

## اختلاط گاز در راکتور بستر سیال در دماهای بالا

رحمت ستوده قره باغ\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۷۳-۱۱۳۶۵

جمال چاوکی

کانادا، دانشگاه پلی تکنیک مونترال، گروه مهندسی شیمی

چکیده: در این مقاله اختلاط گاز در راکتور بستر سیال در دماهای بالا در یک واحد پیش‌تاز مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که سیستم اختلاط گاز در ایجاد تماس موثر بین فازها نقش دارد و در واکنش‌های مهم صنعتی اختلاط فازهای واکنش دهنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا مطالعه هیدرودینامیک فاز گاز در محل تزریق دارای اهمیت است. برای این منظور، ۸ نوع سیستم توزیع کننده گاز (اسپارژر) طراحی و هیدرودینامیک آنها در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با تزریق گاز متان به عنوان ردیاب مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بدنه خارجی اسپارژر به عنوان محافظ حباب عمل کرده و در این ناحیه، تماس بین فازها به حداقل مقدار خود کاهش می‌یابد. از طرفی یک نوع از اسپارژرها شناسایی شد که می‌تواند عمل تماس بین فازها را تا حدودی بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: اختلاط، بسترهای سیال، راندمان تماس بین گاز-جامد، هیدرودینامیک

**KEY WORDS:** Mixing, Fluidized bed, Gas- Solid contact efficiency, Hydrodynamics

### مقدمه

داده و ضمن استفاده از عملیات مداوم به تولید یکنواخت فرآورده اقدام کرد. به علت حرکت پیوسته ذره‌های جامد به عنوان مواد بستر، انتقال جرم و حرارت در بسترهای سیال بسیار بالا بوده و پارامترهای حرارتی و جرمی به ندرت در بزرگ کردن ظرفیت محدود کننده هستند. از طرفی ممکن است فاز گاز به صورت واکنش نکرده از بستر سیال خارج گردد. همین امر باعث می‌گردد بازده تماس بین فازها در

راکتورهای بستر سیال به واسطه یکنواختی دما به عنوان یک وسیله مطمئن و موثر برای انجام واکنش‌های کاتالیزوری به شدت گرم‌آزا و یا گرماگیر مانند تولید انیدرید فتالیک به وسیله اکسایش کاتالیزوری نفتالین، تولید اکریلو نیتریل از اکسایش کاتالیزوری پروپان و آمونیاک، تولید انیدرید مالئیک از بوتان و تولید ملامین از اوره شناخته شده‌اند [۱]. در این راکتورها می‌توان دامنه وسیعی از ذره‌های کاتالیزور را مورد استفاده قرار

+ E-mail: sotudeh@ut.ac.ir

\* عهده دار مکاتبات

این نوع راکتور در مقایسه با راکتورهای بستر ثابت، ضعیف ارزیابی شود. لذا جهت حل این مشکلات و به دست آوردن درصد تبدیل بالا در این راکتور لازم است که هیدرودینامیک فاز گاز و سیستم‌های توزیع کننده گاز مورد بررسی و مطالعه دقیق قرار گیرد. از آنجایی که به علت نگرانی‌های ایمنی در بیشتر واکنش‌های گرمازا امکان اختلاط گازهای واکنش دهنده قبل از ورود به راکتور، به علت به وجود آمدن یک مخلوط قابل اشتعال وجود ندارد، لذا لازم است که به روش‌های متفاوت این امکان فراهم شود تا این گازها در داخل راکتور با همدیگر مخلوط شوند.

در حالت اختلاط فازهای شرکت کننده در واکنش در داخل بستر، انتقال جرم و اختلاط بین فازها، کنترل کننده واکنش است و حتی از این طریق در واحدهای پیش‌تاز که انرژی تولید شده به وسیله واکنش از راکتور خارج نمی‌شود می‌توان دما را کنترل کرد. بنابراین، در چنین شرایطی نحوه تماس بین فازهای گاز - گاز و جامد برای به دست آوردن بازده و میزان تبدیل بالا دارای اهمیت می‌شود. امروزه راکتورهای بستر سیال صنعتی که از انواع اسپارژرها<sup>(۱)</sup> برای تزریق گاز و مواد واکنش دهنده به داخل بستر استفاده می‌کنند به طور وسیعی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع دارویی و تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی اطلاعات کافی در مورد هیدرودینامیک اسپارژرها در منابع علمی در دسترس نیست. مطالعه اختلاط گازها و مواد شرکت کننده در راکتورهای صنعتی می‌تواند نقش مهمی در بزرگ کردن ظرفیت دستگاه‌هایی که از اسپارژرها برای توزیع مواد واکنش دهنده در واکنش استفاده می‌کنند ایفاء نماید. از طرفی، اطلاعات تجربی در خصوص رفتار فاز گاز در اطراف اسپارژر می‌تواند مهندسين طراح و بهره‌بردار را در طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای شیمیایی یاری نماید.

در مواردی که واکنش انجام شده در داخل بستر یک واکنش گرمازا شامل دو جزء گازی باشد که باید به صورت جداگانه وارد بستر گردد، یکی از اجزاء مانند هوا برای سیال کردن بستر از طریق توزیع کننده اصلی و جزء دیگر از طریق اسپارژر وارد می‌شود و در واقع در محیط بستر باید شرایطی فراهم شود تا این سه فاز شامل دو فاز گازی و یک فاز جامد بهترین تماس ممکن را با هم داشته باشند.

در صورتی که اگر هیدرودینامیک اسپارژر به درستی شناخته نشود ممکن است در حالت انجام واکنش‌های بسیار گرمازا در داخل بستر، در نواحی اطراف اسپارژر نقاط داغی تشکیل شود که این امر منجر به کلوخه شدن مواد بستر، سوخته شدن مواد و یا از بین رفتن سیالیت آن شود. به همین دلیل شناخت اتفاقاتی که در اطراف اسپارژر رخ می‌دهد دارای اهمیت و اولویت می‌باشد. مقاله‌های متعددی در منابع علمی، به بررسی الگوی جریان، تماس فازها و محاسبه طول جت تشکیل شده در توزیع کننده‌های اصلی گاز در بسترهای سیال پرداخته‌اند [۶-۸]. در این بررسی‌ها گازهای ردیاب استفاده شده شامل هلیوم، کربن دی‌اکسید، هیدروژن و متان بوده است. موردهای بالا به طور عمده به بررسی هیدرودینامیک گاز در توزیع کننده اصلی که در واقع می‌تواند یک اسپارژر رو به بالا فرض شود محدود می‌شوند. با تزریق گاز از این سیستم‌ها، نمونه‌برداری از نقاط داخل بستر و یا خروجی آن صورت گرفته و از کروماتوگرافی گازی و یا طیف‌سنجی جرمی برای تجزیه ترکیب گازها استفاده می‌شود. لازم به توضیح است که مطالعات بالا به طور عمده در دماهای پایین صورت گرفته است که حتی اعتبار آنها برای دماهای واقعی بسترهای سیال صنعتی در محدوده ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد محل تردید است. دو مورد مطالعه در منابع علمی در ارتباط با اسپارژرهای رو به پایین قابل دسترسی است. کار انجام شده توسط شن و همکارانش [۹]، هیدرودینامیک اسپارژرهای رو به پایین را در یک بستر دو بعدی در دماهای پایین مورد مطالعه قرار داده است. از طرفی بنکرید و کارام [۱۰] نشان دادند که رفتار فیزیکی بسترهای دو بعدی با بسترهای سه بعدی متفاوت است و هر نوع نتیجه‌گیری در مورد هیدرودینامیک محل تزریق در مورد اسپارژرها مستلزم انجام اندازه‌گیری در شرایط واقعی است و به راحتی نمی‌توان یافته‌های مربوط به جریان دو بعدی را مورد استفاده و تعمیم قرار داد. در کار گزارش شده توسط ستوده و چاوکی [۱۱] ضمن ارائه یک روش برای تشخیص نوع رژیم جریان در اطراف اسپارژرها، دو نوع رژیم جریان مشخص به نام رژیم جریان حبابی و رژیم جریان جت در اطراف اسپارژرهای رو به پایین شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته است. روابط تجربی موجود در منابع علمی را نمی‌توان برای شرایط استفاده از اسپارژرهای رو به پایین در دماهای واقعی مورد استفاده

(۱) Sparger

جدول ۱- شرایط آزمایش‌های تجربی

راکتور	
جنس بدنه	فولاد ضد زنگ ۳۰۴
قطر	۲۲ سانتی متر
ارتفاع	۲ متر
توزیع کننده گاز	
نوع	توزیع کننده کلاهکی
قطر روزنه	۱۲/۶ میلی متر
تعداد	۹ عدد
اسپارژر (شکل‌های ۱ تا ۶)	
قطر اریفیس	۲ میلی متر (شکل ۲-ب)
قطر نازل	۵ میلی متر (شکل ۲-ب)
ذرات (کاتالیزور FCC)	
قطر متوسط	۷۰ میکرون
دانسیته ذره	۱/۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب
گاز	
سرعت گاز اصلی	۰/۸ متر بر ثانیه
سرعت گاز ردیاب	۳۶ و ۴/۸ متر بر ثانیه
نوع گاز ردیاب	CO <sub>۲</sub> و CH <sub>۴</sub>

آماده می‌شود. همچنین با انرژی حاصل از این گازها می‌توان دمای بستر را در حین آزمایش‌های تجربی اختلاط ثابت، کنترل کرد. گازهای احتراق ورودی به بستر با گاز اسپارژر و مواد جامد بستر مخلوط شده و از طریق محفظه انبساط وارد سیکلون می‌شود تا در آنجا ذره‌های حمل شده به همراه گاز، جدا و به داخل بستر برگشت داده شوند.

### ب) اسپارژر برای تزریق گاز ردیاب

شکل اسپارژرهای مورد استفاده در آزمایش که بر مبنای ایده‌های موجود در مقاله‌ها و راکتورهای صنعتی طراحی شده است در شکل‌های ۱ تا ۶ نشان داده شده است. ارتفاع تمامی اسپارژرها همانطوری که در شکل ۱ مشاهده می‌شود ۵۰ میلی‌متر است.

### روش آزمایش

برای به دست آوردن اطلاعاتی در مورد اختلاط فاز گاز در بستر سیال، از گاز متان و کربن دی‌اکسید به عنوان گاز ردیاب استفاده شد. گاز در مرکز راکتور به فاصله حدود ۲۰ سانتی‌متر بالای توزیع

قرار داد [۱۱]. از طرفی نتیجه‌های بررسی‌های انجام شده در همین مرجع نشان می‌دهد که رابطه‌های بالا در شرایط غیر مشابه با راکتورهای صنعتی به دست آمده و به طبع برای شرایط راکتورهای صنعتی و اسپارژرهای رو به پایین قابل استفاده نخواهد بود. همچنین هیدرودینامیک فاز گاز در شرایط مورد مطالعه در این تحقیق با داده‌های گزارش شده برای دماهای پایین مغایرت دارد.

در این مقاله سعی شده است با استفاده از متان به عنوان گاز ردیاب، هیدرودینامیک منطقه تزریق و هندسه اسپارژر در شرایط نزدیک به راکتورهای صنعتی مورد بررسی قرار گیرد. یکی دیگر از ویژگی‌های مهم این مقاله ارایه داده‌های تجربی در دماهای واقعی و عملیاتی است که به طور معمول تولید چنین داده‌های تجربی مستلزم دقت، طراحی راکتور برای کار در دماهای بالا، و همچنین انجام آزمایش در شرایط بسیار سخت و دشوار است. داده‌های تجربی گزارش شده در این مقاله، ضمن کاربرد به عنوان مبنای مقایسه کارکرد انواع اسپارژرها، می‌تواند مسیر جدید انجام تحقیقات اساسی در زمینه اختلاط فازهای شرکت کننده در واکنش و همچنین مکانیسم‌های دسترسی به بهترین حالت تماس بین آنها را فراهم کند. در مقاله حاضر داده‌های تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نقش اسپارژر در اختلاط و برقراری تماس بین فازهای متفاوت در راکتورهای صنعتی به دقت شناسایی و توصیه‌هایی در مورد استفاده از آنها در راکتورهای صنعتی با توجه به نتیجه‌های حاصل ارایه می‌شود.

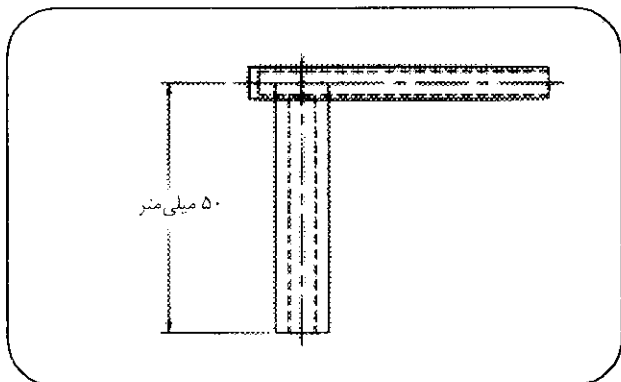
### واحد پیشاز راکتور بستر سیال

در جدول ۱، شرایط مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی خلاصه شده است.

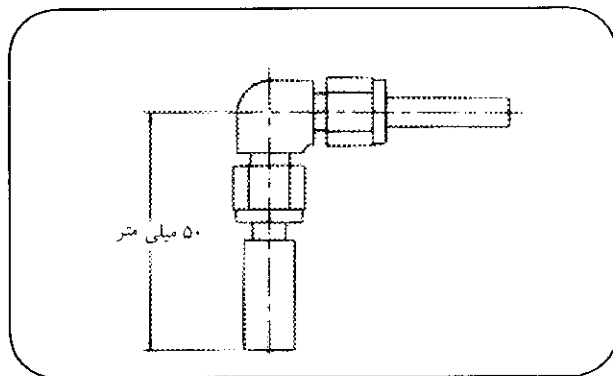
### الف) راکتور

فرآورده‌های احتراق حاصل از سوختن گاز طبیعی در مشعل در قسمت پایین راکتور از طریق محفظه ورودی قبل از توزیع کننده اصلی گاز وارد بستر می‌شود. گازهای ناشی از احتراق باعث گرم شدن راکتور و ذره‌های کاتالیزور موجود در آن می‌شوند و بدین طریق راکتور برای انجام آزمایش‌های تجربی در دماهای بالا

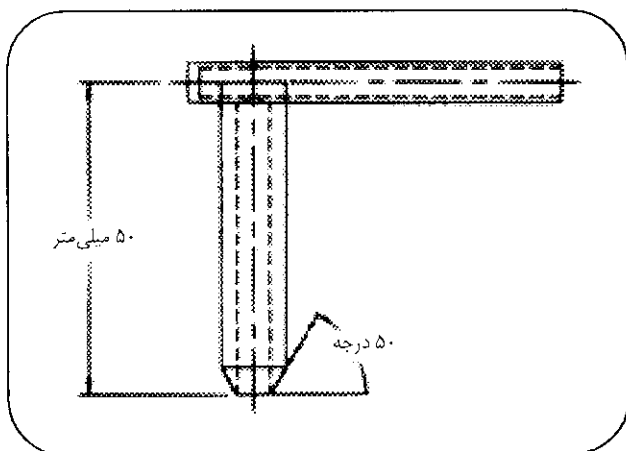
(۱) Fluid Catalytic Cracking



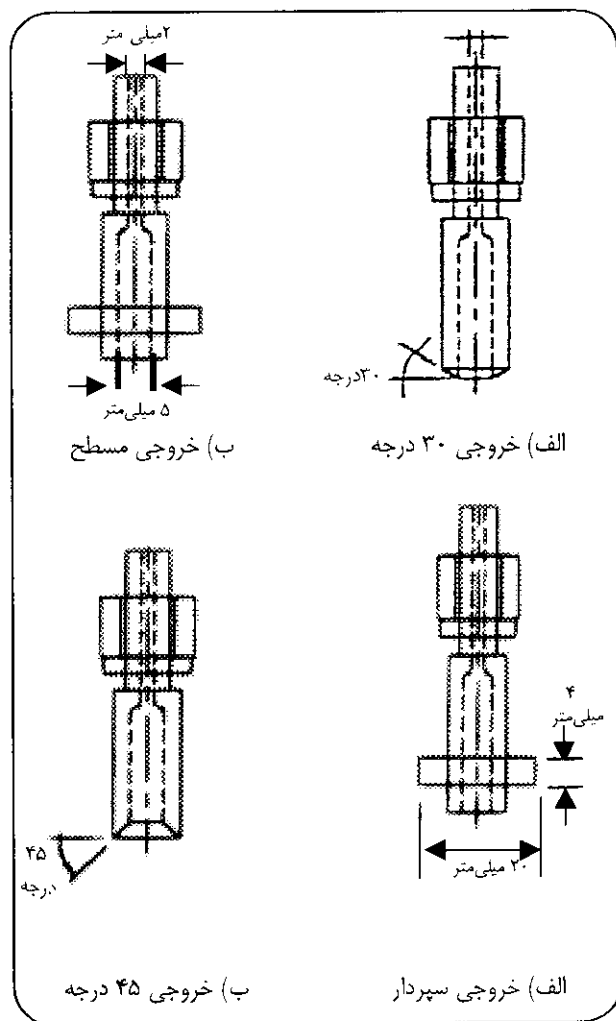
شکل ۳- اسپارزر جوشی با خروجی مسطح



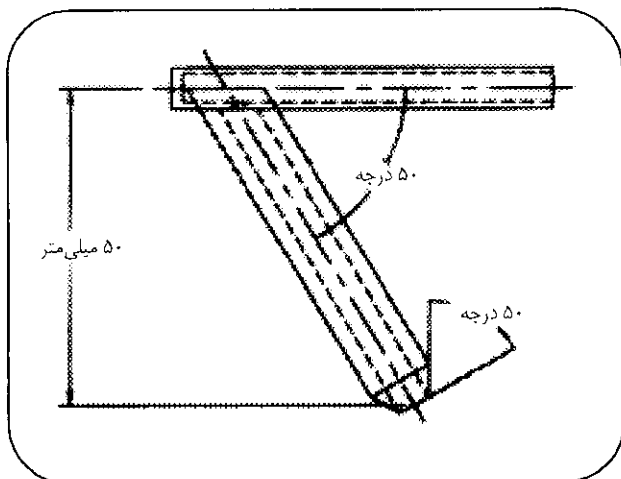
شکل ۱- شکل هندسی اسپارزر پیچی با خروجی مسطح



شکل ۴- اسپارزر جوشی با خروجی ۵۰ درجه



شکل ۲- انواع اسپارزرهای پیچی



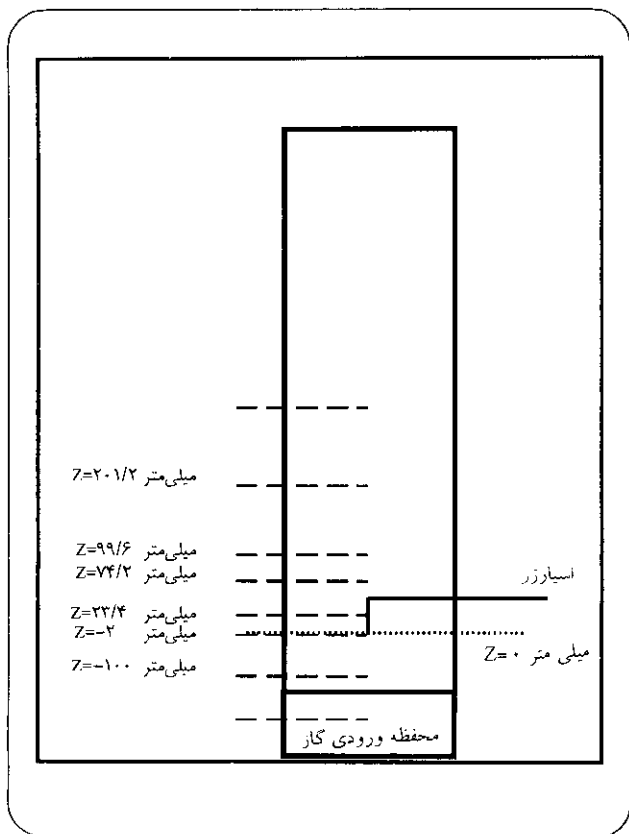
شکل ۵- اسپارزر جوشی مورب با خروجی ۵۰ درجه

مقدار شود منجر به سایش ذره‌های کاتالیزور در دماهای بالا شده و سیکلون نیز قادر به برگرداندن ذره‌ها به داخل بستر نخواهد بود. در این تحقیق نیز در مراحل راه‌اندازی و به دست آوردن شرایط پایا، کنترل ذره‌های داخل بستر به سختی امکان‌پذیر شد. تشابه دینامیکی مورد اشاره در این مقاله شامل نوع و اندازه ذره‌ها، فشار و دما، سرعت گاز در بستر و سرعت خروجی گاز از نازل می‌شود. نمونه‌برداری از گاز در حالت پایا صورت گرفته و در ضمن سیستم نمونه‌برداری طوری طراحی شده که باعث تغییر هیدرودینامیک نقطه نمونه‌برداری نشود. برای این منظور دبی گاز نمونه در مقایسه با دبی گاز عبوری از راکتور بسیار کوچک نگه داشته می‌شود. نمونه گاز از یک بستر حاوی ماده جاذب آب عبور داده می‌شود تا نمونه عاری از آب به کروماتوگراف گازی هدایت شود. ماده جاذب مواد گازی مانند متان را جذب نمی‌کند.

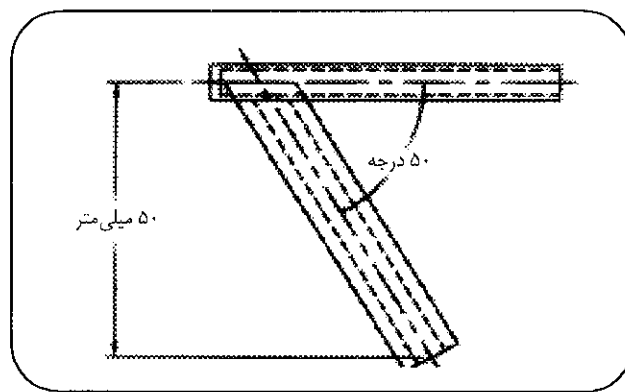
برای تجزیه گازهای نمونه‌برداری شده از قسمت‌های متفاوت راکتور از کروماتوگراف گازی، آشکار ساز هدایت حرارتی (TCD) و

کننده اصلی گاز از طریق یک اسپارژر رو به پایین با یک نازل در انتهای روزنه به داخل راکتور تزریق شد. دبی گاز به وسیله یک روتامتر اندازه‌گیری شده و دمای آن در نقطه تزریق معادل دمای بستر تخمین زده شد. در این تحقیق، آزمایش‌های تجربی با ذره‌های کاتالیزور برای سرعت ظاهری گاز اصلی  $0/8$  متر بر ثانیه و سرعت‌های اسپارژر  $4/8$  و  $36$  متر بر ثانیه در دمای  $400$  درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. توزیع غلظت گاز ردیاب در  $10$  نقطه شعاعی و  $6$  نقطه طولی با دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۷ سیستم نمونه‌برداری گاز را در حین انجام آزمایش‌های تجربی از نقاط داخل راکتور در محور طولی و شعاعی نشان می‌دهد. در این شکل  $Z=0$  در سطح خروجی اسپارژر فرض شده و مقادیر منفی به نقاط پایین‌تر از این سطح و مقادیر مثبت به نقاط بالاتر از این سطح نسبت داده می‌شود.

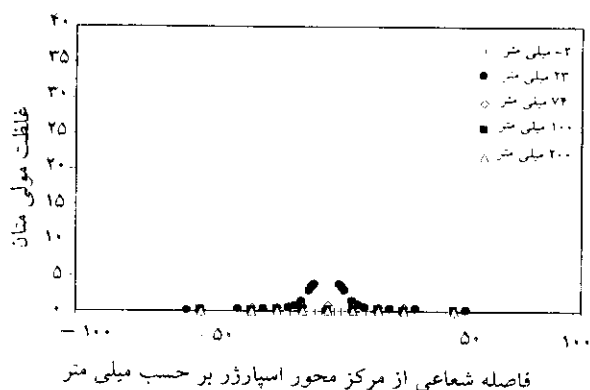
آزمایش‌های متعددی در  $400$  درجه سانتی‌گراد برای استفاده از گاز کربن دی اکسید به عنوان ردیاب انجام شد ولی به علت وجود یک مقدار اولیه برای این گاز در بستر حاصل از گازهای احتراقی ورودی از مشعل به بستر، نتیجه‌های آزمایش‌ها از دقت کافی برخوردار نبود لذا در این مقاله از آرایه منحنی‌های مربوط صرف‌نظر شد. جدول ۲ توزیع زمانی را برای انجام آزمایش‌های اختلاط در واحد پیش‌تاز را نشان می‌دهد. در شرایط راکتورهای صنعتی از آنجایی که سرعت گاز در خروجی از نازل اسپارژر حدود  $30$  متر بر ثانیه است [۴، ۵]، لذا سعی شد تا در این مطالعات سرعت در این محدوده حفظ شود تا یک تشابه منطقی دینامیکی بین این تحقیق و راکتورهای صنعتی وجود داشته باشد. در صورتی که سرعت گاز در خروجی نازل خیلی بیشتر از این



شکل ۷- سیستم نمونه‌برداری گاز و کنترل دما در نزدیکی اسپارژر- محل تزریق گاز ردیاب در بستر سیال



شکل ۶- اسپارژر جوشی مورب با خروجی مسطح



شکل ۸- توزیع غلظت متان برای اسپارژر پیچی با خروجی ۳۰ درجه در ۳۸۰ درجه سانتی گراد با سرعت گاز ۴/۸ متر بر ثانیه در خروجی اسپارژر

می‌دهند که در رژیم حبابی اطراف اسپارژر، بسته به سرعت خروجی گاز از نازل امکان تشکیل حباب وجود دارد. چون در سرعت‌های بسیار بالا امکان تشکیل یک جت در منطقه تزریق گاز وجود دارد بنابراین، شرایط آزمایش‌ها طوری طراحی شد که رژیم جریان در اطراف اسپارژر حبابی باشد [۱۱] و نتیجه‌های این تحقیق، این ادعا را ثابت می‌کند.

شکل ۸ توزیع غلظت متان برای اسپارژر پیچی با خروجی ۳۰ درجه در ۳۸۰ درجه سانتی گراد با سرعت گاز ۴/۸ متر بر ثانیه در خروجی اسپارژر را نشان می‌دهد.

حتی در سرعت‌های پایین به وضوح می‌توان شاهد بود که در یک ناحیه که اطراف اسپارژر است با تزریق گازی با سرعت تقریبی ۵ برابر سرعت ظاهری گاز در بستر می‌توان شاهد رفتار حبابی بود. علی‌رغم اینکه حباب‌های تشکیل شده در این حالت بسیار ریز هستند ولی بدنه خارجی نازل به عنوان یک محافظ برای حباب‌ها عمل کرده و به عنوان یک مقاومت جدی در انتقال جرم به شمار می‌آیند. در ناحیه‌های خارج از اسپارژر (در قسمت پایین و در بالای نازل) به محض آزاد شدن حباب‌ها از بدنه نازل در اثر رفتار فاز گاز و حباب‌های تشکیل شده در توزیع کننده اصلی و پرورش یافته در بستر، در مدت زمانی بسیار کوتاه عمل اختلاط مطلوب بین فازها صورت می‌گیرد.

شکل ۹ توزیع غلظت متان برای اسپارژر پیچی با خروجی ۳۰ درجه در ۴۲۰ درجه سانتی گراد با سرعت گاز ۳۶ متر بر ثانیه در

جدول ۲- توزیع زمانی برای انجام آزمایش‌های اختلاط در واحد پیش‌تاز

نوع عملیات	توضیحات	زمان لازم (ساعت)
گرم کردن اولیه واحد پیش‌تاز از ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد و رسیدن به حالت پایا	توزیع دما و ارتفاع بستر به وسیله کامپیوتر ثبت می‌شود.	۸
جمع‌آوری داده‌های تجربی برای یک اسپارژر مشخص	نمونه‌برداری و تجزیه گاز با استفاده از ۵ سوند در ارتفاع‌های متفاوت، ۹ اندازه‌گیری شعاعی به ازای هر سوند، زمان لازم برای هراندازه‌گیری ۲۰ دقیقه، توزیع فشار همزمان با نمونه‌برداری از گاز	۱۵
اندازه‌گیری توزیع شعاعی دما	استفاده از ۳ سوند، ۱۲ اندازه‌گیری به ازای هر سوند، زمان لازم برای هر اندازه‌گیری ۳ دقیقه	۱/۵
سرد کردن راکتور پیش‌تاز	به طور تدریجی برای جلوگیری از وارد شدن آسیب‌های احتمالی به توزیع کننده اصلی گاز در بستر	۴
کل زمان لازم		۲۸/۵ ساعت

ستون‌های غربال مولکولی و Propak استفاده شد. یک سیستم تبدیل فشار به سیگنال<sup>(۱)</sup> برای کنترل ارتفاع بستر در زمان نمونه‌برداری مورد استفاده قرار گرفت. دمای نقاط متفاوت بستر و خروجی اسپارژر به صورت شعاعی و طولی به وسیله دماسنج‌هایی که در قسمت‌های متفاوت راکتور قرار داده شده بود اندازه‌گیری و به طور دقیق مورد کنترل قرار گرفت. نتیجه‌های داده‌های دما نشان دهنده این واقعیت بود که در منطقه تزریق، دمای گاز خروجی از اسپارژر با دمای بستر برابر است، نتیجه‌های محاسبات نیز این برابری را اثبات می‌کند. البته این برابری به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت بین جداره لوله متصل شده به اسپارژر در داخل راکتور و بستر، به طور کامل منطقی است که در مراجع به آن اشاره شده است [۵،۴].

### بررسی و تحلیل نتیجه‌ها

نتیجه‌های داده‌های تجربی به دست آمده در این تحقیق نشان

(۱) pressure transducer

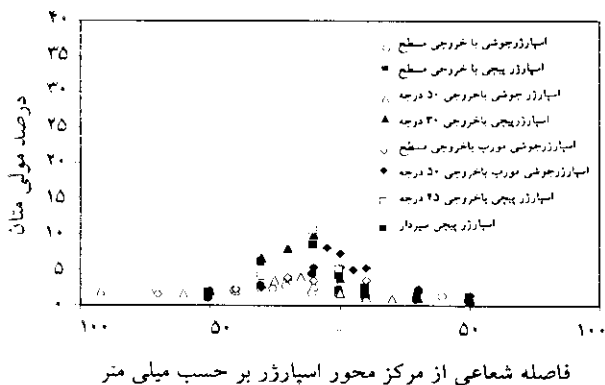
انجام شده در ۱۰۰- میلی متر نشان می دهد که در این ارتفاع آثاری از گاز ردیاب وجود ندارد. این یافته ها مطابق انتظار بود چون داده های تجربی گزارش شده در شکل های ۸ و ۹ نشان می دهد که امکان نفوذ گاز ردیاب به قسمت پایین بستر وجود ندارد بنابراین، نتیجه های یافته های قبلی دوباره مورد تایید قرار گرفت.

شکل ۱۰ توزیع غلظت متان در فاصله ۲- میلی متر از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه را نشان می دهد.

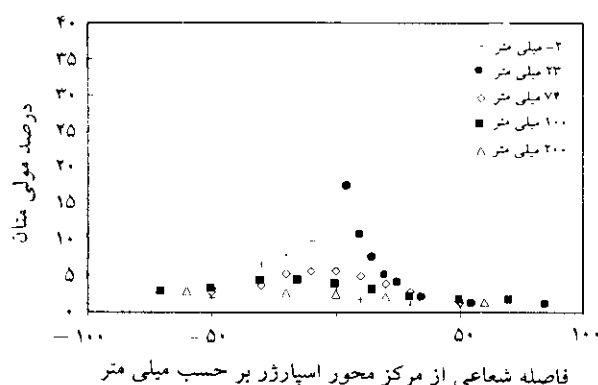
در این شکل، اسپارژرهای با زاویه داخلی ۴۵ درجه، زاویه دار ۳۰ درجه و سپردار رفتار بهتری از خود نشان می دهند. در واقع در این اسپارژرها به خاطر طراحی خاص، گاز خروجی، شانس بیشتری برای نفوذ در داخل بستر از خود نشان می دهد. برای اسپارژر جوشی ۵۰ درجه رفتار اختلاط در مقایسه با بقیه چندان واضح نیست. اسپارژر جوشی مورب ۵۰ درجه اختلاط بهتری از خود نشان می دهد. در واقع نفوذ گاز به خاطر فرکانس بالای تشکیل حباب در داخل بستر قابل توجه است. اختلاط مطلوب فاز گاز در خروجی این اسپارژرها را می توان به این موضوع نسبت داد که ممتوم وارده به سرنازل در این حالت به راحتی توزیع شده و گاز می تواند مقدار بیشتری در داخل بستر، قبل از اینکه از ممتوم وارده از مخلوط گاز-جامد متاثر شود، نفوذ کند. در واقع این رفتار اسپارژرها یکی از نتیجه های مهم این تحقیق به شمار می رود و چون در راکتورهای صنعتی تعداد قابل توجهی

خروجی اسپارژر را نشان می دهد. به نظر می رسد که حباب های بزرگتری در این حالت شکل می گیرد. این حباب ها ضمن تغییر جهت به سمت بالا، خود را به دیواره اسپارژر رسانده و صفی از حباب ها در بدنه نازل اسپارژر شکل می گیرد.

اتحاد حباب ها در این منطقه یک محیط امنی را برای آنها ایجاد کرده و عمل اختلاط محوری و شعاعی<sup>(۱)</sup> آنها با مواد بستر و حباب های موجود در آن برای زمان مشخصی محدود می شود و تا وقتی که حباب ها از نازل عبور کرده و به سطح بالای اسپارژر برسند این وضع ادامه خواهد یافت. مقایسه این شکل با شکل ۸ دوباره رفتار حباب را در کنار جداره اسپارژر تایید می کند و به طور قطع می تواند تایید مجددی بر مقاومت جداره نازل در مقابل عمل انتقال جرم و تماس موثر بین فاز گاز خروجی از اسپارژر و فازهای گاز و جامد موجود در داخل بستر باشد. در هر صورت به محض عبور حباب ها از سطح تزریق یا جدا شدن آنها از بدنه نازل اسپارژر، در اثر اختلاط با بستر، هیدرودینامیک بستر عمل اختلاط را کنترل کرده و باعث تخلیه گاز موجود در حباب های اسپارژر به داخل فاز امولسیون و حباب های اصلی بستر می شود. برای بقیه اسپارژرها رفتار کم و بیش مشابهی به دست آمده است که در اینجا از نشان دادن تک تک شکل ها صرف نظر و فقط به مقایسه اسپارژرهای متفاوت پرداخته می شود. به منظور مقایسه رفتار اسپارژرهای مختلف در بستر، داده شعاعی از غلظت در ۶ نقطه طولی در ارتفاع های ۱۰۰-، ۲-، ۲۳، ۷۴، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی متر اندازه گیری شد. نتیجه های اندازه گیری های



شکل ۱۰- توزیع غلظت متان در فاصله ۲- میلی متر از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه



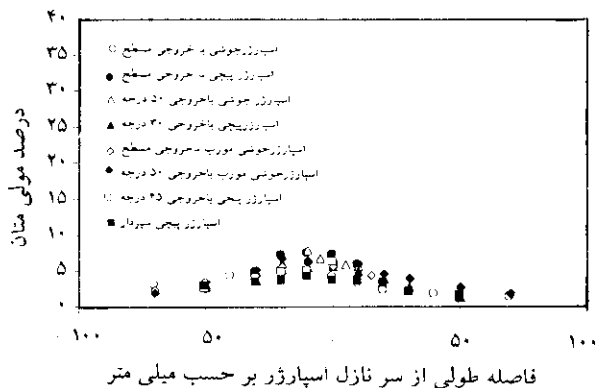
شکل ۹- توزیع غلظت متان برای اسپارژر پیچی با خروجی ۳۰ درجه در ۴۲۰ درجه سانتی گراد با سرعت گاز ۳۶ متر بر ثانیه در خروجی اسپارژر

(۱) Radial and axial mixing

قابل توجهی کم می‌شود. در این شرایط، حباب‌ها از دیواره نازل اسپارژر جدا شده و وارد شرایط واقعی بستر می‌شوند. عامل اصلی کنترل کننده اختلاط در این نقطه هیدرودینامیک بستر می‌باشد که به عنوان شتاب دهنده اختلاط عمل می‌کند. در این ناحیه اثری از هیدرودینامیک اسپارژر وجود ندارد و مقاومت حاصل از وجود اسپارژر به محض جدا شدن حباب از سر نازل از بین می‌رود. در این ناحیه برای گاز ردیاب، اسپارژر مسطح در مقایسه با بقیه اسپارژرها غلظت بالایی را نشان می‌دهد. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که اسپارژرهای پیچی سپردار، پیچی ۳۰ و ۴۵ درجه به خاطر سابقه خوب در اختلاط در فاصله ۲- و ۲۳ میلی‌متر، رفتار بهتری از نقطه نظر اختلاط دارند. در واقع غلظت برای این اسپارژرها سریع‌تر از بقیه به حالت یکنواخت نزدیک می‌شود.

بررسی توزیع غلظت متان در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از سر نازل برای اسپارژرهای متفاوت در ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که برای تمام اسپارژرها اختلاط کامل می‌شود و اثری از هیدرودینامیک اسپارژرها مشاهده نمی‌شود، در واقع در این ناحیه اختلاط به حداکثر می‌رسد. به منظور اطمینان مجدد از حصول اختلاط کامل در ارتفاع‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌متر، اندازه‌گیری غلظت در ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر نیز صورت گرفت. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که غلظت گاز ردیاب در نقاط متفاوت شعاعی در این سطح یکنواخت است و شکل‌های بعدی عمل اختلاط تکمیل شده است.

در شکل ۱۳ غلظت متوسط متان در فواصل طولی از سر نازل

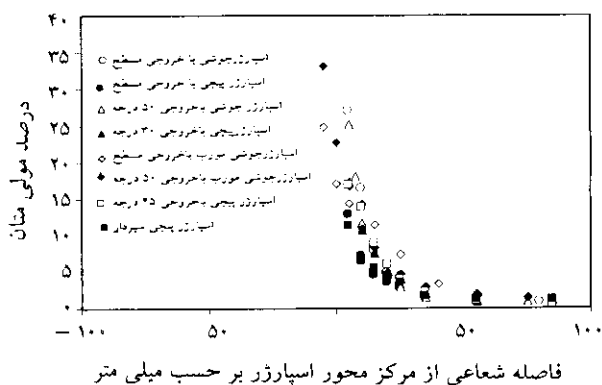


شکل ۱۳- توزیع غلظت متان در فاصله ۷۴ میلی‌متر از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه

از این اسپارژرها با نازل‌های رو به پایین وجود دارد این امکان فراهم می‌شود که ناحیه‌های قرار گرفته شده در قسمت پایین نازل‌ها به طور مطلوب و موثری مورد استفاده قرار گیرد. البته لازم به توضیح است که قبل از استفاده از این اسپارژرها در صنعت، نقش آنها در سایش<sup>(۱)</sup> ذره‌ها باید به دقت مورد بررسی و آزمایش قرار گیرد.

در شکل ۱۱ توزیع غلظت متان در فاصله ۲۳ میلی‌متر از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه نشان داده شده است. لازم به توضیح است که این نقطه در وسط ارتفاع نازل قرار گرفته است. در این ناحیه غلظت متان برای اسپارژر مسطح از بقیه اسپارژرها مقداری بالاتر است. این نتیجه‌ها با نتیجه‌های ارایه شده در شکل ۱۰ مطابقت دارد. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که در هر حالت حباب‌ها به محض خروج از سر نازل تلاش می‌کنند تا خود را به جداره رسانده و نزدیک به آن حرکت کنند. حرکت پیوسته حباب‌ها در جداره منجر به تشکیل یک صفی از حباب‌ها شده و دیواره به عنوان یک محیط امن برای آنها عمل می‌کند. این رفتار بسیار مهم دیواره و اسپارژر مانع از تماس موثر بین حباب خروجی از اسپارژر، حباب‌های موجود در بستر و کاتالیزور می‌شود. در شکل ۱۲ توزیع غلظت متان در فاصله ۷۴ میلی‌متر از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه ارایه شده است.

همانطوری که مشاهده می‌شود غلظت متان در این نقطه به مقدار



شکل ۱۱- توزیع غلظت متان در فاصله ۲۳ میلی‌متر از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه

(۱) Attrition



### نتیجه گیری

۱ - در شرایط رژیم حبابی در اطراف اسپارژر سطح خارجی نازل به عنوان عامل اصلی محدود کننده تماس بین فازهای گاز - گاز - جامد عمل می کند. در واقع در خروجی نازل اسپارژرها، حبابهای خروجی علاقه مند هستند که از طریق حرکت در روی سطح بدنه خارجی نازل به سمت بالا حرکت کنند. در واقع می توان نتیجه گرفت که اختلاط فازها به خاطر رفتار حباب محدود می شود. نتیجه های این پژوهش نشان می دهد که نازل های شیب دار و سپردار باعث بهبود خواص اختلاط و بازده تماس بین فازها در راکتور می شوند.

۲ - مقایسه اسپارژرهای متفاوت نشان می دهد که اسپارژرهای مورب اختلاط بیشتری نشان می دهند. اگرچه اسپارژرهای مورب از نظر اختلاط و ایجاد تماس بین فازها تفاوت چندانی با هم ندارند ولی نوع خروجی مسطح در مقایسه با انواع خروجی زاویه دار مزیت بهتری از خود نشان می دهد. در استفاده صنعتی از این اسپارژرها باید پدیده سایش نیز مد نظر قرار گیرد.

۳ - اختلاط برای تمامی اسپارژرها در محدوده ۱۰۰ میلی متر از سر نازل اسپارژر کامل می شود.

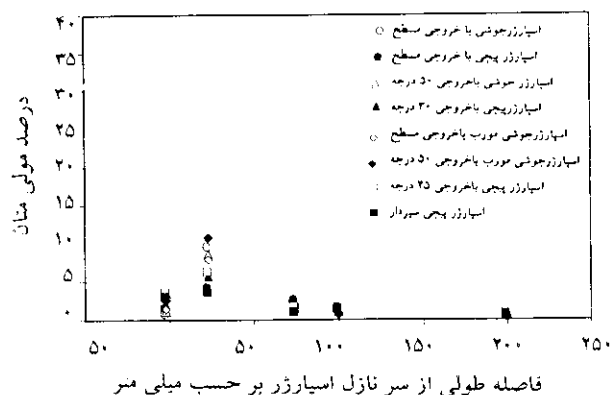
۴ - سه ناحیه اختلاط صفر، جزئی و کامل به خاطر وجود اسپارژرها در بسترهای سیاله مشاهده شد.

۵ - اسپارژرها می توانند رفتار متفاوتی در خروجی و در دیواره در رابطه با اختلاط از خود نشان دهند.

### تشکر و قدردانی

از همکاری دانشگاه پلی تکنیک مونترال در کمک به تهیه داده های تجربی و حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران (طرح پژوهشی ۶۱۳/۳/۹۶۰) صمیمانه تقدیر و تشکر می شود.

تاریخ دریافت: ۸۰/۷/۲۱، تاریخ پذیرش: ۸۱/۳/۲۲



شکل ۱۳: مقایسه غلظت متوسط متان در فواصل طولی از سر نازل برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه

برای انواع اسپارژرها در ۴۲۰ درجه سانتی گراد با سرعت خروجی ۳۶ متر بر ثانیه مقایسه شده است.

با توجه به اطلاعات داده شده در این شکل می توان نتیجه گرفت برای اسپارژرهای رو به پایین مورد استفاده در این مقاله در شرایط رژیم حبابی، سه ناحیه متفاوت از نقطه نظر اختلاط فاز گاز در بسترهای سیاله وجود دارد:

الف) ناحیه اختلاط صفر، در منطقه پایین خروجی نازل.

ب) ناحیه اختلاط جزئی، در منطقه اشغال شده به وسیله اسپارژر و نازل. در این ناحیه اختلاط جزئی بین فاز گاز خروجی از نازل، گاز اصلی بستر و فاز جامد وجود دارد. سطح خارجی اسپارژر و نازل به عنوان عامل اساسی محدود کننده بین دو فاز به شمار می رود. طول ناحیه اختلاط جزئی حدود ۵۰ میلی متر است که معادل طول نازل است.

ج) ناحیه اختلاط کامل، در این ناحیه پس از جدا شدن حبابها از سطح نازل و با توجه به حرکت فاز جامد، گاز موجود در داخل حبابها به داخل بستر منتقل می شود و اختلاط مطلوبی صورت می گیرد. نتیجه های بالا یافته های ارایه شده در شکل های قبلی را دوباره مورد تأیید و تأکید قرار می دهد.

### مراجع

- [1] Fan, L-S. and Knowlton, T. M. (Editor), Fluidization IX : Proceedings of the Ninth Engineering Foundation Conference on Fluidization, Engineering Foundation, (1999).

- [2] Fluidization, Solids Handling, and Processing : Industrial Applications (Particle Technology Series) , by Wen-Ching Yang (Editor) Noyes Publications, (1999).
- [3] Maria Laura Mastellone and Umberto Arena , The Influence of Particle Size and Density on the Radial Gas Mixing in the Dilute Region of the Circulating Fluidized Bed, *Can. J. Chem. Eng.*, **23**, (1999).
- [4] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fluidized-Bed Reactors, Sixth Edition, Electronic Release (2001).
- [5] Kunii D. and Levenspiel, O. "Fluidization Engineering". Butterworth-Heinemann, 2<sup>nd</sup> ed., Boston, MA (1991).
- [6] Yang W. C., Ettetadieh, B. Ancstis, T. C. Gizzie R. E. and Haldipur, G. B. in K. Østergaard and A. Sorensen (eds), In "Fluidization", Engineering Foundation, New York, (1986).
- [7] Yates J. G., Bejcek V. and Cheesman, D. J. in K. Østergaard and A. Sorensen (eds), in "Fluidization V", Engineering Foundation, New York, (1986).
- [8] Blake, T. R., Webb H. and Sunderland, P. B. *Chem. Eng. Sci.*, **45**, (2), 365 (1990).
- [9] Shen, Z., Briens, C. L., Kwauk M., and Bergougnou, M. A., *Can. J. Chem. Eng.*, **68**, 534 (1990).
- [10] Benkrid, A. and Caram, S.H., *AIChE J.*, **35**, 1328 (1989).
- [11] Sotudeh-Gharebaagh, R and Chaouki, J., Gas mixing in a turbulent fluidized bed, *Can. J. Chem. Eng.*, **76**, 65 (2000).