

مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی CFD انتقال حرارت راکتور پرشده تحت تأثیر دیواره: اثر شکل دانه کاتالیستی و حالت قرارگیری آن بر تشکیل نقاط داغ با استفاده از روش تاگوچی

مهدی زارع^۱، سید حسن هاشم‌آبادی^{۱*}

^۱ آزمایشگاه دینامیک سیالات محاسباتی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

چکیده

در مطالعه حاضر انتقال حرارت تک‌دانه کاتالیستی (استوانه‌ای، استوانه‌ای شیاردار و سه‌پر) به ترتیب با نسبت قطر بستر به قطر دانه (N) ۴/۵، ۵/۱، ۶/۷ در مجاورت دیواره بستر به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه شد. در قسمت عددی به منظور حل معادلات مومنتوم، پیوستگی و انرژی از روش اجزای محدود (FEM) استفاده گردید. به منظور اعتبارسنجی روش عددی از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج نشان داد که سه ناحیه مهم در اطراف دانه وجود دارند: ناحیه سرعت‌پایین در مجاورت دانه، فضای بین دانه و دیواره و فضای پشت دانه. با کاهش فاصله دانه-دیواره تأثیر دیواره بر میزان انتقال حرارت بررسی شد. نتایج نشان داد که دانه استوانه‌ای و استوانه‌ای شیاردار برای $yc/Dp \leq 0.143$ ایجاد نقطه داغ می‌کنند و زوایای $\theta_z = 90^\circ$ و $\theta_a = 60^\circ$ بیش‌ترین احتمال ایجاد نقاط داغ را دارند. در نهایت با استفاده از روش تاگوچی به بررسی حالت قرارگیری بهینه دانه در مجاورت دیواره پرداخته شد.

کلمات کلیدی: دانه استوانه‌ای، استوانه‌ای شیاردار، سه‌پر، انتقال حرارت، بستر پرشده، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، تأثیر دیواره، نقطه داغ، تاگوچی.

مقدمه

بسترهای پرشده با شکل‌های متفاوت از دانه‌ها به‌وفور در صنایع برای فرایندهای مختلف شیمیایی (بخصوص برای واکنش‌هایی که در سطح دانه‌ها انجام می‌شوند) به کار می‌روند. راکتورهای با گرمای واکنش بالا، مانند واکنش‌های ریفرمینگ متان^۱ در حالت کلی رفتاری غیرخطی و نامتقارن دارند و باعث ایجاد نقاط داغ^۲ می‌شوند [۴-۱]. در دو دهه اخیر با پیشرفت صنعت سخت‌افزار، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی (از جمله CFD) به‌منظور پیش‌بینی دقیق جریان در بسترهای پرشده^۳ گسترش زیادی یافت. یکی از اولین مطالعات انجام‌شده در راکتورهای بستر پرشده شبیه‌سازی جریان خزشی در یک چیدمان^۴ تایی ساده کروی توسط سورنسن و استوارت است [۵]. در ادامه شبیه‌سازی دوبعدی انتقال حرارت بر روی یک‌دانه [۶]، دو دانه نزدیک دیواره [۷] و چندین دانه در یک بستر [۱۰-۸] بررسی گردیدند. دیکسون به بررسی عددی بستری پرشده از ذرات کروی با $N=2-4$ پرداخت و تأیید کرد که روش CFD توانایی پیش‌بینی بسترهای پرشده با N کوچک را دارد. در ادامه کارهای زیادی با استفاده از CFD به‌منظور مطالعه پدیده‌های انتقال انجام شد [۱۱-۱۳]. در این مطالعات از فن‌های مختلف جهت ساخت بستر استفاده گردید [۱۵و۱۴] و پارامترهای مهمی از جمله تأثیر دیواره [۱۶و۱۷] نسبت قطر بستر به قطر دانه [۸و۱۸]، نقاط تماس بین دانه‌ها [۸و۱۹] و شکل دانه‌های کاتالیستی [۲۰و۲۱] مطالعه شد. مطالعاتی نیز به بررسی رفتار تک‌دانه کاتالیستی درون راکتور و تعمیم آن به راکتور کامل پرداختند [۲۲و۸].

دیکسون و نایجم‌آیلند به بررسی هیدرودینامیک و انتقال حرارت بستر پرشده با دانه‌های کروی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند و توزیع دما و سرعت را تحلیل نمودند [۲۰، ۲۳، ۲۴]. نتایج آن‌ها نشان داد که در نقطه تماس دانه و دیواره بستر به دلیل سرعت کم سیال، مکانیسم انتقال حرارت از نوع هدایت^۴ است [۲۳]. آن‌ها در ادامه به بررسی آزمایشگاهی و عددی انتقال حرارت در لوله‌های ریفرمر متان پرداختند و نشان دادند که استفاده از دانه‌های حفره‌دار نرخ انتقال حرارت را بهبود داده و طول عمر لوله‌های راکتور را افزایش می‌دهد [۲۰]. هاشم‌آبادی و همکاران به شبیه‌سازی انتقال حرارت دانه-سیال در بستر پرشده با دانه‌های نفتالینی پرداختند [۲۷-۲۵] و از ناسلت به‌دست‌آمده از آنالوژی جرم و حرارت جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن تأثیر دیواره رابطه‌ای جهت انتقال حرارت دانه استوانه‌ای [۲۸] و چندپر [۲۹] ارائه دادند.

یکی از پدیده‌های مهم که باید در بسترهای پرشده در نظر گرفته شود انتقال حرارت داخل راکتور است مخصوصاً برای واکنش‌های با گرمای واکنش شدید. در صورت عدم انتقال حرارت مناسب، نقاط داغ در سطح دانه‌ها و دیواره بستر تشکیل شده و باعث کاهش طول عمر دیواره می‌شوند. یکی از قانون‌های سرانگشتی در راکتورهای SMR نشان می‌دهد که اگر دمای دیواره ۲۱ درجه بالاتر از حالت نرمال باشد، عمر لوله‌های راکتور ۵۰٪ کاهش پیدا می‌کند. با در نظر گرفتن زمان تعویض لوله‌ها، تعویض کامل لوله‌های راکتور (۳۰۰-۴۰۰ لوله) هزینه‌ای بین ۵-۸ میلیون دلار دارد [۳۰]. همچنین به‌واسطه این تخریب امکان نشت واکنش‌دهنده‌ها از راکتور و ایجاد انفجار وجود دارد. نواحی

- 1- Steam Methane Reforming
- 2- Hot Spots
- 3- Packed Beds
- 4- Conduction

داغ می‌تواند در راکتورهای پرشده به دلایلی از قبیل فعالیت ناقص ذرات کاتالیستی [۳۱] و یا انسداد موضعی جریان سیال به واسطه شکل ذرات [۳۲] و غیره اتفاق بیافتد.

ایجاد نقاط داغ در فرایندهای کاتالیستی عمدتاً به دو دلیل فعالیت غیریکنواخت^۵ کاتالیست‌ها و یا سرعت پایین جریان واکنشی ایجاد می‌شود [۹، ۳۳-۳۵]. اولین بار بیلوس و آموندسون به بررسی حساسیت‌های موجود در راکتورهای لوله‌ای پرداختند [۳۶]. در صنعت به منظور جلوگیری از ایجاد نقاط داغ و یا غیرفعال شدن سریع دانه‌های کاتالیستی از راکتورهای پرشده چند لوله‌ای^۶ با سیستم خنک‌کاری خارجی و یا راکتورهای دوغابی^۷ استفاده می‌شود [۳۷]. گلزاده و همکاران [۳۸] به بررسی اثر فشار و دمای خوراک بر تشکیل نقاط داغ در راکتور پرشده با استفاده از شبیه‌سازی CFD دوبعدی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در فرایند فیشر تروپس^۸ به دلیل نرخ بالای واکنش در ابتدای راکتور، نقاط داغ بیش‌تری در این ناحیه تشکیل می‌شوند. همچنین نشان دادند که افزایش دمای خوراک نرخ واکنش را بالا برده و نقاط داغ بیش‌تری تشکیل می‌شود. دما و فشار مناسب برای واکنش فیشر تروپس به ترتیب ۵۶۵ کلوین و ۲۱ بار است. بندجائوه‌دو و همکاران [۳۹] سعی بر کاهش نقاط داغ با استفاده از دبی حجمی گاز ورودی در چهار راکتور پرشده سری نمودند. آن‌ها نشان دادند که نقاط داغ ایجاد شده وابستگی زیادی به دمای گاز ورودی دارند و فشار کل و غلظت مواد ورودی روی آن‌ها تأثیر چندانی ندارند. مطالعات زیادی به بررسی نقاط داغ موضعی در یک راکتور پرشده پرداخته‌اند. بارکلو و گامهیر [۴۰] دانه‌های کاتالیستی ذوب‌شده را در یک راکتور بستر قطره‌ای^۹ HDS بررسی کرد. ویک و اونکن [۴۱ و ۴۲] با بررسی یک موقعیت شعاعی در سطح مقطع راکتور بستر پرشده دماهای متفاوتی را مشاهده کردند و نشان دادند که شرایط تقارن زاویه‌ای در این بسترها وجود ندارد. بورسکو و همکاران [۴۳] و ماتروس [۳۱] به بررسی نواحی داغ ایجاد شده در بستر پرشده طی فرایند اکسیداسیون جزئی ایزوبوتیل الکل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دلیل ایجاد نواحی داغ توزیع غیریکنواخت کاتالیست‌ها است.

همان‌طور که در بالا توضیح داده شد ایجاد نواحی داغ در نزدیکی دیواره باعث کاهش مقاومت مکانیکی دیواره شده و علاوه بر بار مالی، امکان نشستی و انفجار را نیز دارد؛ بنابراین ایجاد این نواحی داغ از موضوعات مهم مطالعاتی و همچنین عملی است. با توجه به مطالعات انجام شده کاری در زمینه بررسی شکل دانه بر ایجاد نقاط داغ در بستر انجام نشده است. این در حالی است که به دلیل وجود نواحی محدب و مقعر در دانه‌ها، نحوه قرارگیری آن‌ها در مجاورت دیواره پارامتر مهمی است. در این مطالعه به بررسی تأثیر شکل و نحوه قرارگیری دانه بر سرعت جریان بین دیواره بستر-دانه که یکی از عوامل ایجاد نقاط داغ است پرداخته شده است. نرم‌افزار تجاری کامسول برای حل معادلات حاکم استفاده شد و اثر زاویه قرارگیری دانه با استفاده از روش تاگوچی بر نواحی داغ بررسی گردید. موارد مطرح شده در این مطالعه به منظور درک بهتر انتقال حرارت و شرایط نقاط داغ در راکتورهای بستر پرشده مفید می‌باشند.

5- Non-Uniform

6- Multitubular Fixed Bed

7- Slurry Bubble Column

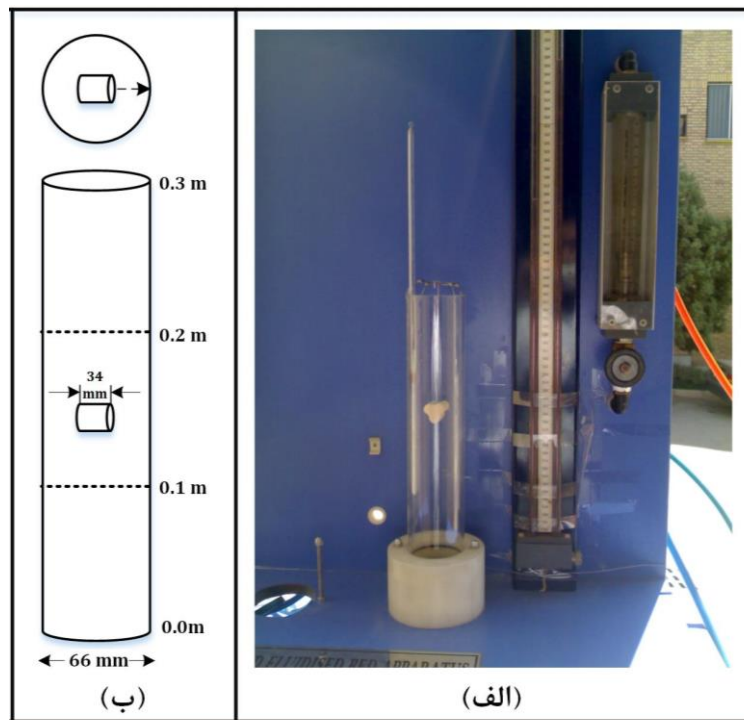
8- Fisher Trop

9- Hydro-Desulfurization Trickle-Bed Reactor

۲- مطالعه آزمایشگاهی و مدل سازی

۱-۲- روش آزمایشگاهی و آنالوژی چیلتون-کلبرن

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی از داده های حاصل از کار آزمایشگاهی استفاده شد. شکل ۱ شماتیک دستگاه آزمایشگاهی و دانه های مطالعه شده را نشان می دهد. بستر از لوله ای شیشه ای به قطر ۶۶ میلی متر تشکیل شده که یک دانه کاتالیستی به صورت محوری در وسط آن قرار گرفته است. جریان هوای فشرده پس از عبور از توزیع کننده، از روی دانه عبور کرده و باعث تصعید نفتالین می گردد. جریان های بررسی شده در این کار ۶، ۸ و ۱۰ مترمکعب بر ساعت می باشند که از طریق روتامتر موجود اندازه گیری شدند.



شکل ۱. شماتیک دستگاه آزمایشگاهی.

دانه های مطالعه شده در کار آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. دانه ها با استفاده از نمک و چسب مخصوصی ساخته شدند و سپس با استفاده از روش غوطه وری در نفتالین مذاب لایه ای از نفتالین به ضخامت ۲ میلی متر روی آن ها ایجاد گردید. با قرار دادن این دانه ها به مدت ۳۰ دقیقه در جریان هوا، مقدار انتقال جرم از طریق تصعید نفتالین محاسبه شد و با استفاده از آنالوژی جرم و حرارت عدد ناسلت معادل محاسبه شد. بدین منظور محاسبه عدد شروع آزمایشگاهی [۲۶] با استفاده از مقدار انتقال جرم به دست آمده از آزمایش محاسبه گردید و در نهایت ناسلت آزمایشگاهی از معادله ۱ به دست آمد.

$$Nu = sh \times \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (1)$$

که n ثابتی است که از نتایج آزمایشگاهی محاسبه شده است و مقدار آن بین $1/3 - 1/4$ است. در این مطالعه از روش چیلتون-کلبرن^{۱۰} استفاده شد که بر اساس آن مقدار n برابر با $1/3$ است. یکی از پارامترهای مهم در بسترهای پر شده

میزان تأثیرپذیری بستر از دیواره آن است که با پارامتر N نشان داده می‌شود (معادله ۲). با توجه به اینکه دانه‌ها غیر کروی می‌باشند از قطر معادل کروی (معادله ۳) در این محاسبات استفاده شد [۴۴].

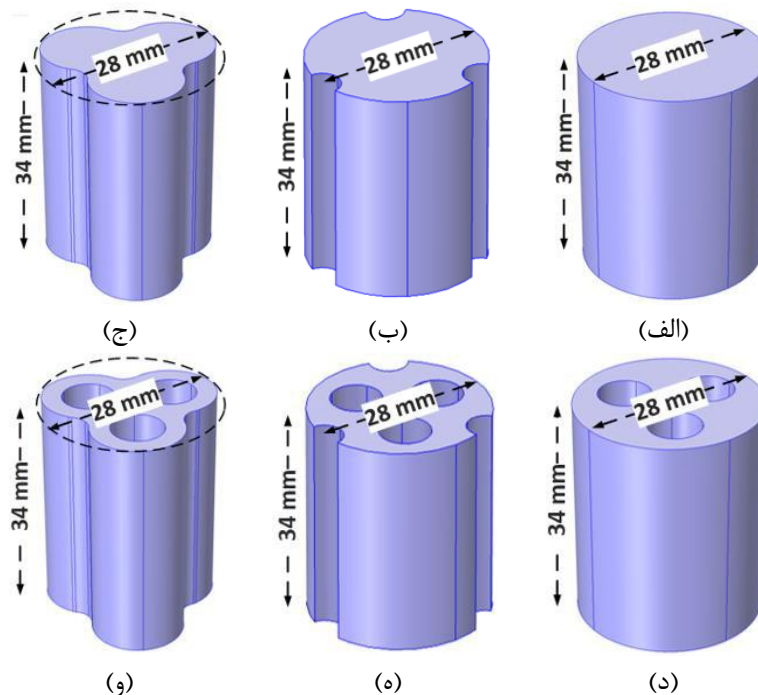
$$N = \frac{D_b}{d_p} \quad (۲)$$

$$d_p = \frac{6V_p}{A_p} \quad (۳)$$

۲-۲-۲- روش عددی

۱-۲-۲- شبیه‌سازی CFD

بسترهای پر شده به دلیل هزینه پایین، زمان ساخت پایین و انعطاف‌پذیری خوب در اندازه‌گیری پارامترهای متنوع در صنعت استفاده زیادی دارند. به‌منظور بررسی با دقت بالا، هندسه مسئله به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار کامسول ساخته شد. نرم‌افزار کامسول بر اساس روش اجزاء محدود می‌تواند مسائل مختلف مهندسی را حل کند. جهت شبیه‌سازی از یک عدد کامپیوتر با سی پی یو ۷ هسته و ۲۰ گیگابایت رم استفاده شد. دانه‌های مطالعه شده و ابعاد آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این مقاله جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی از داده‌های آزمایشگاهی دانه‌های توپر (شکل ۲الف، ۲ب، ۲ج) استفاده گردید. پس از اطمینان از صحت روش شبیه‌سازی، مطالعه بر روی دانه‌های توپر و حفره‌دار (شکل ۲الف-۲و) با استفاده از شبیه‌سازی بسط داده شد.



شکل ۲- دانه‌های کاتالیستی الف) استوانه‌ای، ب) استوانه‌ای شیاردار، ج) سه پر، د) استوانه‌ای حفره‌دار، ه) استوانه‌ای شیاردار حفره‌دار و و) سه پر حفره‌دار

۲-۲-۲- معادلات حاکم

در این مطالعه معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای سیال غیرقابل تراکم در یک لوله به‌صورت هم‌زمان حل شدند [۲۷].

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (۴)$$

$$\nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_{t'}) (\nabla U + \nabla U^{\dagger})] \quad (۵)$$

$$\nabla \cdot (\rho C_p U T) = \nabla \cdot [(k + k_{t'}) \nabla T] + S_h \quad (۶)$$

که در آن S_h ترم چاه/منبع حرارت، $\mu_{t'}$ ویسکوزیته متلاطم و $k_{t'}$ بیانگر هدایت حرارتی متلاطم^{۱۱} هستند. به منظور حل معادلات از روش $\kappa-\varepsilon$ استفاده گردید. مدل تلاطم $\kappa-\varepsilon$ از دو بخش انرژی جنبشی متلاطم^{۱۲}

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U \cdot \nabla \kappa = \nabla \cdot \left\{ \left(\nu + \frac{C_{\mu} \kappa^2}{\sigma_{\kappa} \varepsilon} \right) \nabla \kappa \right\} + C_{\mu} \frac{\kappa^2}{\varepsilon} (\nabla U + \nabla U^{\dagger})^2 - \varepsilon \quad (۷)$$

و پراکندگی متلاطم^{۱۳}

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left\{ \left(\nu + \frac{C_{\mu} \kappa^2}{\sigma_{\varepsilon} \varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + C_{\mu} \kappa (\nabla U + \nabla U^{\dagger})^2 - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (۸)$$

تشکیل شده است که در آن ها κ انرژی جنبشی متلاطم، ε پراکندگی متلاطم، ν ویسکوزیته سینماتیکی، ∇U^{\dagger} ترانهاده گرادیان سرعت و C_{μ} ، σ_{κ} ، σ_{ε} ، $C_{\varepsilon 2}$ ثوابت تجربی هستند [۲۵]. در روش عددی ضریب انتقال حرارت از معادله ۱ محاسبه شد. ناسلت میانگین برای هر دانه از انتگرال گیری معادله ۱۱ در سطح آن محاسبه گردید [۲۷].

$$h = \frac{k}{T_s - T_b} \left(\frac{\partial T}{\partial \eta} \right)_s \quad (۹)$$

$$\overline{Nu} = \frac{hd_p}{k} = \frac{d_p}{T_s - T_b} \left(\frac{\partial T}{\partial \eta} \right)_s \quad (۱۰)$$

که η بیانگر بعد عمود بر سطح دانه است. مهم ترین پارامتری که دقت محاسبه ناسلت را تضمین می کند کیفیت مش در اطراف دانه به دلیل تأثیر آن بر گرادیان دما است. کیفیت مش وابسته است به y^+ که در بخش ۳-۱ شرح داده شده است.

۲-۲-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی استفاده شده در مسئله در جدول ۱ آمده است. به منظور کاهش تغییرات ترموفیزیکی سیال، دمای سطح دانه ۱۱ درجه سانتی گراد گرم تر از سیال ورودی در نظر گرفته شد. ثابت در نظر گرفتن خواص سیال حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را به صورت مجزا ممکن می سازد. شرط مرزی عدم لغزش^{۱۴} در دیواره ها در نظر گرفته شد و به منظور محاسبه رفتار سیال در مجاورت دیواره^{۱۵} از تابع دیواره استفاده گردید. در این مطالعه غلظت نفتالین در سطح دانه ها ثابت و برابر با غلظت اشباع فرض شد [۲۸ و ۲۹]. مطابق با آنالوژی جرم و حرارت، دمای سطح دانه ثابت در معادله انرژی با غلظت ثابت در انتقال جرم معادل است [۲۵، ۲۹]. همچنین

11- Turbulent Thermal Conductivity

12- Turbulent Kinetic Energy

13- Turbulence Dissipation Rate

14- No-Slip Boundary Condition

15- Wall Function

به دلیل بالا بودن زمان آزمایش (هر آزمون ۳۰ دقیقه) می‌توان فرض کرد که شرایط آزمون‌ها پایا بوده است؛ بنابراین معادلات ۴-۸ در حالت پایا حل شدند.

جدول ۱. شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی

مقدار	واحد	نوع شرط مرزی	مرز	معادلات
۰	m/s	عدم لغزش	دیواره بستر	هیدرودینامیک
۰	m/s	عدم لغزش	دیواره دانه	
۱۰، ۸، ۶	m ³ /s	دبی ورودی	ورودی بستر	
۰	Pa	فشار خروجی	خروجی بستر	
---	[]	عایق دما	دیواره بستر	انرژی
۳۲۰	K	دمای ثابت	سطح دانه	
۳۰۰	K	دمای ثابت	ورودی بستر	
---	[]	شار همرفتی	خروجی بستر	

۲-۲-۴- طراحی آزمایش با روش تاگوچی

روش تاگوچی به منظور کاهش هزینه محاسباتی در مطالعه رفتار تک‌دانه کاتالیستی در مجاورت دیواره استفاده شد. مهم‌ترین بخش در طراحی آزمایش انتخاب پارامترهای تأثیرگذار است و هرچقدر پارامترهای تأثیرگذار بیش‌تری در نظر گرفته شوند دقت نتایج بهتر خواهد شد. به منظور یافتن دانه و زاویه قرارگیری دانه با بهترین میزان انتقال حرارت از تاگوچی ۲۵L (۴ فاکتور با ۵ سطح) استفاده شد. پارامترها به همراه سطوح استفاده‌شده در طراحی آزمایش در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. فاکتورها و سطوح انتخاب‌شده در طراحی آزمایش

فاکتور کنترلی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
زاویه چرخش حول محور x (θ_x)	۰،۰	۲۲،۵	۴۵،۰	۶۷،۵	۹۰،۰
زاویه چرخش حول محور y (θ_y)	۰،۰	۴۵،۰	۹۰،۰	۱۳۵،۰	۱۸۰،۰
زاویه چرخش حول محور z (θ_z)	۰،۰	۲۲،۵	۴۵،۰	۶۷،۵	۹۰،۰
زاویه چرخش حول محور a (θ_a)	۰،۰	۱۵،۰	۳۰،۰	۴۵،۰	۶۰،۰

۴ فاکتور در نظر گرفته شامل زاویه چرخش حول محور x (θ_x)، حول محور y (θ_y)، حول محور z (θ_z) و حول محور خود دانه (θ_a) می‌باشند. در این مطالعه از سیستم مختصات کارتزین استفاده شد و محور عمود بر سطح داخلی لوله y در نظر گرفته شده است. هر فاکتور شامل ۵ سطح است که طوری انتخاب‌شده‌اند که تمام زوایا را پوشش دهند.

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر اساس طراحی آزمایش تاگوچی برای دانه‌های استوانه‌ای، استوانه‌ای شیاردار

و سه‌پر

ردیف	θ_x	θ_z	θ_y	θ_a	$T_{s,max}$	
					استوانه‌ای	استوانه‌ای شیاردار
۱	۰،۰	۰،۰	۰،۰	۰،۰	۳۱۹،۱۸	۳۱۱،۹۳
۲	۰،۰	۲۲،۵	۴۵	۱۵	۳۰۸،۲۷	۳۰۸،۵۲
۳	۰،۰	۴۵	۹۰	۳۰	۳۱۷،۷۸	۳۱۷،۷۵

۳۰۹,۲۲	۳۰۹,۲۷	۳۰۹,۱۲	۴۵	۶۷,۵	۱۳۵	۰,۰	۴
۳۱۳,۰۲	۳۱۷,۸۱	۳۱۹,۲۳	۶۰	۹۰	۱۸۰	۰,۰	۵
۳۰۸,۳۱	۳۰۸,۳۵	۳۰۸,۴۴	۳۰	۲۲,۵	۰	۲۲,۵	۶
۳۰۸,۵۵	۳۰۸,۵۰	۳۰۸,۲۹	۴۵	۴۵	۴۵	۲۲,۵	۷
۳۱۷,۹۸	۳۱۷,۸۸	۳۱۷,۸۰	۶۰	۶۷,۵	۹۰	۲۲,۵	۸
۳۰۹,۱۳	۳۰۹,۳۶	۳۰۹,۲۳	۰	۹۰	۱۳۵	۲۲,۵	۹
۳۰۸,۳۵	۳۰۸,۶۶	۳۰۸,۵۷	۱۵	۰	۱۸۰	۲۲,۵	۱۰
۳۰۸,۶۸	۳۰۸,۶۱	۳۰۸,۴۵	۶۰	۴۵	۰	۴۵	۱۱
۳۰۸,۸۸	۳۰۸,۵۶	۳۰۸,۴۷	۰	۶۷,۵	۴۵	۴۵	۱۲
۳۱۷,۱۰	۳۱۷,۸۳	۳۱۷,۸۰	۱۵	۹۰	۹۰	۴۵	۱۳
۳۱۰,۱۸	۳۱۰,۳۵	۳۰۹,۹۵	۳۰	۰	۱۳۵	۴۵	۱۴
۳۰۹,۱۲	۳۰۹,۳۴	۳۰۹,۱۱	۴۵	۲۲,۵	۱۸۰	۴۵	۱۵
۳۰۹,۴۲	۳۰۹,۳۲	۳۰۸,۸۷	۱۵	۶۷,۵	۰	۶۷,۵	۱۶
۳۱۰,۱۵	۳۰۹,۷۳	۳۰۹,۴۲	۳۰	۹۰	۴۵	۶۷,۵	۱۷
۳۱۸,۰۹	۳۱۷,۷۱	۳۱۷,۷۵	۴۵	۰	۹۰	۶۷,۵	۱۸
۳۱۴,۰۹	۳۱۲,۳۷	۳۱۱,۷۸	۶۰	۲۲,۵	۱۳۵	۶۷,۵	۱۹
۳۱۱,۹۳	۳۱۰,۶۹	۳۱۰,۵۳	۰	۴۵	۱۸۰	۶۷,۵	۲۰
۳۱۵,۴۹	۳۱۵,۱۶	۳۱۴,۶۴	۴۵	۹۰	۰	۹۰	۲۱
۳۱۷,۹۲	۳۱۸,۰۳	۳۱۷,۷۷	۶۰	۰	۴۵	۹۰	۲۲
۳۱۷,۵۱	۳۱۷,۸۳	۳۱۷,۶۸	۰	۲۲,۵	۹۰	۹۰	۲۳
۳۱۷,۱۶	۳۱۷,۶۰	۳۱۷,۷۱	۱۵	۴۵	۱۳۵	۹۰	۲۴

با انتخاب روش ۲۵L، انتخاب ۴ فاکتور و ۵ سطح، تعداد شبیه‌سازی‌های موردنیاز از ۶۲۵ ($5^4 = 625$) به ۲۵ عدد کاهش یافت. در نتیجه می‌توان با انجام ۲۵ شبیه‌سازی با ترکیب پارامترها و سطوح ارائه‌شده به نتایج تقریبی ۶۲۵ شبیه‌سازی دست یافت. نتایج شبیه‌سازی بر اساس طراحی آزمایش برای دانه‌های استوانه‌ای، استوانه‌ای شیاردار و سه‌پر به ترتیب در جدول ۳ آمده است. هدف در این مطالعه یافتن زاویه‌ای است که کم‌ترین نقطه داغ را ایجاد می‌کند.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- استقلال از مش

قبل از این که بتوان روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD بر انتقال حرارت دانه به سیال بحث کرد، باید صحت مش ایجادشده بررسی گردد. همان‌طور که در بخش دوم توضیح داده شد، یکی از پارامترهای مهم جهت ایجاد مش مناسب، توجه به مقادیر y^+ بر روی سطوح هست. بدین منظور، استقلال از مش برای هر دانه به صورت مجزا برای دبی‌های ۶، ۸ و ۱۰ مترمکعب بر ساعت انجام شد و مش‌های ایجادشده طوری انتخاب شدند که مقدار y^+ بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ باشد و افزایش مش تأثیری در عدد ناسلت نداشته باشد. مش بهینه انتخاب‌شده برای هر دانه با توجه به هزینه‌های محاسباتی در جدول ۲ ذکر شده است.

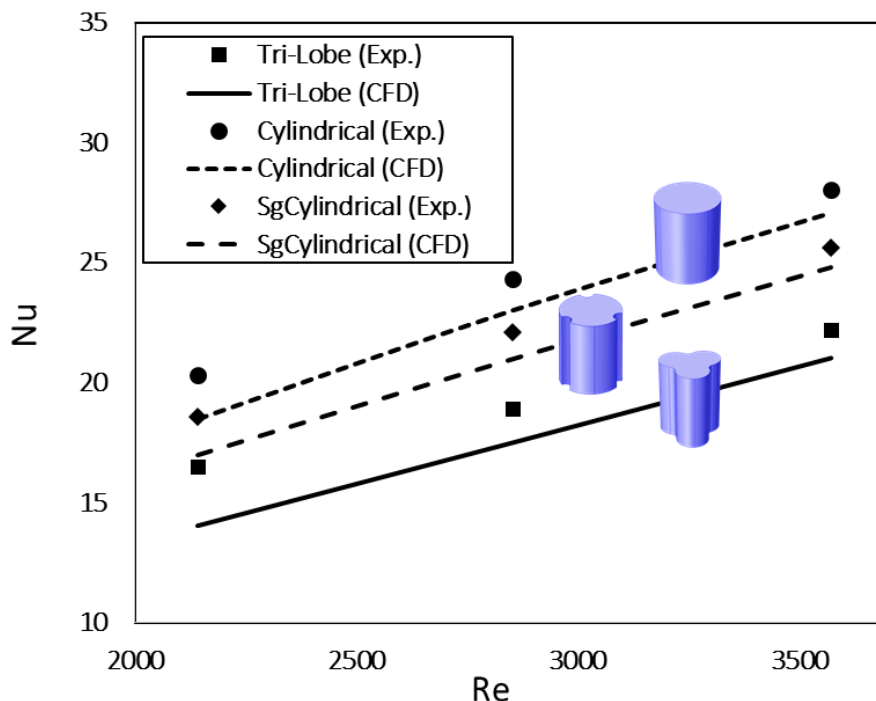
جدول ۴. نتایج استقلال از مش برای دانه‌های مختلف در بستر

ردیف	دانه	تعداد مش
۱	استوانه‌ای	۳۵,۰۴۸
۲	استوانه‌ای شیاردار	۳۵,۹۲۴

۵۳،۵۶۷	سه‌پر	۳
۵۹،۷۶۷	استوانه‌ای حفره‌دار	۴
۶۱،۶۶۱	استوانه‌ای شیاردار حفره‌دار	۵
۶۴،۷۶۵	سه‌پر حفره‌دار	۶

۳-۲- اعتبارسنجی مدل

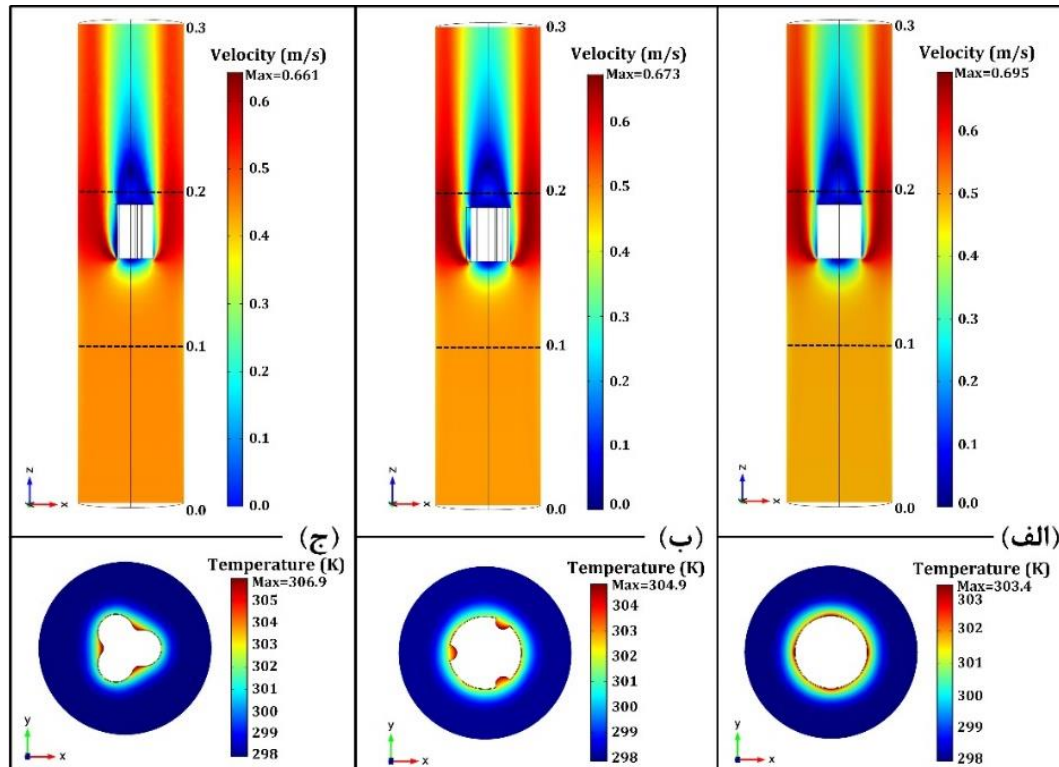
عدد ناسلت با استفاده از ضرایب انتقال جرم به دست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و آنالوژی جرم و حرارت محاسبه شد و جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده گردید [۲۹]. شکل ۳ ناسلت حاصل از آنالوژی جرم و حرارت و شبیه‌سازی CFD را برای دانه‌های بدون سوراخ (شکل ۲ الف-ج) در دبی‌های ۶، ۸ و ۱۰ مترمکعب بر ساعت نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با داده‌های حاصل از مطالعه آزمایشگاهی دارند (میانگین خطا برای استوانه‌ای، استوانه‌ای شیاردار و سه‌پر به ترتیب ۸/۷، ۷/۶ و ۸/۱ درصد).



شکل ۳. مقایسه ناسلت حاصل از کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی CFD

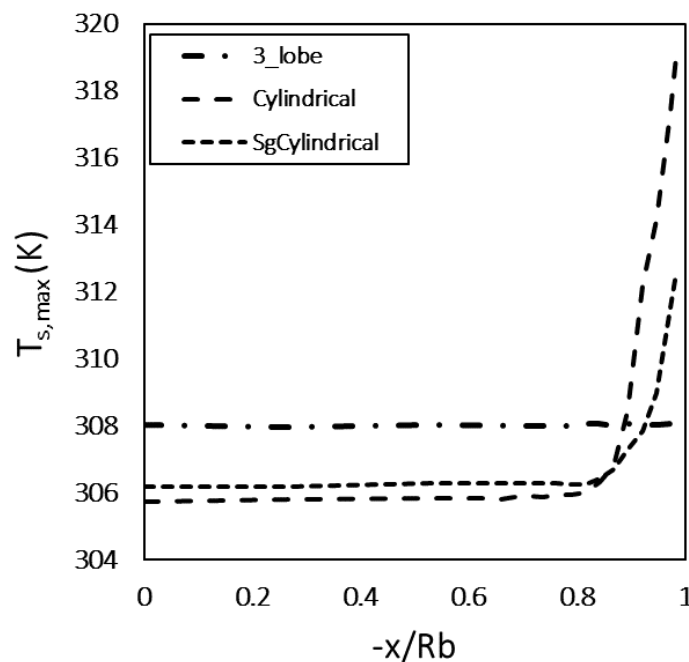
۳-۳- انتقال حرارت دانه کاتالیستی

شکل ۴ شمارگرهای سرعت و دما را در قطاع‌های محوری و شعاعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان پس از برخورد به دانه از مجاورت آن عبور می‌کند. در این مسیر به دلیل انحراف جریان یک سری نواحی با سرعت پایین در پشت و کناره‌های دانه ایجاد می‌گردند که باعث کاهش سرعت و افزایش دمای آن ناحیه می‌شوند. در راکتورهای پر شده به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم که پارامتر مهمی در انتقال حرارت و جرم هست، شکل‌های متفاوتی از دانه استفاده می‌گردد. رفتار انتقال حرارت دانه‌های کاتالیستی با شکل‌های متفاوت (شکل ۲) در مجاورت دیواره بستر به منظور یافتن دانه با بهترین عملکرد از لحاظ کاهش نقاط داغ انجام شد. همچنین در این مطالعه با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها (تاگوچی)، زاویه فضایی مناسب دانه در کنار دیواره محاسبه گردید.

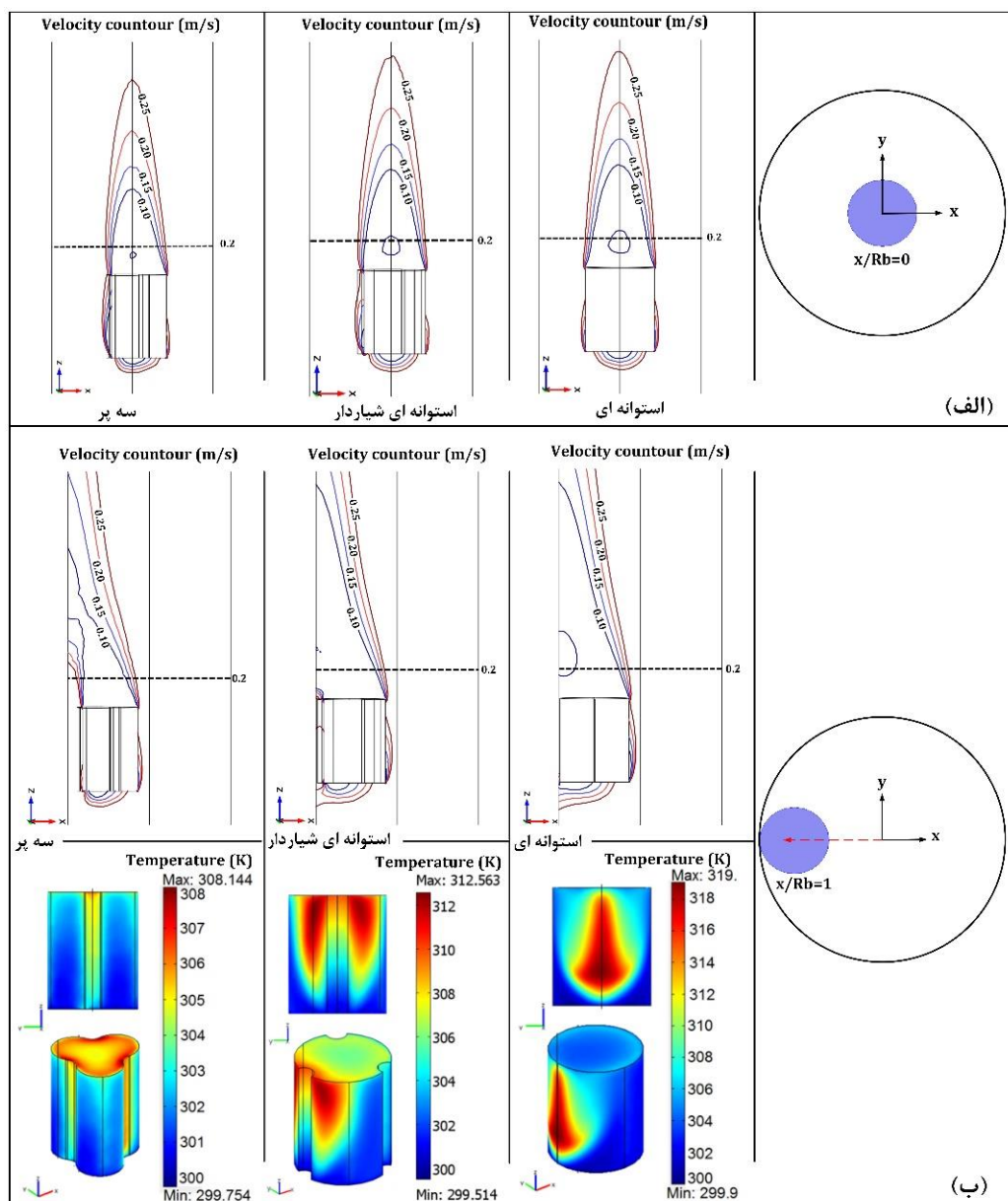


شکل ۴. کانتورهای سرعت و دمای تک‌دانه کاتالیستی (الف) استوانه‌ای، (ب) استوانه‌ای شیاردار، (ج) سه‌پر برای دبی ورودی $6 \text{ m}^3/\text{h}$. شبیه‌سازی‌های مشابهی برای دبی‌های ۸ و ۱۰ مترمکعب بر ساعت نیز انجام شد که نتایج مشابهی داشت.

شکل ۵ تغییرات دمای بیشینه سطح دانه با نزدیک شدن به دیواره را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اگرچه به دلیل نواحی مقعر، دمای بیشینه دانه سه‌پر در ابتدا بیش‌تر از سایرین است ولی با نزدیک شدن به دیواره بستر، دمای دانه سه‌پر تقریباً ثابت می‌ماند. این در حالی است که دمای دانه استوانه‌ای و استوانه‌ای شیاردار برای $y_c/D_p \leq 0.143$ با شیب زیادی افزایش یافته و این افزایش دما برای دانه استوانه‌ای بیش‌تر از دانه استوانه‌ای شیاردار هست.



شکل ۵. دمای بیشینه دیواره بستر با نزدیک شدن دانه به دیواره

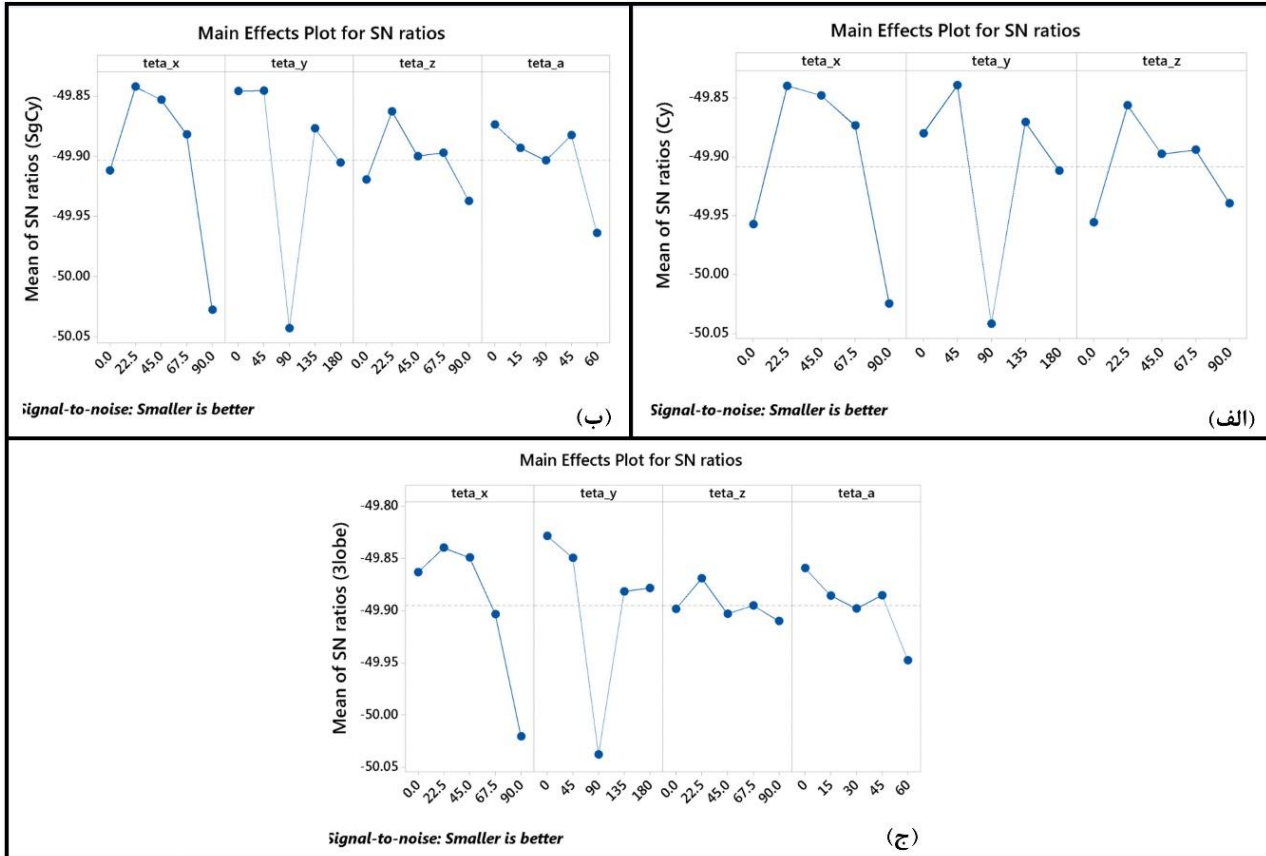


شکل ۶. پروفایل سرعت و دما برای دانه‌های استوانه‌ای، استوانه‌ای شیاردار و سه پر (الف) دانه در مرکز بستر، (ب) دانه در مجاورت دیواره

شکل ۶ پروفایل‌های سرعت را حول دانه و در صفحه $y=0$ نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، با نزدیکی دانه به دیواره بستر، جریان عبوری از بین دانه و دیواره رفته‌رفته کاهش یافته و به طبع آن انتقال حرارت در این ناحیه کاهش می‌یابد. برای دانه استوانه‌ای شیاردار به دلیل شیار موجود در کنار دانه، جریان کمی از این ناحیه عبور می‌کند که از بسته شدن مسیر جریان جلوگیری کرده و باعث می‌شود انتقال حرارت بیشتری نسبت به دانه استوانه‌ای بین دانه و دیواره بستر انجام شود. دانه سه پر به‌خوبی جریان را از ناحیه مقعر حاصل بین دیواره بستر و دانه عبور می‌دهد که باعث بهبود انتقال حرارت دانه-دیواره بستر شده و نواحی داغ کم‌تری در سطح دانه ایجاد می‌گردد (شکل ۶-ب). شکل ۵ و ۶ همچنین نشان می‌دهند که شکل نامتقارن دانه‌ها و زاویه قرارگیری آن‌ها در مجاورت دیواره پارامتر مهمی می‌باشند.

۳-۴- تحلیل آماری

یکی از موارد مهمی که با استفاده از تحلیل آماری می‌توان به آن دست یافت میزان تأثیر هر پارامتر بر نتیجه مدنظر هست. شکل ۷ اثر پارامترهای طراحی ($\theta_a, \theta_z, \theta_y, \theta_x$) را بر نسبت S/N^{16} (بیانگر بزرگی $T_{s,max}$) نشان می‌دهد.



شکل ۷. اثر پارامترهای طراحی بر تابع سیگنال (S/N) (الف) دانه استوانه‌ای، (ب) دانه استوانه‌ای شیاردار، (ج) دانه سه‌پر در مجاورت دیواره در دبی سیال ۶ مترمکعب بر ساعت

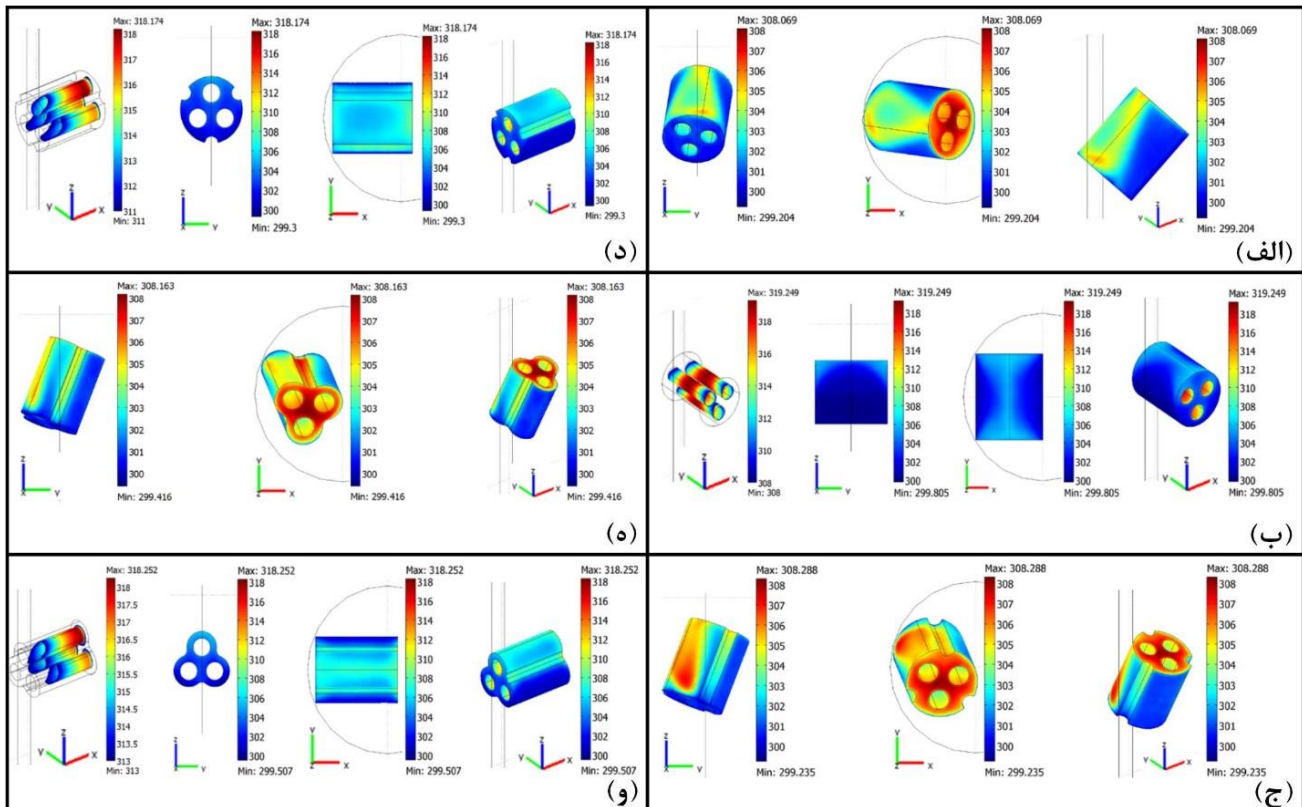
شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش θ_x در ابتدا باعث افزایش در نسبت S/N می‌شود ولی در ادامه مقدار آن با شیب زیادی کاهش می‌یابد. برخلاف θ_x ، افزایش θ_y در ابتدا باعث کاهش نسبت S/N شده ولی بعد از ۹۰ درجه مجدداً نسبت S/N افزایش می‌یابد. θ_z و θ_a به اندازه θ_x و θ_y بر نسبت S/N تأثیرگذار نیستند. نتایج نشان داد که کم‌ترین دمای دیواره بستر در $\theta_x=22,5$ ، $\theta_y=0,0$ ، $\theta_z=22,5$ ، $\theta_a=0$ (برای دانه استوانه‌ای شیاردار و سه‌پر)، $\theta_x=22,5$ ، $\theta_y=45$ ، $\theta_z=22,5$ ، $\theta_a=0$ (دانه استوانه‌ای) و بیش‌ترین دمای دیواره بستر در $\theta_x=90$ و $\theta_y=90$ ، $\theta_z=90$ ، $\theta_a=60$ حاصل می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت حاصل از تحلیل آماری در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی برای هندسه فضایی حاصل از تحلیل آماری تاگوچی

$T_{s,max}$	θ_a	θ_z	θ_y	θ_x	شکل دانه	ردیف
۳۱۸,۰۶۱	---	۲۲,۵	۴۵,۰	۲۲,۵	استوانه‌ای حفره‌دار	۱
۳۱۷,۸۱۹	---	۹۰,۰	۹۰,۰	۹۰,۰		۲

۳۰۸,۵۹۷	۰,۰	۲۲,۵	۰,۰	۲۲,۵	استوانه‌های شیاردار	۳
۳۱۵,۶۴۹	۶۰,۰	۹۰,۰	۹۰,۰	۹۰,۰	حفره‌دار	۴
۳۰۸,۱۶۳	۰,۰	۲۲,۵	۰,۰	۲۲,۵	سه‌پر حفره‌دار	۵
۳۱۴,۴۷۸	۶۰,۰	۹۰,۰	۹۰,۰	۹۰,۰		۶

دمای بیشینه دیواره بستر ($T_{s,max}$) در موقعیت پیشنهاد شده از روش تاگوچی در جدول ۵ (شماره‌های ۱، ۳ و ۵) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از جدول ۵ و جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از تحلیل آماری تاگوچی تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارند و روش تاگوچی به خوبی نقطه بهینه را برای کاهش نقاط داغ پیش‌بینی کرده است. دو دلیل اصلی برای افزایش دما در دیواره بستر وجود دارد: اول، دانه‌ای که به صورت عمودی در مجاورت دیواره قرار گرفته است. در این موقعیت فضای کافی بین دانه و دیواره بستر برای عبور سیال وجود نداشته و انتقال حرارت کاهش می‌یابد. دوم، دانه‌ای که به صورت افقی در مجاورت دیواره قرار گرفته است. در این موقعیت با وجود اینکه فضای کافی برای عبور سیال از ناحیه بین دانه و دیواره بستر وجود دارد ولی سرعت سیال در داخل حفره‌ها پایین بوده که باعث کاهش انتقال حرارت از سطح داخلی حفرات به سیال می‌گردد.



شکل ۸. کانتورهای دما در سطح دانه کاتالیستی برای موقعیت‌های پیشنهادی روش تاگوچی الف) استوانه‌های حفره‌دار (جدول ۵- شماره ۱)، ب) استوانه‌های حفره‌دار (جدول ۵- شماره ۲)، ج) استوانه‌های شیاردار حفره‌دار (جدول ۵- شماره ۳)، د) استوانه‌های شیاردار حفره‌دار (جدول ۵- شماره ۴)، ه) سه‌پر حفره‌دار (جدول ۵- شماره ۵) و و) سه‌پر حفره‌دار (جدول ۵- شماره ۶)

شکل ۸ کانتورهای دما را در سطح دانه کاتالیستی برای موقعیت‌های پیشنهادی روش تاگوچی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین موقعیت برای کاهش نقطه داغ حالت قرارگیری آریب در مجاور دیواره است. در این حالت

سیال به راحتی از فضای بین دانه-دیواره بستر عبور کرده و انتقال حرارت به سیال به خوبی انجام خواهد شد. در حالت آریب به دلیل گردابه‌های موجود در ناحیه پشتی آن بیشینه دما در سطح پشتی دانه تشکیل می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که برخلاف دانه استوانه‌ای ($\theta_y=45$)، زاویه θ_y بهینه برای دانه استوانه‌ای شیاردار و سه‌پر به دلیل کاهش سرعت سیال در نواحی مقعر آن‌ها صفر درجه هست. شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که بدترین موقعیت دانه که بیش‌ترین احتمال ایجاد نقطه داغ را دارد، در حالت افقی است. همان‌طور که شکل ۸-ب و ۸-د مشاهده می‌شود در این حالت سطح داغ در داخل حفره‌ها ایجاد می‌شود که تأثیری بر نقاط داغ دیواره ندارد. از طرفی دانه‌های کاتالیستی واحدهای ریفرمینگ متان معمولاً از جنس سرامیک ساخته می‌شوند که دمای داغ تأثیر چندانی در تخریب آن‌ها ندارد. در نتیجه موقعیت افقی دانه‌ها تأثیری در ایجاد نقاط داغ ندارند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بدترین حالت قرارگیری دانه کاتالیستی با بیش‌ترین احتمال ایجاد نقاط داغ حالت مماس بر دیواره است که در شکل ۶ توضیح داده شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تأثیر زاویه قرارگیری دانه کاتالیستی در بسترهای پرشده پرداخته شد. با بررسی مطالعات پیشین مشاهده شد که در مجاورت دیواره به دلیل کاهش میزان انتقال حرارت جابجایی، انتقال حرارت به کندی انجام می‌شود. در این مطالعه پس از اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با کاهش فاصله بین دانه و دیواره مشاهده شد که دما در سطح دیواره افزایش می‌یابد. با کاهش فاصله دانه-دیواره از $y_c/D_p \leq 0.143$ مشاهده شد که دمای بیشینه دیواره برای دانه‌های استوانه‌ای و استوانه‌ای شیاردار افزایش یافت این در حالی است که دمای دیواره برای دانه سه‌پر تغییرات چندانی نکرد. بدین منظور طراحی آزمایشی با استفاده از روش تاگوچی انجام شد و نتایج نشان داد که با دور شدن حالت قرارگیری دانه استوانه‌ای از حالت عمودی، احتمال ایجاد نقاط داغ کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که کم‌ترین دمای دیواره بستر در $\theta_x=22/5$ ، $\theta_y=0$ ، $\theta_z=22/5$ ، $\theta_a=0/0$ (دانه استوانه‌ای شیاردار و سه‌پر)، $\theta_y=45$ ، $\theta_z=22/5$ ، $\theta_a=0/0$ (دانه استوانه‌ای) و بیش‌ترین دمای دیواره بستر در $\theta_x=0$ ، $\theta_y=0$ ، $\theta_z=0$ و $\theta_a=60$ مشاهده شد.



- [1] T. Fronts, Patterns in Catalytic Systems Luss, Dan, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 36 (1997) 2931-2944.
- [2] M. Sheintuch, S. Shvartsman, Spatiotemporal patterns in catalytic reactors, *AIChE journal* 42 (1996) 1041-1068.
- [3] R. Henda, K. Alhumaizi, Spatiotemporal patterns in a two-dimensional reaction-diffusion-convection system: Effect of transport parameters, *Mathematical and Computer Modelling* 36 (2002) 1361-1373.
- [4] C.H. Bartholomew, R.J. Farrauto, *Fundamentals of industrial catalytic processes*, John Wiley & Sons 2011.
- [5] J.P. Sørensen, W.E. Stewart, Computation of forced convection in slow flow through ducts and packed beds—II velocity profile in a simple cubic array of spheres, *Chemical Engineering Science* 29 (1974) 819-825.
- [6] T.F. McKenna, R. Spitz, D. Cokljat, Heat transfer from catalysts with computational fluid dynamics, *AIChE Journal* 45 (1999) 2392-2410.
- [7] M. Dalman, J. Merkin, C. McGreavy, Fluid flow and heat transfer past two spheres in a cylindrical tube, *Computers & fluids* 14 (1986) 267-281.
- [8] M. Nijemeisland, A.G. Dixon, Comparison of CFD simulations to experiment for convective heat transfer in a gas–solid fixed bed, *Chemical Engineering Journal* 82 (2001) 231-246.
- [9] G. Aparicio-Mauricio, R.S. Ruiz, F. López-Isunza, C.O. Castillo-Araiza, A simple approach to describe hydrodynamics and its effect on heat and mass transport in an industrial wall-cooled fixed bed catalytic reactor: ODH of ethane on a MoVNbTeO formulation, *Chemical Engineering Journal* 321 (2017) 584-599.
- [10] Y. Dong, B. Sosna, O. Korup, F. Rosowski, R. Horn, Investigation of radial heat transfer in a fixed-bed reactor: CFD simulations and profile measurements, *Chemical Engineering Journal* 317 (2017) 204-214.
- [11] S.A. Logtenberg, A.G. Dixon, Computational fluid dynamics studies of fixed bed heat transfer.
- [12] B. Partopour, A.G. Dixon, N-butane partial oxidation in a fixed bed: A resolved particle computational fluid dynamics simulation, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* (2018).
- [13] M. Zhang, H. Dong, Z. Geng, Computational study of flow and heat transfer in fixed beds with cylindrical particles for low tube to particle diameter ratios, *Chemical Engineering Research and Design* 132 (2018) 149-161.
- [14] T. Eppinger, K. Seidler, M. Kraume, DEM-CFD simulations of fixed bed reactors with small tube to particle diameter ratios, *Chemical Engineering Journal* 166 (2011) 324-331.
- [15] H.P.A. Calis, J. Nijenhuis, B.C. Paikert, F.M. Dautzenberg, C.M. van den Bleek, CFD modelling and experimental validation of pressure drop and flow profile in a novel structured catalytic reactor packing, *Chemical Engineering Science* 56 (2001) 1713-1720.
- [16] R.K. Reddy, J.B. Joshi, CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed beds: Wall effects, *Particuology* 8 (2010) 37-43.
- [17] T. Atmakidis, E.Y. Kenig, CFD-based analysis of the wall effect on the pressure drop in packed beds with moderate tube/particle diameter ratios in the laminar flow regime, *Chemical Engineering Journal* 155 (2009) 404-410.

- [18] S.J.P. Romkes, F.M. Dautzenberg, C.M. van den Bleek, H.P.A. Calis, CFD modelling and experimental validation of particle-to-fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio, *Chemical Engineering Journal* 96 (2003) 3-13.
- [19] A.G. Dixon, M. Nijemeisland, E.H. Stitt, Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: Contact points study, *Computers & Chemical Engineering* 48 (2013) 135-153.
- [20] A.G. Dixon, M.E. Taskin, M. Nijemeisland, E.H. Stitt, Wall-to-particle heat transfer in steam reformer tubes: CFD comparison of catalyst particles, *Chemical Engineering Science* 63 (2008) 2219-2224.
- [21] A. Singhal, S. Cloete, S. Radl, R. Quinta-Ferreira, S. Amini, Heat transfer to a gas from densely packed beds of cylindrical particles, *Chemical Engineering Science* 172 (2017) 1-12.
- [22] A.G. Dixon, M. Ertan Taskin, M. Nijemeisland, E.H. Stitt, Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: Single sphere study, *Computers & Chemical Engineering* 35 (2011) 1171-1185.
- [23] A.G. Dixon, M. Nijemeisland, CFD as a design tool for fixed-bed reactors, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40 (2001) 5246-5254.
- [24] A.G. Dixon, M. Nijemeisland, E.H. Stitt, CFD study of heat transfer near and at the wall of a fixed bed reactor tube: Effect of wall conduction, *Industrial & engineering chemistry research* 44 (2005) 6342-6353.
- [25] F.S. Mirhashemi, S.H. Hashemabadi, S. Noroozi, CFD simulation and experimental validation for wall effects on heat transfer of finite cylindrical catalyst, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 1148-1155.
- [26] A.H. Ahmadi Motlagh, S.H. Hashemabadi, 3D CFD simulation and experimental validation of particle-to-fluid heat transfer in a randomly packed bed of cylindrical particles, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 1183-1189.
- [27] A.H. Ahmadi Motlagh, S.H. Hashemabadi, CFD based evaluation of heat transfer coefficient from cylindrical particles, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 674-680.
- [28] F.S. Mirhashemi, S.H. Hashemabadi, Experimental and CFD study of wall effects on orderly stacked cylindrical particles heat transfer in a tube channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39 (2012) 449-455.
- [29] M. Zare, S.H. Hashemabadi, Experimental study and CFD simulation of wall effects on heat transfer of an extrudate multi-lobe particle, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 43 (2013) 122-130.
- [30] R. Zou, A. Yu, The packing of spheres in a cylindrical container: the thickness effect, *Chemical Engineering Science* 50 (1995) 1504-1507.
- [31] Y. Matros, *Unsteady processes in catalytic reactors*, (1985).
- [32] S.B. Jaffe, Hot spot simulation in commercial hydrogenation processes, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 15 (1976) 410-416.
- [33] A. Benneker, A.E. Kronberg, K. Westerterp, Influence of buoyancy forces on the flow of gases through packed beds at elevated pressures, *AIChE journal* 44 (1998) 263-270.
- [34] D. Nguyen, V. Balakotaiah, Flow maldistributions and hot spots in down-flow packed bed reactors, *Chemical engineering science* 49 (1994) 5489-5505.



- [35] O. Korup, S. Mavlyankariev, M. Geske, C.F. Goldsmith, R. Horn, Measurement and analysis of spatial reactor profiles in high temperature catalysis research, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 50 (2011) 998-1009.
- [36] O. Bilous, N.R. Amundson, Chemical reactor stability and sensitivity: II. Effect of parameters on sensitivity of empty tubular reactors, *AIChE Journal* 2 (1956) 117-126.
- [37] S.J. Park, J.W. Bae, Y.J. Lee, K.S. Ha, K.W. Jun, P. Karandikar, Deactivation behaviors of Pt or Ru promoted Co/P-Al₂O₃ catalysts during slurry-phase Fischer–Tropsch synthesis, *Catalysis Communications* 12 (2011) 539-543.
- [38] H. Aligolzadeh, A. Jebreili Jolodar, R. Mohammadikhah, CFD analysis of hot spot formation through a fixed bed reactor of Fischer-Tropsch synthesis, *Cogent Engineering* 2 (2015).
- [39] C. Bendjaouahdou, M.H. Bendjaouahdou, Control of the hot spot temperature in an industrial SO₂ converter, *Energy Procedia* 36 (2013) 428-443.
- [40] C. Barkelew, B. Gambhir, Stability of trickle-bed reactors, ACS symposium series, Oxford University Press, 1984, pp. 61-81.
- [41] E. Wicke, H. Onken, Periodicity and chaos in a catalytic packed bed reactor for CO oxidation, Tenth International Symposium on Chemical Reaction Engineering, Elsevier, 1988, pp. 2289-2294.
- [42] E. Wicke, H. Onken, Bifurcation, periodicity and chaos by thermal effects in heterogeneous catalysis, *From Chemical to Biological Organization*, Springer 1988, pp. 68-82.
- [43] G. Boreskov, Y. Matros, O. Klenov, V. Logovkoi, V. Lakhmostov, Local nonuniformities in a catalyst bed, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1981, pp. 1418.
- [44] K.M. Ng, R. Gani, K. Dam-Johansen, *Chemical product design: towards a perspective through case studies*, Elsevier 2006.