مطالعه متغیرهای طراحی و تعیین مقیاس و پوشش دهی، در بسترهای سیال مورد استفاده در صنعت داروسازی توسط *Jitendra Chauhan* و همکاران صورت گرفته است [۱۸].

(۱) Porous hydrogel beads

(۲) Diclofenac sodium

(۳) Hot Melt Coating

(۴) Near Critical Carbon Dioxide

(۵) Granulation

(۶) Ammonium Sulfate

(۷) Overall Particle Motion

(۸) Granule

(۹) Powder

(۱۰) Spray

دهانه پایین ۲۲٫۵ cm و دهانه بالای ۴۵cm است. قطعه‌های مورد استفاده در این سامانه عبارتند از، کمپرسور هوا<sup>(۱)</sup>، تابلو برق<sup>(۲)</sup>، مخزن تحت فشار مایع<sup>(۳)</sup>، فشار سنج<sup>(۴)</sup>، دمنده هوا<sup>(۵)</sup> و گرم‌کن هوا<sup>(۶)</sup>، روتامترهای مایع و هوا<sup>(۷)</sup>، برای اندازه‌گیری شدت جریان و بستر سیال<sup>(۸)</sup>، که برای پوشش‌دهی استفاده می‌شود.

### چگونگی عملکرد سامانه

در این سامانه ابتدا هوای کمپرسور، داخل لوله شده و بعد از عبور از گرم‌کن، وارد بستر می‌شود. بخش دیگر هوا وارد جریان سنج هوا شده و در بالای بستر به نازل وارد می‌شود، تا مایع پوشش‌دهی را روی مواد شناور در بستر، بپاشد. توسط نمایشگرهای دیجیتال دما روی تابلو برق سامانه، دما در طول بستر و گرم‌کن هوا برای فرایند خشک کردن، کنترل می‌شود. پس از خشک شدن ذره‌ها در بستر، وزن آنها بررسی می‌شود. نازل مورد استفاده به علت زاویه پاشش و اختلاط مناسب هوا و مایع قبل از پاشش قطره‌ها، از نوع دو سیاله اختلاط داخلی، انتخاب شده است.

### چگونگی شناور سازی ذره‌ها در بستر سیال

مقداری از ذره‌های سدیم پرکربنات را درون توری در کف بستر ریخته، سپس دمنده<sup>(۷)</sup> را روشن کرده و در شدت جریان‌های گوناگون، شناورسازی ذره‌ها بررسی شده است. بررسی ارتفاع شناورسازی ذره‌ها، با استفاده از روش فیلمبرداری با دوربین دیجیتال ممکن است. یعنی فریم‌های فیلم را بررسی کرده و مکان تقریبی ذره‌ها در ارتفاع مورد نظر، برحسب زمان مشخص می‌شود. تغییر ارتفاع شناوری<sup>(۸)</sup> در زمان‌های گوناگون، هر ۲ ثانیه یک‌بار گزارش شد. علت‌های این تغییرها این است که ابتدا ذره در اثر فشار هوای شناور کننده به سمت بالا رفته و در نتیجه افت فشار، پایین می‌آید. بنابراین یک حالت تعادل بین وزن ذره و نیروی شناوری هوا وجود دارد. البته ارتفاع‌های مشخص شده در شکل، متوسط ارتفاع بین بالاترین و پایین‌ترین مقدار ذره شناور است. در زمان صفر، ذره‌ها ارتفاعی معادل ارتفاع کمینه شناور سازی در شروع ورود هوا داشتند، که معادل ۲ سانتیمتر بود.

به سطح ذره، تغییر شکل می‌دهد و به وسیله یک ارتباط مولکولی ناشی از نیروی چسبندگی بین دو ماده، به سطح ذره چسبیده و یک ساختار لایه ای را تشکیل می‌دهد. توزیع یکنواخت پوشش، به نوع سیال پوشش دهنده، اندازه و نوع ذره‌های تحت پوشش، جریان هوای شناور و زاویه نازل، در فرایند پوشش‌دهی در بستر بستگی دارد [۲]. عامل‌های دیگر عبارتند از تولید و تبخیر قطره‌ها، انتقال جرم، انتقال گرما و حرکت ذره‌ها در بستر. متغیرهای زیادی در فرایند پوشش‌دهی تأثیر گذار هستند، که از روش آزمایش یا مدل‌سازی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزارهایی مانند فلوئنت<sup>(۱)</sup> با دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD)<sup>(۲)</sup> و یا نرم افزار شبیه ساز بستر سیال Ergon تعیین می‌شوند.

در این کار، ذره‌های سدیم پرکربنات، توسط محلول سدیم سیلیکات در بستر سیال، پوشش داده می‌شود. کاربرد آن در صنعت در پودرهای شوینده، به‌خاطر حفظ اکسیژن پودر است. زیرا این لایه محافظ سیلیکات، از ذره پودر، در برابر عامل‌های محیطی مانند رطوبت و خوردگی حفاظت می‌کند، که باعث کاهش خروج اکسیژن از فرآورده می‌شود. چون اکسیژن، نقش سفید کننده را در پودرها دارد و قدرت سفید کنندگی پودرهای رختشویی به مقدار اکسیژن آنها بستگی دارد. در سامانه‌های بستر سیال، برای افشان کردن قطره‌های مایع در فرایند پوشش‌دهی، به طور معمول از نازل‌های دوسیاله بادی<sup>(۳)</sup> استفاده می‌شود. زیرا اندازه قطره‌های تولید شده به وسیله این نازل‌ها، کوچکتر از اندازه قطره‌های تولید شده به وسیله نازل‌های تک سیاله است. بنابراین در این پژوهش، سدیم سیلیکات رقیق<sup>(۴)</sup> توسط افشانه نیوماتیک دو سیاله در بالای بستر، بر روی ذره‌های شناور سدیم پرکربنات، افشانه شد.

### بخش تجربی

#### شرح دستگاه مورد استفاده در پوشش‌دهی بستر سیال

این سامانه از نوع پوشش‌دهی افشانه از بالا<sup>(۵)</sup> است. شمای دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه، یک سامانه پوشش‌دهی ناپیوسته (مقدار کل ماده (پودر) تحت پوشش در محفظه شناور ثابت است)، در مقیاس آزمایشگاهی<sup>(۶)</sup> است. شکل بستر سیال، مخروط ناقص به ارتفاع ۸۴cm و قطر

(۱) Fluent

(۲) Computational Fluid Dynamic

(۳) Pneumatic Two-Fluid Nozzle

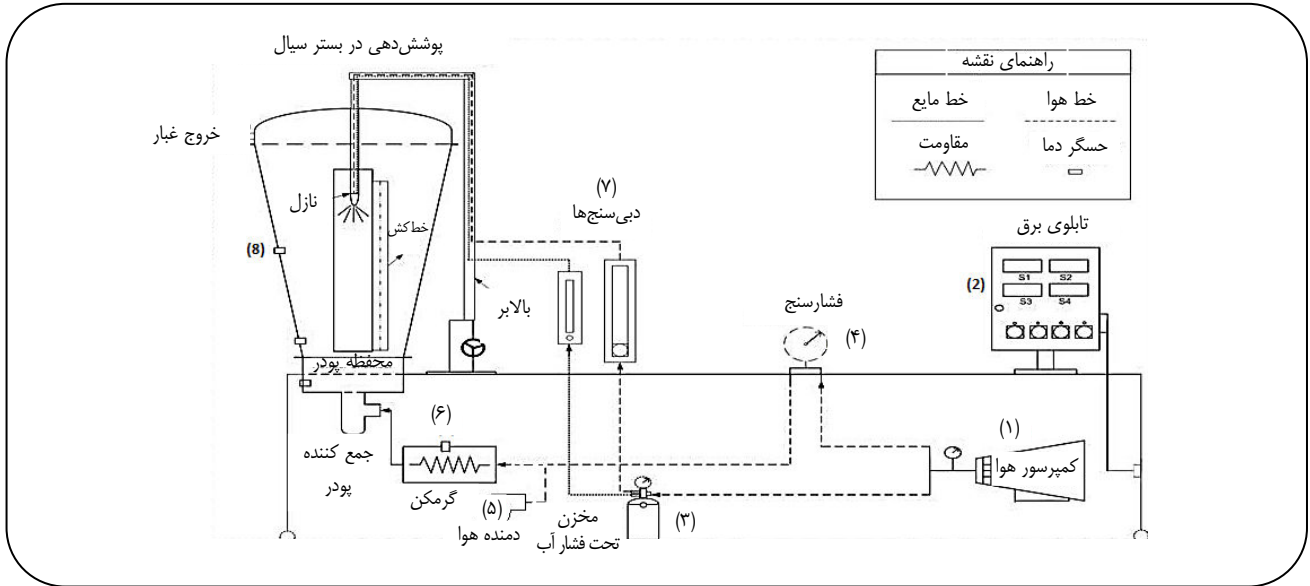
(۴) Diluted Sodium Silicate

(۵) Top Spray Coating System

(۶) Bench Scale

(۷) Blower

(۸) Fluidization Height



شکل ۱- شمای دستگاه آزمایشگاهی خشک کن بستر سیال.

تصویری از بستر سیال استفاده شده در این پژوهش، به صورت نمایی از بستر، در شکل ۲ نشان داده شده است. ذره‌ها در زمان‌های گوناگون، ارتفاع شناورسازی متفاوتی دارند. زیرا شدت جریان هوا با زمان تغییر می‌کند. افزایش شدت جریان هوای شناورسازی، باعث افزایش ارتفاع ذره‌ها و کاهش شدت جریان، باعث کاهش ارتفاع شناوری ذره‌ها در بستر می‌شود. ارتفاع شناورسازی با وزن هر ذره، نسبت مستقیم و با نیروی شناوری هوا<sup>(۱)</sup>، نسبت وارون دارد. یعنی هرچه وزن ذره‌ها کمتر باشد، به ارتفاع بیشتری بالا می‌روند.

### بخش نظری

#### شرح انجام آزمایش های پوشش دهی

روش پاسخ سطح<sup>(۲)</sup> از روش های طرح آزمایش است، که نسبت به سایر روش ها دقت بیشتری دارد. بنابراین با استفاده از روش RSM و با نرم افزار Minitab نسخه ۱۵، آزمایش هایی برای خشک کردن و پوشش دهی ذره‌ها انجام شد. ابتدا توسط روش پاسخ سطح، تعداد ۲۰ آزمایش طرح شد. مقدار ۳ سطح برای هر متغیر در نظر گرفته شد. سطح ۱- کمترین مقدار، سطح ۰ مقدار میانی و سطح ۱+ بیشترین مقدار آن متغیر بود. متغیرها عبارت بودند از، شدت جریان مایع<sup>(۳)</sup>، شدت جریان هوای افشان کننده<sup>(۴)</sup> و



شکل ۲- تصویری از دستگاه. (۱) تابلو برق. (۲) روتامتر هوا. (۳) روتامتر مایع. (۴) میله بالابرنده نازل. (۵) بستر سیال. (۶) حسگر دما.

(۱) Buoyancy Force of Air

(۲) Respond Surface Method (RSM)

(۳) Liquid Flow

(۴) Sprayed Air Flow

جدول ۱- نام متغیرها و سطوح آنها در طرح آزمایش.

نام متغیر	هوای شناور سازی	مایع	هوای افشان کننده
سطح ۱	۱۵۰ m <sup>3</sup> /h	۲۵ mL/min	۵ L/min
سطح ۲	۳۷۵ m <sup>3</sup> /h	۶۷٫۵ mL/min	۷٫۵ L/min
سطح ۳	۶۰۰ m <sup>3</sup> /h	۱۰۰ mL/min	۱۰ L/min

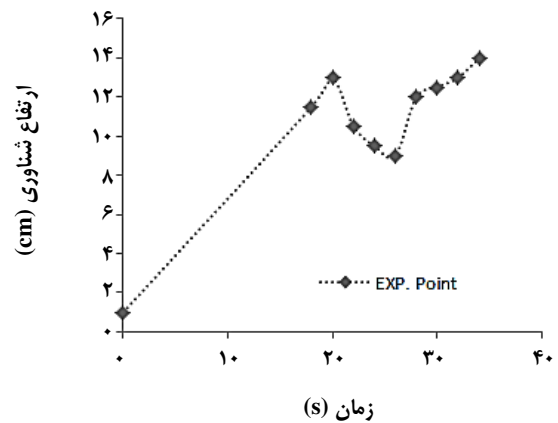
در دبی‌سنج‌های مایع و هوا بود. در طرح آزمایش، برای هر متغیر تعداد سه سطح در نظر گرفته شد.

مدت زمان پوشش‌دهی ذره‌ها یک دقیقه و مدت زمان خشک کردن ۵ دقیقه بود. دمای معمولی برای خشک کردن ذره‌های شناور در بستر برای تولید فراورده‌ی نهایی ۷۰°C است. از آنجایی که این دما، بالاتر از نقطه شبنم<sup>(۲)</sup> است. پس رطوبت در فراورده تشکیل نمی‌شود.

#### محاسبه‌های انجام شده در آزمایش‌ها

چون اندازه ذره‌های سدیم پرکربنات در بازه‌ی تقریبی ۵۰۰ تا ۷۰۰ میکرون هستند، ابتدا جرم یک ذره ۶۰۰ میکرونی سدیم پرکربنات ( $m_p$ ) روی ترازوی دیجیتال دقیق تعیین شد. سپس وزن ۱۰۰ گرم از ذره‌های پرکربنات ( $m_i$ ) بر وزن یک ذره تقسیم شده و تعداد تقریبی ذره‌های ( $N$ ) به دست آمد. در این حالت حدود ۳۴۳۶۵ ذره به دست آمد. سپس جرم همان یک ذره ۶۰۰ میکرونی با پوشش سدیم سیلیکات مایع ( $m_s$ ) خشک شده احاطه کننده ذره، اندازه‌گیری شد. جرم ذره پوشش داده شده از جرم ذره اولیه کم شد. بنابراین جرم بهینه پوشش ( $m_c$ ) برای یک ذره ۶۰۰ میکرونی به دست آمد.

سپس جرم پوشش یک ذره در تعداد تقریبی ذره‌ها، یعنی ۳۴۳۶۵ ضرب شد تا جرم بهینه پوشش<sup>(۳)</sup> برای پوشش‌دهی ذره‌های سدیم پرکربنات در ۱۰۰ گرم از این ذره‌ها ( $W_{OP}$ )، به دست آمد. برای محاسبه مقدار درصد خطا، از مقدار بهینه تجربی استفاده شد. در انجام آزمایش‌ها که توسط روش پاسخ سطح طرح شده بود، مقدار جرم بهینه ( $W_{OP}$ ) برای ۱۰۰ گرم ذره‌های پرکربنات با جرم پوشش داده شده در طول آزمایش در هر مرحله و پس از خشک شدن در همان مرحله ( $W_i$ ) مقایسه شد و مقدار درصد خطا<sup>(۴)</sup> برای پوشش در هر آزمایش به دست آمد و در ستون آخر جدول ۲ در هر مرحله مشخص شد.



شکل ۳- نمودار تغییر ارتفاع شناورسازی ذره‌ها برحسب زمان.

شدت جریان هوای شناورسازی<sup>(۱)</sup>، آزمایش‌ها به این صورت انجام شد، که مقدار ۱۰۰ گرم پودر از ذره‌های سدیم پرکربنات خشک در کف بستر سیال، بر روی توری پارچه‌ای با سوراخ‌های ریزتر از قطر ذره‌ها، ریخته شد و سپس توسط هوای شناورسازی، این ذره‌های شناور شده و توسط افشانه سدیم سیلیکات مایع ایجاد شده از نازل دو سیاله در بالای بستر، به مدت ۱ دقیقه پوشش داده شدند. البته در هر آزمایش مقدار شدت جریان هوای افشان کننده، شدت جریان مایع و شدت جریان هوای شناور کننده (جدول ۱)، متغیر بود. سپس توسط جریان هوای گرم تولیدی از مبدل گرمایی، به مدت ۵ دقیقه، در دمای تقریبی ۷۰ درجه خشک شدند. در این حالت جرم ذره‌های پوشش داده شده در هر آزمایش، قبل و بعد از عملیات پوشش‌دهی، توسط ترازو اندازه‌گیری شد. این کار در ۲۰ آزمایش انجام شد.

در جدول ۱ نام متغیرها با مقدار سطوح آنها مشخص شده است. مقدارهای سطوح نیز به روش پاسخ سطح، برای هر آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. از جمله موردهای به‌وجود آورنده خطا، مناسب نبودن نازل، اندازه و شکل کف بستر و نیز نوسان کم جریان،

(۱) Fluidization air flow

(۲) Dew point

(۳) Optimized coating mass

(۴) % Error ratio

جدول ۲- نتیجه‌های طرح آزمایش به روش پاسخ سطح.

شماره هر آزمایش	شدت جریان هوای افشان کننده	شدت جریان مایع	شدت جریان هوای شناورسازی	جرم پوشش (g) در ۱۰۰ گرم گرانول	درصد خطا
۱	-۱	-۱	-۱	۱۳	۴۰٫۱۵
۲	۱	-۱	-۱	۱۱٫۷۴	۴۵٫۹۴
۳	-۱	۱	-۱	۱۸٫۴۵	۱۵٫۰۵
۴	۱	۱	-۱	۱۶٫۸	۲۲٫۶۵
۵	-۱	-۱	۱	۱۲٫۱	۴۴٫۲۹
۶	۱	-۱	۱	۱۱٫۴	۴۷٫۵۱
۷	-۱	۱	۱	۱۷٫۸	۱۸٫۰۴
۸	۱	۱	۱	۱۵	۳۰٫۹۳
۹	-۱	۰	۰	۱۴٫۲	۳۴٫۶۲
۱۰	۰	۰	۰	۱۳٫۵	۳۷٫۸۴
۱۱	۰	-۱	۰	۱۱٫۷۴	۴۵٫۹۴
۱۲	۰	۱	۰	۱۷٫۵۴	۱۹٫۲۵
۱۳	۰	۰	-۱	۱۴٫۱۵	۳۴٫۸۵
۱۴	۰	۰	۱	۱۳٫۶۵	۳۷٫۱۵
۱۵	۰	۰	۰	۱۳٫۹	۳۶
۱۶	۰	۰	۰	۱۳٫۸	۳۶٫۴۶
۱۷	۰	۰	۰	۱۴	۳۵٫۵۴
۱۸	۰	۰	۰	۱۴٫۱	۳۵٫۰۸
۱۹	۰	۰	۰	۱۴	۳۵٫۵۴
۲۰	۰	۰	۰	۱۳٫۸۵	۳۶٫۲۳

## نتیجه‌ها و بحث

در جدول ۲ نتیجه‌های آزمایش‌های طرح شده به روش پاسخ سطح آورده شده است. درصد خطا نیز طبق روابط محاسباتی ارایه شده، در بخش پیشین در هر ردیف از جدول ۲، نشان داده شده است.

### تجزیه و تحلیل پوشش دهی ذره‌های درون بستر سیال

تعدادی از ذره‌های پرکربنات قبل از پوشش دهی زیر میکروسکوپ الکترونیکی، مورد بررسی قرار گرفت. این ذره‌ها اندازه‌هایی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ میکرومتر داشتند. اندازه این ذره‌ها، بعد از پوشش دهی بیشتر شد. بعد از پوشش دهی ذره‌ها با محلول

سیلیکات رقیق ۳۰ درصد، تعدادی از آنها که به صورت گرانول درآمده بودند، بر روی لام مشکی رنگ میکروسکوپ قرار داده شده و اندازه آنها را بررسی شد. در شکل ۴، می‌توان تصویرهایی از ذره‌های سدیم پرکربنات، قبل و بعد از پوشش دهی را دید.

شکل ۴ نشان می‌دهد، که اندازه ذره‌ها بعد از فرایند پوشش دهی بیشتر شده است. زیرا برخی از ذره‌ها پس از پوشش به یکدیگر چسبیده، یا به مقدار بسیار ناچیز به حجم آنها افزوده شد. تعداد ۲۰ آزمایش گوناگون، مطابق جدول ۲ در بستر سیال انجام شد. مرحله‌های گوناگون انجام محاسبه‌ها، مطابق توضیح‌های پیشین در زیر آورده می‌شود.

جدول ۳- روش طراحی ترکیبی عمومی.

فاکتورها	۳	نقاط محوری	۶
اجراهای پایه	۲۰	Center points in axial	۰
بلوک‌های پایه	۱	آلفا	۱
فاکتوری دو سطحی	تمام فاکتورها	تکرارها	۱
نقاط مکعبی	۸	کل اجراها	۲۰
نقاط مرکزی در مکعب	۶	کل بلوک‌ها	۱

که در این رابطه‌ها  $m_t$  جرم کل ذره‌ها،  $m_p$  جرم تک ذره،  $N$  تعداد کل ذره‌ها در ۱۰۰ گرم ماده،  $m_s$  جرم مایع پوشش‌دهنده،  $W_i$  جرم به دست آمده از هر آزمایش،  $W_{op}$  جرم بهینه پوشش از لحاظ تجربی و مقدار تجربی خطا نیز، توسط معادله (۴) به دست می‌آید.

#### نتیجه‌های تجزیه پاسخ سطح

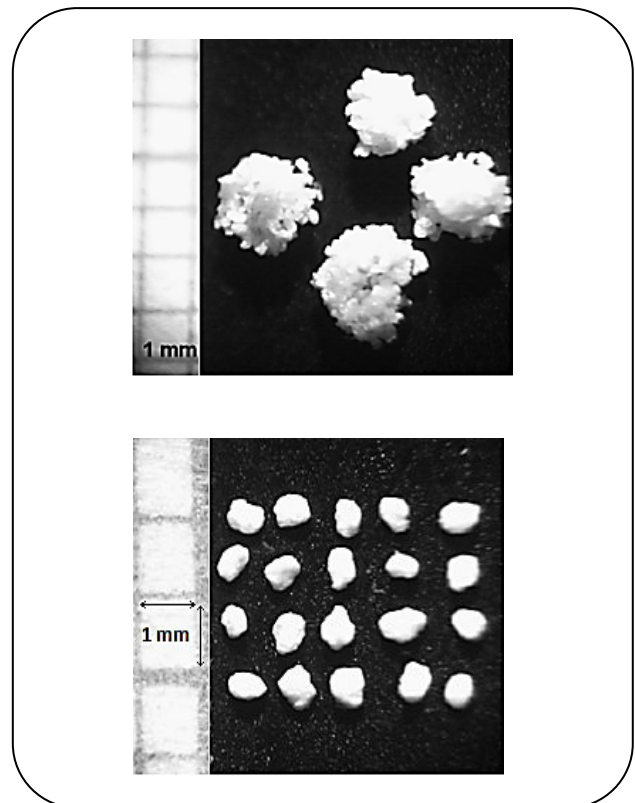
جرم پوشش در آزمایش‌های گوناگون، در شدت جریان‌های گوناگون از جریان مایع و هوا، توسط نرم افزار Minitab نسخه ۱۵ با روش پاسخ سطح، مورد بررسی و نتیجه‌های به دست آمده از آن، در جدول ۳ ارایه شده است.

مقدار بهینه پاسخ برای آزمایش‌های انجام شده به روش پاسخ سطح، به صورت زیر به دست آمد.

راه حل عمومی (کلی)

$$\begin{aligned} QA &= -1 \\ QL &= 1 \\ QF &= -1 \end{aligned}$$

بهترین مقدار یا مقدار بهینه برای پوشش ذره‌ها مقدار ۱۸/۶۱ گرم، برای هر ۱۰۰ گرم ذره پوشش داده شده است، که توسط نرم افزار، محاسبه شده است. از نظر تجربی نیز، مقدار بهینه جرم پوشش در آزمایش شماره ۳ در ستون پنجم در جدول ۲، معادل ۱۸/۴۵ گرم به دست آمده است، که نزدیک به حالت بهینه معین شده توسط نرم افزار است. همچنین نتیجه‌های آزمایش‌های ۷ و ۱۲ نیز به ترتیب با مقدارهای ۱۷/۸ و ۱۷/۵۴ گرم، مشخص شده در جدول ۲، به حالت بهینه به دست آمده توسط نرم افزار نزدیک می‌باشند. اما مقدار بهینه تجربی توسط معادله (۳) حدود ۲۱/۷۲ گرم به دست آمد و این مقدار تجربی، با مقدار بهینه تئوری توسط نرم افزار که حدود ۱۸/۶۱ گرم است، متفاوت می‌باشد. البته رسیدن به مقدار ۲۱/۷۲ گرم بسیار دشوار است.



شکل ۴- تصویری از قبل و بعد از فرایند گرانول‌سازی ذره‌های سدیم پرکربنات در بستر سیال.

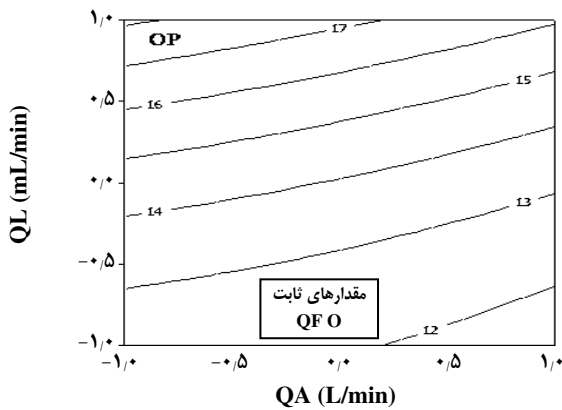
$$m_t = 100 \text{ g} \quad , \quad m_p = 2.91 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$N = \frac{m_t}{m_p} = 34365 \text{ Particles} \quad (1)$$

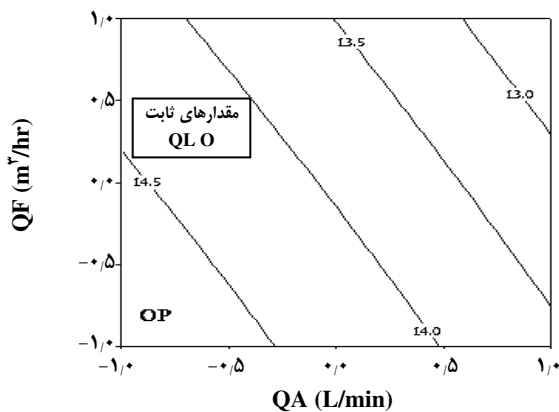
$$m_c = m_s - m_p = 6.32 \times 10^{-4} \text{ g} \quad (2)$$

$$W_{OP} = m_c \times N = 21.72 \text{ g} \quad (3)$$

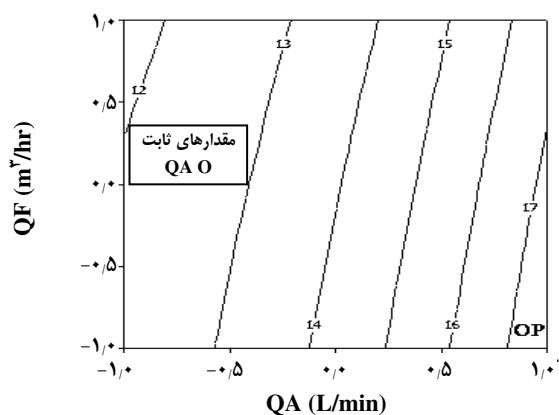
$$\Rightarrow \% \text{ Error} = \frac{|W_{OP} - W_i|}{W_{OP}} \times 100 \quad (4)$$



شکل ۵ - جرم پوشش (WC in grams) برحسب شدت جریان هوای افشان کننده (QA) و شدت جریان مایع (QL).



شکل ۶ - جرم پوشش (WC in grams) برحسب شدت جریان هوای افشان کننده (QA) و شدت جریان هوای سیال کننده (QF).



شکل ۷ - جرم پوشش (WC in grams) برحسب شدت جریان هوای سیال کننده (QF) و شدت جریان مایع (QL).

زیرا این مقدار بیشترین حالت پوشش دهی ممکن یک ذره یا ۱۰۰ درصد پوشش دهی کامل، یعنی بدون خطا می باشد، که در عمل امکان دستیابی به آن وجود ندارد.

این نتیجه‌ها می‌تواند، تصدیق کننده مقدار بهینه به دست آمده توسط تجزیه روش پاسخ سطح باشد. در شکل‌های ۵ تا ۷ نتیجه‌ها و تأثیر متغیرهای گوناگون به صورت نمودارهای غربالی نشان داده شده است. مقدارهای انتظار یک متغیر<sup>(۱)</sup>، یعنی تأثیر آن متغیر روی پوشش در نمودار مورد نظر، صفر است و تأثیری ندارد. مقدار OP نیز بهترین حالت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، با کاهش شدت جریان هوای افشان کننده و با افزایش شدت جریان مایع، مقدار جرم پوشش بیشتر می‌شود.

در شکل ۶ نیز مشخص است، که با کاهش مقدار شدت جریان هوای سیال کننده و شدت جریان هوای افشان کننده، مقدار جرم پوشش افزایش می‌یابد. یعنی با کاهش شدت جریان هوای شناوری، حرکت ذره‌ها در بستر کمتر شده و ذره‌های بیشتری پوشش می‌یابند. چون با افزایش مقدار شدت جریان هوای سیال کننده، ذره‌های بیشتر شناور می‌شوند و سریع‌تر حرکت می‌کنند و مایع کمتری به آنها می‌چسبد. همچنین افزایش میزان هوای افشان کننده، باعث کاهش مقدار مایع خروجی از سر نازل می‌شود و مقدار محلول کمتری روی ذره‌ها می‌ریزد.

بنابراین تأثیر شدت جریان مایع روی جرم پوشش مثبت و اثر شدت جریان هوا منفی است. البته افزایش زیاد شدت جریان مایع، اثر وارون دارد و باعث چسبندگی ذره‌ها می‌شود و فرآورده را خراب می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، با افزایش شدت جریان مایع و کاهش شدت جریان هوای شناورسازی ذره‌ها، مقدار جرم پوشش افزایش می‌یابد. بنابراین ناحیه بهینه در انتهای سمت راست نمودار، بخش پایینی می‌باشد. این ناحیه با علامت op مشخص شده است. تصویرهای سه بعدی از نمودارهای غربالی نتیجه‌ها در شکل‌های ۸ تا ۱۰، نشان داده شده است.

این نتیجه‌ها نیز طبق تجزیه پاسخ سطح و از لحاظ نظری قابل قبول است و همانند حالت دو بعدی است. بنابراین این نمودارها، تحلیل خوب و مناسبی از وضعیت عملیاتی پوشش دهی می‌دهد.

#### بررسی نتیجه‌های آزمایش‌ها با استفاده از تجزیه واریانس

تجزیه واریانس<sup>(۲)</sup> مکمل نتیجه‌های به دست آمده از بررسی‌های تجربی و مقدارهای به دست آمده در جدول‌ها و نمودارها می‌باشد.

(۱) Hold Values

(۲) Analysis of Variance (ANOVA)



در این حالت، سه پارامتر مهم P و F و T برای تجزیه تحلیل نتیجه‌های به دست آمده از ANOVA، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتیجه‌های به دست آمده از این تجزیه، در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است. علامت P نشان دهنده میزان اهمیت متغیر است. بنابراین در استفاده از تجزیه جدول ۴، باید به این موارد توجه شود:

- ۱- اگر  $0 \leq P \leq 0.01$  متغیر خیلی مهم است.
- ۲- اگر  $0.01 \leq P \leq 0.05$  متغیر مهم است.
- ۳- اگر  $0.05 \leq P \leq 0.1$  متغیر شاید مهم است.
- ۴- اگر  $P \leq 0.1$  متغیر بی اهمیت است.

هرچه مقدار متغیر T بیشتر باشد، تأثیر آن متغیر بیشتر است. مقدارهای منفی این عامل نشان دهنده اثر وارون بر مقدار پاسخ می‌باشد. بنابراین معادله نیمه تجربی (۵) از ستون مقدار ضریب‌های جدول ۴ با مقدار باقی مانده مربع خطا، حدود ۰.۹۸۵۵ به دست آمد. این مقدار خطا نشانگر دقت مطلوب معادله به دست آمده است. زیرا عددی نزدیک به یک است. پس نمودار نتیجه‌ها به نسبت دقیق است.

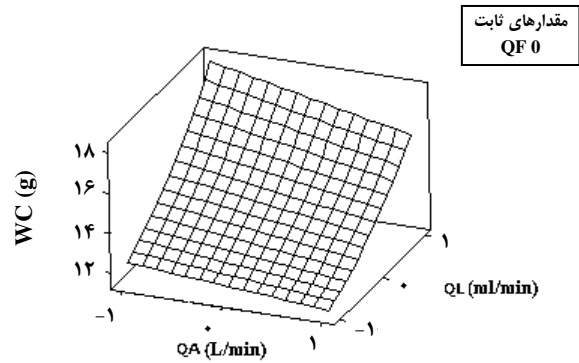
R-Sq = 98.55%

$$W_c = 13.93 - 0.71 Q_A + 2.56 Q_L - 0.41 Q_F - 0.08 Q_A^2 + 0.70 Q_L^2 - 0.03 Q_F^2 - 0.31 Q_A \times Q_L - 0.07 Q_A \times Q_F - 0.15 Q_L \times Q_F \quad (5)$$

که در معادله مورد نظر،  $Q_A$  شدت جریان هوای اتمایز کننده،  $Q_F$  شدت جریان هوای شناورسازی و  $Q_L$  دبی مایع یا محلول پوشش‌دهنده ذره‌ها می‌باشد. جدول ۵، تجزیه واریانس (ANOVA) را برای جرم پوشش نشان می‌دهد.

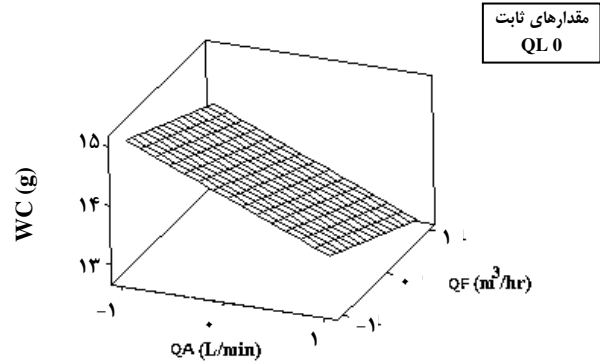
در جدول ۵، DF درجه آزادی سامانه و Seq SS توان مجموع مربعات یا  $R^2$  می‌باشد و Adj میانگین مربعات و ستون مقدار  $F^{(1)}$  نیز مجموع مربعات، تقسیم بر مقدار خطا است. با توجه به نتیجه‌های ستون مقدارها P می‌توان فهمید، که هر سه متغیر شدت جریان هوای شناورسازی ( $Q_F$ )، شدت جریان مایع ( $Q_L$ ) و شدت جریان هوای افشان کننده  $(Q_A)^{(2)}$ ، به تنهایی اهمیت زیادی در مقدار پاسخ دارند. ولی مقدار متغیر شدت جریان مایع در میزان پاسخ فرایند پوشش‌دهی تأثیر بیشتری دارد، زیرا در مقدار نتیجه‌های جدول در برهمکنش‌های میان این سه متغیر، جایی که مقدار متغیر شدت جریان مایع وجود دارد، مقدار P اهمیت بیشتری دارد. بنابراین شدت جریان مایع بر میزان پوشش روی ذره‌ها، تأثیر مستقیم دارد. ولی میزان شدت جریان هوا تأثیر عکس دارد و افزایش شدت جریان هوا، باعث کاهش میزان پوشش روی ذره‌ها می‌شود.

نمودار سطحی WC بر حسب QL,QA



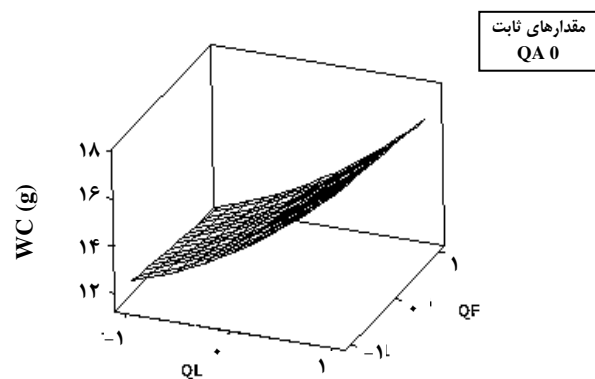
شکل ۸ - نمودار سه بعدی جرم پوشش (WC in grams) بر حسب دبی هوای افشان کننده و شدت جریان مایع.

نمودار سطحی WC بر حسب QF,QA



شکل ۹ - نمودار سه بعدی جرم پوشش (WC in grams) بر حسب دبی هوای افشان کننده و شدت جریان هوای شناورسازی.

نمودار سطحی WC بر حسب QF,QL



شکل ۱۰ - نمودار سه بعدی جرم پوشش (WC in grams) بر حسب شدت جریان هوای شناورسازی و شدت جریان مایع.

(۱) F Value

(۲) Atomization Air Flow rate

جدول ۴- برازش تخمینی از نتیجه‌های روش پاسخ سطح،  $W_C$  بر حسب متغیرهای  $Q_A$ ,  $Q_L$ ,  $Q_F$ .

نوع عبارت	ضریب	مجموع ضریب‌های خطا	T	P
نام متغیر	۱۳,۹۳۷۴	۰,۱۱۴۷	۱۲۱,۵۵۱	۰,۰۰۰
QA	-۰,۷۱۱۰	۰,۱۰۵۵	-۶,۷۴۱	۰,۰۰۰
QL	۲,۵۶۱۰	۰,۱۰۵۵	۲۴,۲۸۱	۰,۰۰۰
QF	-۰,۴۱۹۰	۰,۱۰۵۵	-۳,۹۷۳	۰,۰۰۳
QA*QA	-۰,۰۸۰۹	۰,۲۰۱۱	-۰,۴۰۲	۰,۶۹۶
QL*QL	۰,۷۰۹۱	۰,۲۰۱۱	۳,۵۲۶	۰,۰۰۵
QF*QF	-۰,۰۳۰۹	۰,۲۰۱۱	-۰,۱۵۴	۰,۸۸۱
QA*QL	-۰,۳۱۱۲	۰,۱۱۷۹	-۲,۶۳۹	۰,۰۲۵
QA*QF	-۰,۰۷۳۸	۰,۱۱۷۹	-۰,۶۲۵	۰,۵۴۶
QL*QF	-۰,۱۵۱۲	۰,۱۱۷۹	-۱,۲۸۳	۰,۲۲۹

جدول ۵ - تجربه واریانس برای جرم پوشش ( $W_C$ ).

منبع	درجه آزادی	مجموع متوالی مربعها	متوسط مجموع مربعها	میانگین متوسط مربعها	F	P
برازش	۹	۷۵,۴۹۰۴	۷۵,۴۹۰۴	۸,۳۸۷۸	۷۵,۴۰	۰,۰۰۰
خطی	۳	۷۲,۳۹۸۰	۲۳,۹۸۰	۲۴,۱۳۲۷	۱۶,۹۳	۰,۰۰۰
QA	۱	۵,۵۵۲	۵,۵۵۲	۵,۵۵۲	۴۵,۴۴	۰,۰۰۰
QL	۱	۶۵,۵۸۷۲	۶۵,۵۸۷۲	۶۵,۵۸۷۲	۵۸۹,۵۶	۰,۰۰۰
QF	۱	۱,۷۵۵۶	۱,۷۵۵۶	۱,۷۵۵۶	۱۵,۷۸	۰,۰۰۳
مربع	۳	۲,۰۹۰۸	۲,۰۹۰۸	۲,۰۹۰۸	۶,۲۶	۰,۰۱۲
QA*QA	۱	۰,۵۳۱۴	۰,۰۱۸۰	۰,۰۱۸۰	۰,۱۶	۰,۶۹۶
QL*QL	۱	۱,۵۵۶۸	۱,۳۸۲۷	۱,۳۸۲۷	۱۲,۴۳	۰,۰۰۵
QF*QF	۱	۰,۰۰۲۶	۰,۰۰۲۶	۰,۰۰۲۶	۰,۰۲	۰,۸۸۱
برهمکنش	3	۱,۰۰۱۵	۱,۰۰۱۵	۰,۳۳۳۸	۳,۰۰	۰,۰۸۲
QA*QL	۱	۰,۷۷۵۰	۰,۷۷۵۰	۰,۷۷۵۰	۶,۹۷	۰,۰۲۵
QA*QF	۱	۰,۰۴۳۵	۰,۰۴۳۵	۰,۰۴۳۵	۰,۳۹	۰,۵۴۶
QL*QF	۱	۰,۱۸۳۰	۰,۱۸۳۰	۰,۱۸۳۰	۱,۶۵	۰,۲۲۹
خطای باقیمانده	۱۰	۱,۱۱۲۵	۱,۱۱۲۵	۱,۱۱۲۵		
مقدار کل	۱۹	۷۶,۶۰۲۹				

بیشتر این متغیر نسبت به دو متغیر دیگر، یعنی شدت جریان هوای شناورسازی و شدت جریان هوای افشان کننده را نشان می‌دهد. در معادله (۵) نیز، مقدار ضریب  $Q_L$  برابر  $+۲,۵۶$  است. این مقدار، بیشتر از سایر ضریب‌ها، بر میزان پوشش و پاسخ تأثیر خواهد داشت. بنابراین مقدار  $F$  Value و  $R^2$  اهمیت مدل تجربی را نشان می‌دهند و درستی نتیجه‌های تجربی را به اثبات می‌رسانند زیرا نتیجه‌های به دست آمده

همچنین نتیجه‌ی تجزیه و تحلیل واریانس در ستون‌های مربوط به مجموع مربعات ( $R^2$ ) و  $F$  Value نیز با نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌ها و مدل (رابطه) تجربی و نمودارهای پوشش، تطبیق خوبی دارند. زیرا مقدار  $F$  مقابل شدت جریان مایع برابر  $۵۸۹,۵۶$  است، که این مقدار از سایر مقدارهای  $F$  بیشتر است. مقدار  $R^2$  نیز برای شدت جریان مایع برابر  $۶۵,۵۸$  می‌باشد، که تأثیر

جدول ۶ - متغیرهای مؤثر در فرایند پوشش‌دهی ذره‌ها در بستر سیال.

سیال	شدت جریان هوای شناورسازی نوع و ابعاد بستر چگالی و اندازه ذره‌های درون بستر
افشان کردن یا اسپری کردن	مکان قرار گرفتن نازل نوع طراحی نازل شدت جریان هوای افشان کننده (در صورت استفاده از نازل نیوماتیک) شدت جریان ماده پوشش دهنده چگالی، گرانش و کشش سطحی محلول پوشش دهنده
خشک کردن	دمای هوای ورودی شدت جریان هوای خشک کننده رطوبت نسبی هوای خروجی

۳- آزمایش پاشش اسپری: هر چه نازل مورد استفاده بهینه تر باشد، اسپری تولیدی از محلول مایع مناسب تر است. محل قرارگیری مناسب نازل در بستر به پوشش دهی بهتر کمک می کند.

۴- آزمایش های پوشش دهی: در این آزمایش ها که توسط روش پاسخ سطح طرح شده بود، اثر سه پارامتر مهم، یعنی شدت جریان هوای افشان کننده، شدت جریان مایع و شدت جریان هوای شناور کننده ذره‌ها، بررسی شد. پس از بررسی های به عمل آمده مشخص شد که، جرم پوشش دور ذره‌ها با شدت جریان مایع، نسبت مستقیم و با شدت جریان هوای افشان کننده و شناور کننده ذره‌ها، نسبت عکس دارد. کلوخه شدن تعدادی از ذره‌ها در کف بستر، باعث ایجاد خطا و توزیع نامناسب ذره‌ها شد. بنابراین از میانگین ذره‌های پوشش داده شده استفاده شد. دلیل استفاده از دمنده هوا در زیر بستر، با توجه به بررسی مقاله‌ها، افت فشار زیاد در مخزن کمپرسور بود. این دمنده به افزایش شدت جریان هوای شناور سازی کمک کرد. همچنین دمنده شدت جریان هوای پایدار و ثابتی را تأمین می کند. برای تنظیم شدت جریان هوای شناور کننده، از یک توزیع کننده هوای مشبک قیفی شکل<sup>(۱)</sup>، در کف بستر به دلیل توزیع یکنواخت شدت جریان هوای شناور کننده استفاده شد. برتری این پژوهش نسبت به کارهای تجربی انجام شده در گذشته، مرور کلی عامل‌ها و موردهای مهم در فرایند پوشش دهی و ارایه روابط و راه حل‌های ابتکاری، برای رفع مشکل‌های گوناگون در روند انجام آزمایش‌ها می‌باشد. همچنین گزارش نقص‌ها و مشکل‌های دستگاه و تشریح موردهای گوناگون در جهت بهینه کردن فرایند پوشش دهی در بستر سیال، جزء نقاط قوت این پژوهش است.

در نمودارهای پوشش نیز، تأیید کننده میزان تأثیر بیشتر شدت جریان مایع می‌باشد.

#### پارامترهای کنترل کننده در فرایند پوشش دهی ذره‌ها در بستر سیال

پارامترها و عامل‌های گوناگون بسیاری، در فرایند پوشش دهی ذره‌ها در بستر سیال مؤثر می‌باشند. به طور کلی سه عامل مهم زیر در تولید فراورده دلخواه، مؤثر می‌باشند.

- ۱- قطر روزنه نازل.
  - ۲- فشار هوای افشان کننده و گرانش مایع پوشش دهنده.
  - ۳- دمای هوای شناور کننده و خشک کننده ذره‌ها در بستر سیال.
- در جدول ۶ برخی از متغیرهای مهم و مؤثر در فرایند پوشش دهی در بستر سیال، آورده شده است.

#### نتیجه گیری

نتیجه‌های به دست آمده از اثر متغیرهایی چون دما، ارتفاع شناورسازی و پاشش اسپری به شرح زیر می باشد.

- ۱- آزمایش دما: روند دما در طول بستر از پایین به بالا، کاهش می یابد و با افزایش دما و شدت جریان هوای گرم، سرعت خشک شدن ذره‌ها پوشش داده شده بیشتر می شود.
- ۲- آزمایش شناورسازی: در این آزمایش تأثیر شدت جریان هوای سیال کننده ذره‌ها با زمان و ارتفاع شناوری در بستر، بررسی شد. در زمان‌هایی که شدت جریان هوا افزایش می‌یافت، ارتفاع شناورسازی ذره‌ها در بستر بیشتر می‌شد و با کاهش مقطعی شدت جریان، ذره‌ها در اثر نیروی جاذبه، با سرعت حد یکسان، به پایین سقوط می‌کنند.

(۱) Perforated conical air distributor

**قدردانی**

$W_{op}$	جرم بهینه پوشش
%	درصد
mt	جرم کل
N	تعداد ذرات
P	ضریب روش پاسخ سطح
QA	شدت جریان هوای افشان کننده
QF	شدت جریان هوای شناورسازی
cm	سانتیمتر
g	گرم
F	مقدار فاکتور پاسخ سطح
mp	جرم یک ذره
ms	جرم قطره

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی (با عنوان مطالعه تجربی کپسوله کردن سدیم پرکربنات با سدیم سیلیکات به روش پاششی) و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام شده است. همچنین از همکاری گروه پژوهشی فرایند و فرآوری مواد فلزی جهاد دانشگاهی دانشکده فنی دانشگاه تهران، و نیز از آقایان مهندس مسعود کمبرانی، مهندس افشاری و آقای یاعلی و دیگر اعضای محترم گروه پژوهشی فرآوری مواد فلزی جهاد دانشگاهی واحد تهران، که در ساخت و راه اندازی این سامانه، کمال همکاری را داشتند، تشکر و قدردانی می شود.

**فهرست نمادها**

$Q_L$	شدت جریان مایع
$W_C$	جرم پوشش
$W_i$	جرم اولیه ذره

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۶

**مراجع**

- [۱] عبدالکریمی، وحید؛ مدلسازی CFD جریان سه فازی گاز، ذرات جامد و قطرات مایع داخل بستر سیال، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان، اردیبهشت (۱۳۸۸).
- [۲] علوی، سید مهدی (مترجم)؛ حمیدی، علی اصغر (مترجم)، مهندسی سیال سازی، چاپ اول، دانشگاه علم و صنعت، ایران، (۱۳۷۹).
- [۳] جعفری، روزبه؛ ستوده قره باغ، رحمت؛ مستوفی، نوید؛ "شبیه سازی دو فازی راکتورهای بستر سیال شده گاز-جامد با مدل تانک های سری"، دانشگاه تهران، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID.ir)، (۱۳۸۸).
- [۴] سمنانی رهبر، مجتبی؛ علی زاده داخل، اصغر؛ "پیش بینی افت فشار خشک کن بستر سیال سدیم پرپورات با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، تهران، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده علوم و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID.ir)، (۱۳۸۸).
- [۵] میراولیایی، علیرضا؛ شهرکی، فرهاد؛ آتشی، حسین؛ میرضایی، علی اکبر؛ "بررسی اثر دیوار روی هیدرودینامیک راکتور بستر ثابت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، سومین کنفرانس ملی کاربرد CFD در صنایع شیمیایی، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۰).
- [۶] رسولی، سعید؛ گلریز، محمدرضا؛ حمیدی، علی اصغر؛ مدل سازی ضریب انتقال حرارت تابشی در بستر سیال گردشی، نشریه مهندسی شیمی ایران، (۳) ۲۵، ص. ۹ (۱۳۸۵).

- [۷] سید حسین حسینی، رهبر رحیمی، مرتضی زیودار و عبدالرضا صمیمی، "شبیه سازی ناپایای بستر سیال شده حبابی حاوی ذرات نوع B با استفاده از CFD"، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID.ir)، (۱۳۸۹).
- [8] Hede P.D., Jensen A.D., Bach P., Small-Scale Top-Spray Fluidized Bed Coating: Granule Impact Strength Agglomeration Tendency and Coating Layer Morphology, *Powder Technology*, **176**, p. 156 (2007).
- [9] Maronga S.J., Wnukowski P., "The use of Humidity and Temperature Profiles in Optimizing the Size of Fluidized Bed in a Coating process", Department of Chemical Engineering and Technology, Sweden, (1998).
- [10] Yi-Ming Sun, Chih-Cheng Chang, Wei-Fung Huang, Huang-Chien Liang, "Fluidized-bed Spray Coated Porous Hydrogel Beads for Sustained Release of Diclofenac Sodium", Department of Chemical Engineering, Yuan-Ze Institute of Technology, Chung-Li, Taoyuan 320, Taiwan, (1997).
- [11] Eiichi Abe, Noriyuki Yamada, Hideharu Hirose, Hiroyuki Nakamura, "Coating Mass Distributions of Seed Particles in a Tumbling Fluidized Bed Coater", Kyushu National Industrial Research Institute, Japan, (1997).
- [12] R.L.G. da Cunha, M.M.C. Pereira, S.C.S. Rocha, "Conventional and Modified Fluidized Bed: Comparison of the Fluid Dynamics and Application in Particle Granulation", School of Chemical Engineering, State University of Campinas-UNICAMP, P.O. Box 6066, Zip Code 13083-970, Campinas, SP, Brazil, (2009).
- [13] S. Rodríguez-Rojo, N. López-Valdezate, M.J. Cocero, "Residence Time Distribution Studies of High Pressure Fluidized Bed of Micro particles", Department of Chemical Engineering and Environmental Technology, University of Valladolid, Spain, (2007).
- [14] Cedric Briens, Matthew Dawe, Franco Berruti, "Effect of a Draft tube on Gas-Liquid Jet Boundaries in a Gas-Solid Fluidized Bed" Institute for Chemicals and Fuels from Alternative Resources Engineering, The University of Western Ontario, London, (2009).
- [15] Koen Dewettinck and André Huyghebaert, "Top-Spray Fluidized Bed Coating: Effect of Process Variables on Coating Efficiency", University of Ghent, Faculty of Agricultural & Applied Biological Sciences, Department of Food Technology and Nutrition, Coupure Links, Belgium, (1998).
- [16] Fenghui Niu, John Haslam, Roger Rajewski, Bala Subramaniam, A Fluidized-Bed Coating Technology Using near-Critical Carbon Dioxide as Fluidizing and Drying Medium, *J. of Supercritical Fluids*, **66**, p. 315 (2012).
- [17] Lennart Fries, Sergiy Antonyuk, Stefan Heinrich, Stefan Palzer, DEM-CFD Modeling of A Fluidized Bed Spray Granulator, Engineering Conferences International Year (2011).
- [18] Jitendra Chauhan and Poonam Yadav, "Study of Scale up Parameters of Fluidized Bed Coating, Institute of Pharmaceutical Science & Technology, *Der Pharmacia Sinica Mag*, **2** (1), p. 228 (2011).

- [19] Gorkem Kulah, Omer Kaya, "Investigation and Scale-up of Hot-melt Coating of Pharmaceuticals in Fluidized Beds", Middle East Technical University, Department of Chemical Engineering, Ankara, Turkey (2011).
- [20] Arkom Palamanit, Somchart Soponronnarit, Somkiat Prachayawarakorn, Patcharee Tuntrakul, "Effects of Inlet Air Temperature and Spray Rate of Coating Solution on Quality Attributes of Turmeric Extract Coated Rice Using Top-Spray Fluidized Bed Coating Technique", School of Energy, Environment and Materials, University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkhru, Bangkok, Thailand, (2013).
- [21] Fenghui Niu, John Haslam, Roger Rajewski, Bala Subramaniam, "A Fluidized-Bed Coating Technology Using Near-Critical Carbon Dioxide as Fluidizing and Drying Medium", University of Kansas, Lawrence, KS, United States, (2012).
- [22] Guanda Wang, Ling Yang, Rui Lan, Tingjie Wang, Yong Jin, "Granulation by Spray Coating Aqueous Solution of Ammonium Sulfate to Produce Large Spherical Granules in a Fluidized Bed", Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, (2013).
- [23] Mike Vanderroost, Frederik Ronsse, Koen Dewettinck, Jan G. Pieters, "Modeling Overall Particle Motion in Fluidized Beds for Top-Spray Coating processes", Ghent University, Ghent, Belgium, (2013).