

# تعیین ضریب انتقال حرارت مخلوط سه فازی جامد-مایع-گاز در مخزن جداره دار مجهز به همزن مکانیکی به همراه تیغه غیر استاندارد<sup>۱</sup>

علی اصغر حمیدی

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

امیر علی پوستچی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

شرکت مدیریت توسعه صنایع پتروشیمی (PIDMCO)

(تاریخ دریافت ۸۲/۱/۲۵، تاریخ تصویب ۸۲/۱۰/۲۰)

## چکیده

انتقال حرارت پایدار در مخزن مجهز به همزن مکانیکی برای مخلوط سه فازی جامد-مایع-گاز مورد بررسی قرار می گیرد. مخزن استوانه ای با کف تخت، مجهز به چهار تیغه غیر استاندارد متقارن می باشد به منظور سرمایش مخلوط داخل مخزن از یک جداره ساده<sup>۲</sup> استفاده می شود. برای اختلاط مؤثر مخلوط سه فازی، یک همزن توربینی چهار تیغه ای<sup>۳</sup> بکار گرفته می شود. جهت چرخش همزن طوری است که جریانی رو به بالا و در جهت محور مخزن ایجاد می کند. مواد ماسه، آب و هوا به ترتیب به عنوان فاز جامد، مایع و گاز انتخاب شده اند. فاز گازی از یک پخش کننده حلقه ای<sup>۴</sup> که در پایین و در فاصله ای دور از همزن قرار گرفته است به داخل مخلوط دو فازی جامد-مایع وارد می شود. به منظور مشاهده اثرات تغییرات سرعت چرخشی همزن بر ضریب انتقال حرارت مقادیر سرعت همزن ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. با توجه به تاثیر بسزای حضور ذرات جامد بر هیدرودینامیک اختلاط اثرات تغییرات قطر و میزان غلظت ذرات جامد بر ضریب انتقال حرارت در اندازه های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ میلیمتر و در درصدهای جرمی ۲/۱۴، ۶/۶ و ۱۰/۳ از ذرات جامد مورد آزمایش قرار گرفته است. حضور فاز گازی در مخلوط دوفازی جامد-مایع و نقش آن بر ضریب انتقال حرارت مخلوط سه فازی توسط تغییرات عدد جریان ( $Q_g/Nd^3$ ) که گستره آن بین ۰/۰۸ تا ۰/۰۲ است مورد بررسی واقع شده است.

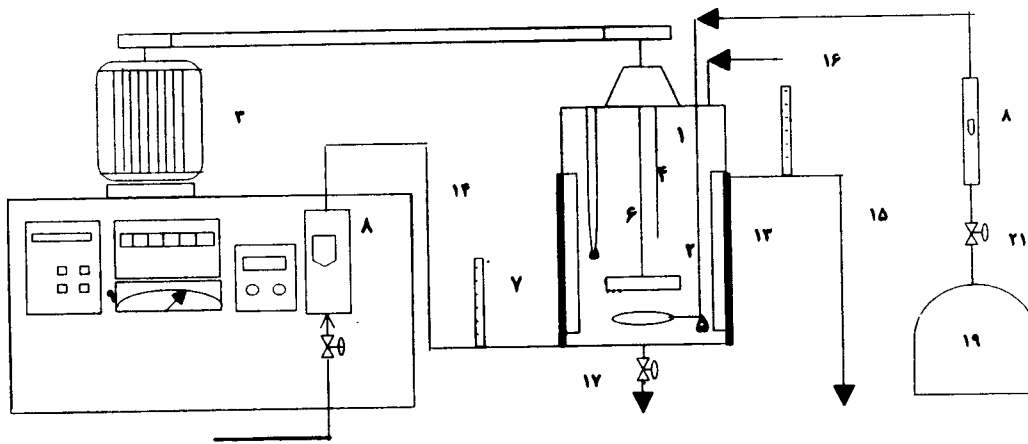
**واژه های کلیدی:** ضریب انتقال حرارت، مخازن همزن دار، تیغه غیر استاندارد، سیستم سه فازی، روابط تجربی

## مقدمه

زمینه برای سیستم های چند فازی گاز-مایع و جامد-مایع و جامد-مایع-گاز با توجه به کاربرد وسیع چنین راکتورهای در دسترس میباشد [۷-۱۱]. لذا ضروری است که به منظور دستیابی به نتایج مطلوب در زمینه انتقال حرارت در این سیستمها مطالعات آزمایشگاهی وسیعی برای هندسه های متفاوت مخزن، همزن، پخش کننده وسطوح متفاوت تامین انتقال حرارت صورت گیرد.

Steiff و همکارانش [۱۲] تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط سه فازی جامد-مایع-گاز را برای سرعتهای همزن ۲۰۰ تا ۶۶۰ دور بر دقیقه فراهم نمودند. اندازه بهره های شیشه ای و جزء حجمی آنها به ترتیب ۷۱ میکرومتر و ۰/۰۵ و سرعت ظاهری گاز ۳/۵ میلیمتر بر ثانیه ثابت در نظر گرفته شده بود. در این مطالعه مشاهده

مخازن مجهز به همزن مکانیکی کاربرد وسیعی در صنایع شیمیایی و پتروشیمی دارند. کنترل فرایند اختلاط و انتقال حرارت در راکتورها و بیوراکتورها یک امر ضروری و بسیار مهم است. دمای سیال درون راکتور یکی از مهمترین فاکتورها برای کنترل محصولات خروجی از راکتور می باشد. به همین دلیل بررسی انتقال حرارت در مخازن همزن دار به منظور کنترل کیفیت محصولات دارای اهمیت فراوان می باشد. شدت انتقال حرارت در سیال در حال اختلاط به عواملی از قبیل طراحی مخزن، نوع همزن و شرایط فرایندی وابسته می باشد. علیرغم مطالعات بسیاری که در زمینه انتقال حرارت در مخازن مجهز به همزن مکانیکی برای سیستم تک فازی مایع صورت گرفته است [۶-۱] لیکن داده های آزمایشگاهی ناچیزی در این



۱. مخزن ۲. همزن ۳. موتور الکتریکی ۴. ترموکوپل ۵. تیغه ۶. گرمکن الکتریکی ۷. دما سنج ۸. دبی سنج ۹. اینورتر برای نمایش دور الکتروموتور ۱۰. نمایشگر دیجیتال درجه حرارت ۱۱. نرموسنات ۱۲. آمپر سنج ۱۳. جداره ۱۴. آب ورودی به جداره ۱۵. آب خروجی از جداره ۱۶. جریان آب ورودی به مخزن ۱۷. جریان آب خروجی از مخزن ۱۸. پخش کننده ۱۹. کپسول هوا ۲۰. جریان هوای ورودی به مخزن ۲۱. شیر کنترل جریان

شکل ۱: نمایی کلی از سیستم آزمایشگاهی.

الگوی جریان بطور مستقیم اثر نمی‌گذارد استفاده شود. برای این حالت در این سیستم خاص به منظور تأمین سطح انتقال حرارت کافی از یک جداره که در سطح بیرونی مخزن نصب شده است استفاده می‌شود. این جداره از نوع ساده و در مخازنی که دارای ظرفیت کمتر از ۵۰۰ گالن یا دو متر مکعب باشد، بکار گرفته می‌شود. مکانیسم حرارتی در این نوع از جداره‌ها در صورت عدم تغییر فاز به شکل جابجایی طبیعی قابل توجیه است [۱۵].

ارتفاع جداره بکار گرفته شده ۳۵ سانتی‌متر و فضای لازم برای عبور مایع خنک کننده از داخل جداره ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور ایجاد صحت و دقت در آزمایشات، جداره بوسیله عایق حرارتی پشم شیشه پوشیده شده است. در این سیستم بخصوص یعنی اختلاط سه فازی جامد-مایع - گاز نقش طراحی همزن و مشخصات آن بعنوان یک پارامتر بسیار مهم در نحوه انجام فرآیند اختلاط مطرح است. از یک طرف حضور فاز گاز و تشکیل حفره‌های هوا و پراکندگی فاز گازی در سرتاسر مخزن قابل اهمیت است و از طرفی دیگر حضور فاز جامد، ته نشینی ذرات و همچنین تعلیق ذرات جامد مطرح می‌شود. برای سیستم های دو فازی گاز - مایع به منظور پراکندگی کامل فاز گاز در فاز مایع از همزنهای شعاعی با توجه به کارایی بالای این نوع همزنها در این سیستمها استفاده می‌شود [۱۶] لیکن برای سیستم دو فازی جامد

شد که با افزایش سرعت چرخشی همزن ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یافت. ایشان همچنین ضرایب انتقال حرارت سیستم سه فازی را با سیستم دو فازی جامد-مایع و سیستم تک فازی مورد مقایسه قرار دادند.

### تشریح سیستم آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی انتقال حرارت مخلوط سه فازی جامد - مایع - گاز در مخزنی از جنس آهن گالوانیزه با قطر داخلی ۲۹ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر انجام شده است. هندسه کف مخزن تخت و در وسط آن مجرای برای عبور محتویات داخل مخزن بعد از اتمام هر آزمایش در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که برای سیستم چند فازی دوغابی<sup>۵</sup> ذرات جامد هندسه‌های کف های توگرد و سهموی قابلیت بالاتری برای تعلیق ذرات جامد نسبت به هندسه‌های دیگر دارا می‌باشند [۱۳].

به منظور سرمایش و گرمایش محتویات داخل مخزن در هر فرآیندی از سطوح انتقال حرارت استفاده می‌شود. برای سیستم‌های چند فازی دوغابی عموماً از لوله‌های مارپیچی بعلت تأثیر گذاشتن بر الگوی جریان در این سیستمها استفاده نمی‌شود [۱۴]. بنابراین در بیشتر فرآیندها که در حضور چند فاز در مخزن مجهز به همزن مکانیکی صورت می‌گیرد مفیدتر است که از سطوح انتقال حرارت که بر

انتهای آن از کف مخزن ۲/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. این فاصله بر حرکت توده سیال و ذرات جامد در کف مخزن مفید می‌باشد و از انباشته شدن ذرات جامد در پشت بافل‌ها جلوگیری می‌کند. برای اندازه‌گیری دمای توده مخلوط و دیواره مخزن از شش ترموکوپل که در مکانهای مختلف مخزن و دیواره قرار گرفته بودند، استفاده شد و دماها در یک صفحه نمایش دیجیتالی مشخص می‌شدند. دماهای آب ورودی و خروجی جداره نیز توسط دو دماسنج جیوه‌ای کالیبره شده، اندازه‌گیری می‌شد.

عمل حرارت دهی به مخلوط سه فاز توسط یک گرمکن الکتریکی لوله‌ای<sup>۴</sup> با توان ۲۰۰۰ وات و کنترل میزان حرارت ورودی به مخلوط بوسیله یک ترموستات انجام می‌شد. برای وارد کردن فاز گازی به درون سیستم دو فاز جامد - مایع از یک پخش کن<sup>۶</sup> با قطر ۹ سانتی‌متر استفاده شد. تعداد روزنه‌های آن ۴۰ و قطر هر کدام ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و این روزنه‌ها در فاصله‌های مساوی نسبت به یکدیگر قرار گرفته بودند. پخش کن در زیر همزن و در فاصله ۵ سانتیمتر از همزن و ۲ سانتیمتر از کف مخزن واقع شده بود.

یک کپسول هوا به همراه تنظیم کننده آن برای تأمین هوای ورودی در نظر گرفته شده بود و هوا از طریق یک شلنگ مقاوم در برابر نوسانات فشاری از کپسول به درون پخش کن وارد می‌شد. برای اندازه‌گیری میزان کلیه جریانات ورودی همانند آب ورودی به جداره و هوای ورودی به مخلوط جامد - مایع از دو دبی سنج کالیبره استفاده می‌شود. در نهایت سیستم آزمایشگاهی با مشخصات مذکور به منظور انجام آزمایشات برای مطالعه رفتار حرارتی سیستم سه فاز جامد - مایع - گاز مطابق شکل (۱) مهیا گردید.

### نحوه انجام آزمایش

آزمایشات انتقال حرارت در حالت پایدار به همراه حرارت فراهم شده توسط گرمکن الکتریکی برای مخلوط داخل مخزن که در تعادل با آب سرد کننده جاری در جداره بود، انجام گرفت. سرعتهای چرخشی همزن به منظور ایجاد مخلوط دوغایی از ذرات جامد در مخزن مجهز به همزن مکانیکی شامل مخلوط سه فاز ۸۰۰، ۱۰۰۰ و

- مایع به منظور حرکت ذرات جامد ثابت در کف مخزن و جلوگیری از رسوب ذرات جامد معلق شده از همزنهای محوری استفاده می‌شود [۱۷].

برای سیستم سه فاز جامد - مایع - گاز مورد آزمایش دو فاز جامد و گاز هر دو بطور همزمان در فاز مایع وجود دارند بنابراین برای طراحی همزن در این نوع سیستم و به منظور اختلاط مؤثر مقایسه‌ای بین میزان اهمیت و تأثیر هر کدام از دو فاز جامد و گاز مطرح می‌شود.

با توجه به اینکه تعلیق ذرات جامد دلیلی است بر پراکندگی کامل گاز و سرعت لازم برای پراکندگی گاز عموماً کمتر از سرعت بحرانی همزن برای ایجاد مخلوط دوغایی می‌باشد بنابراین بکارگیری همزنی با جریان محوری می‌تواند مفیدتر و مؤثرتر نسبت به همزنی با جریان شعاعی برای سیستم سه فاز جامد - مایع - گاز عمل کند [۱۸].

در میان همزنهای محوری همزن توربینی با جهت چرخش رو به بالا کاربرد وسیعتری را در تعلیق ذرات جامد نسبت به دیگر همزنها از خود نشان می‌دهد و پراکندگی انرژی حاصل از چرخش این همزن نسبت به همزنهای دیگر پایدارتر می‌باشد [۱۹].

تعداد تیغه‌های همزن چهار و زاویه قرار گیری تیغه‌ها نسبت به افق ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. قطر همزن، پهنا و ضخامت تیغه‌ها بترتیب ۱۲، ۳/۶ و ۰/۶ سانتیمتر بودند. مکان قرارگیری همزن در مرکز و فاصله ۷ سانتیمتر از کف مخزن بود. این قطر همزن و مکان قرار گیری آن در مخزن برای انجام عمل اختلاط در دوغابهای ذرات بسیار مناسب است [۲۰].

توان لازم برای چرخش همزن از یک موتور الکتریکی DC با قدرت یک اسب بخار تأمین می‌شد و سرعت همزن از صفر تا ۱۴۰۰ دور بر دقیقه قابل تغییر بود. همچنین سرعت دورانی همزن در صفحه نمایش دیجیتالی نشان داده می‌شد و جهت چرخش همزن نیز توسط کلید متصل به موتور الکتریکی قابل تنظیم و تغییر بود. به منظور جلوگیری از تولید گردابه اجباری در سرعتهای چرخشی بالای همزن از چهار تیغه مستقیم غیر استاندارد که بصورت متقارن و بطور عمودی به دیواره مخزن متصل شده است استفاده شد. پهناهای تیغه ۳ سانتیمتر و فاصله

## ارایه نتایج و بحث

محاسبه ضریب انتقال حرارت با استفاده از داده‌های تجربی صورت می‌گیرد. این داده‌ها از موازنه حرارتی بین مخلوط داخل مخزن و آب خنک کننده جاری در جداره در حالت پایدار حاصل می‌گردد. مقدار حرارتی که از مخلوط داخل مخزن از طریق جابجایی اجباری به سیال درون جداره منتقل می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q = hA \Delta T \quad (1)$$

که  $\Delta T$  اختلاف بین دمای توده مخلوط و دیواره مخزن می‌باشد دمای توده مخلوط از متوسط حسابی دماهای ثبت شده در حالت پایدار محاسبه می‌گردد.  $A$  سطح داخلی انتقال حرارت و  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط داخل مخزن بر حسب  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  می‌باشد. مقدار حرارتی که به آب جاری در جداره منتقل می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$q = w_j C_p (T_{jo} - T_{ji}) \quad (2)$$

که  $w_j$  دبی جرمی آب ورودی به جداره،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه آب که از متوسط حسابی دمای ورودی  $T_{ji}$  و خروجی  $T_{jo}$  جداره حاصل می‌شود

$$\left( \frac{T_{ji} + T_{jo}}{2} \right)$$

در حالت پایدار دو معادله مذکور برابر می‌باشند و مقدار  $h$  با توجه به این موازنه حرارتی فراهم می‌گردد. با توجه به آزمایشات انجام شده و تغییر مقادیر چهار پارامتر سرعت چرخشی همزن، سرعت ظاهری گاز، قطر ذرات جامد و میزان ذرات جامد، تأثیر هر کدام از این پارامترها بر ضریب انتقال حرارت به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد. البته قابل ذکر است که مطالعات بسیار کمی در زمینه انتقال حرارت برای سیستم سه فازی جامد - مایع - گاز در مخازن مجهز به همزن مکانیکی صورت گرفته، لذا داده‌های آزمایشگاهی بسیار اندکی به منظور مقایسه نتایج بدست آمده در دسترس می‌باشد و داده‌های موجود نیز از هندسه‌های متفاوت نسبت به سیستم مورد آزمایش حاصل گردیده است.

۱۴۰۰ دور بر دقیقه انتخاب گردیدند. ذرات جامد با اندازه‌های متوسط ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میکرو متر برای انجام آزمایشات در نظر گرفته شدند و میزان جرمی ذرات جامد با اندازه‌های ۲/۱۴، ۶/۶ و ۱۰/۳ درصد در مخلوط دو فازی جامد - مایع تغییر می‌کرد. سرعت حجمی هوای ورودی به سیستم دو فازی جامد - مایع با اندازه‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر دقیقه متغیر بود.

برای انجام هر آزمایش ابتدا مخزن تا ارتفاع معینی از آب پر می‌شد که کنترل میزان حجم ورودی آب به مخزن توسط دبی سنج انجام می‌گرفت. به منظور ورود ذرات جامد به فاز مایع همزن با سرعت معینی شروع به چرخش می‌کرد و عمل اختلاط را در سیستم تک فازی مایع انجام می‌داد در حین اختلاط تک فازی مایع ذرات جامد از روزنه‌ای که روی درپوش مخزن اختلاط تعبیه شده بود به درون فاز مایع اضافه می‌شد. این روش کاهش در توان مصرفی همزن را که ناشی از بلند کردن ذرات جامد از کف مخزن بود، کاهش می‌دهد و تعلیق مؤثر ذرات جامد را آسانتر می‌نماید [۲۱]. ارتفاع مخلوط دو فازی جامد-مایع برای تمامی آزمایشات به منظور کاهش خطای آزمایشگاهی معادل ارتفاع جداره در نظر گرفته شد. سرانجام جریان گاز با مقدار معینی از طریق پخش کن وارد مخلوط دو فازی جامد - مایع می‌گردید. در این حالت سیستم سه فازی جامد - مایع - گاز برای آزمایشات انتقال حرارت مهیا می‌شود.

فرآیند انتقال حرارت به و از مخلوط سه فازی داخل مخزن بطور همزمان توسط گرمکن الکتریکی و آب جاری در جداره شروع می‌شد. با توجه به این که تغییرات دمای میزان آب ورودی به جداره در رسیدن به شرایط پایداری حرارتی مؤثر می‌باشد [۲۲] لذا دما و میزان آب ورودی به جداره برای تمامی آزمایشات بترتیب ۲۰ درجه سانتیگراد و ۱۰۰ لیتر بر ساعت ثابت در نظر گرفته شد. عمل انتقال حرارت در این سیستم زمانی به حالت پایدار می‌رسد که دمای آب خروجی از جداره و دماهای ثبت شده در مکانهای متفاوت مخلوط ثابت بمانند. در این حالت دمای آب خروجی و دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها نشاندهنده دماهای حالت پایای حرارتی در این سیستم می‌باشند.

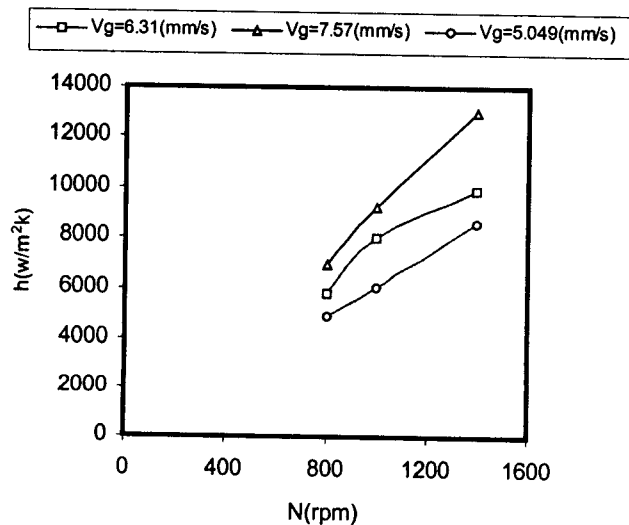
## تأثیر سرعت چرخشی همزن

داده‌های آزمایشگاهی در سرعت‌های متفاوت همزن برای مقادیر ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه مشخص گردید و گستره تغییرات عدد رینولدز بین ۲۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ قرار گرفت. تغییرات سرعت چرخشی همزن تأثیر مستقیم بر هیدرودینامیک مخلوط دارد و بعنوان پارامتری مؤثر در عدد بی‌بعد رینولدز ظاهر می‌شود.

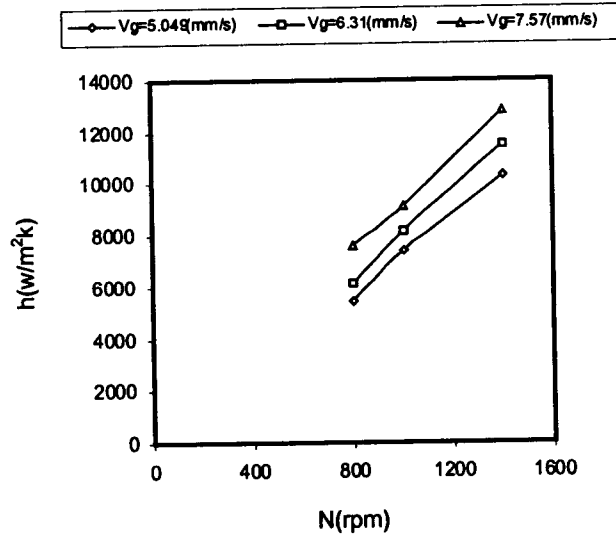
ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش سرعت همزن افزایش می‌یابد و میزان تأثیر این پارامتر بر ضریب انتقال حرارت نسبت به پارامترهای دیگر مشهودتر است. Kurpiers و همکارانش [۲۲] برای سیستم سه فازی شیشه - آب - هوا در یک مخزن با کف تخت که مجهز به چهار تیغه بود تأثیر سرعت همزن را بر ضریب انتقال حرارت مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده نمودند که برای تمامی مقادیر ذرات جامد و سرعت ظاهری گاز این ضریب با افزایش سرعت همزن افزایش می‌یابد.

با افزایش سرعت چرخشی همزن ظرفیت پمپ شدن سیال توسط چرخش مداوم همزن به شدت افزایش می‌یابد و سرعت گردش مخلوط در سرتاسر مخزن بواسطه افزایش مقدار پمپ شدن سیال زیاد می‌شود [۲۴]. سرعت‌های توده سیال در نواحی نزدیک به سطح سیال و کف مخزن و بطور کلی در سرتاسر مخزن با سرعت چرخشی همزن رابطه مستقیم دارند [۲۵].

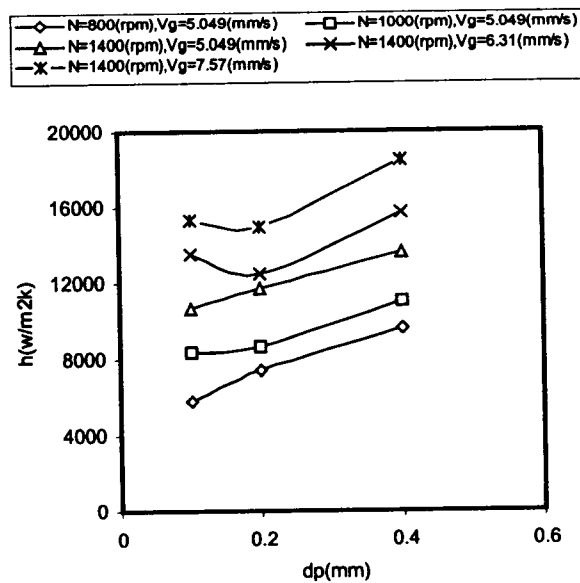
بنابراین با افزایش سرعت چرخشی همزن سرعت گردش توده مخلوط در سراسر حجم مخزن افزایش می‌یابد و میزان آشفتگی و تلاطم فازها را در مخلوط سه فازی زیاد و در نتیجه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. شکل‌های (۲) و (۳) نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده برای سرعت‌های متفاوت همزن و اندازه‌های متوسط و میزان ذرات جامد و سرعت‌های متفاوت ظاهری گاز را نشان می‌دهند.



شکل ۲: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط سه فازی نسبت به سرعت‌های مختلف همزن برای قطر ۰/۱ میلیمتر و درصد جرمی ۶/۶ از ذرات جامد.



شکل ۳: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط سه فاز نسبت به سرعت‌های مختلف همزن برای قطر ۰/۲ میلی‌متر و درصد جرمی ۱۰/۳ از ذرات جامد.



شکل ۴: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط سه فاز نسبت به قطرهای مختلف ذرات.

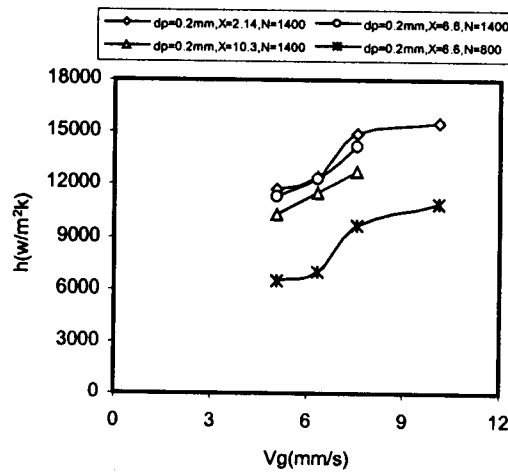
#### تأثیر قطر ذرات جامد

جامد برای سرعت همزن معین و سرعت ظاهری گاز مشخص حاصل از آزمایشات انجام شده می‌باشد. با توجه به مقادیر پایین ظرفیت و قابلیت حرارتی ذرات جامد وجود این ذرات در مخلوط بعنوان فاز مقاوم در برابر انتقال حرارت می‌تواند در نظر گرفته شود. در قطرهای

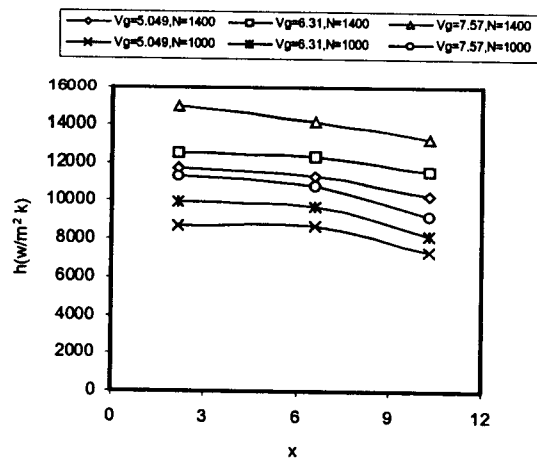
بررسی تأثیر اندازه‌های متوسط ذرات جامد بر میزان انتقال حرارت مورد آزمایش قرار گرفت و مشاهده گردید که با افزایش قطر متوسط ذره جامد ضریب انتقال حرارت جابجایی زیاد می‌گردد. شکل (۴) نشان دهنده تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب قطرهای مختلف ذرات

فازهای دیگر کم می‌شود. بنابراین ضخامت زیر لایه آرام لایه مرزی در کناره دیواره مخزن بعلت وجود کمتر ذرات جامد در قطرهای بزرگتر کاهش می‌یابد و باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط می‌شود [۲۷]. همچنین سرعت پایین آمدن ذرات جامد از کناره‌های دیواره مخزن با افزایش قطر ذره جامد زیاد می‌شود. این امر آشفته‌گی بیشتر مخلوط را در مجاورت دیواره مخزن و کاهش ضخامت زیر لایه آرام را در پی خواهد داشت و در نتیجه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط می‌شود [۲۸].

پایین ذرات جامد و در یک سرعت همزن معین مقدار ذرات جامد که در سرتاسر مخزن پراکنده می‌شوند نسبت به قطرهای بالاتر بیشتر می‌باشند و ذرات جامد کوچکتر بطور مؤثرتری در مخلوط سه فازی پخش می‌شوند [۲۶]. بنابراین در مجاورت دیواره مخزن میزان ذرات جامد در قطرهای کمتر افزایش می‌یابد لذا ضخامت زیر لایه آرام بعلت وجود بیشتر ذرات جامد افزایش می‌یابد و باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود. لیکن برای ذرات جامد با قطرهای بزرگتر پراکندگی ذرات در سرتاسر مخزن کاهش می‌یابد و سطح تماس مفید فاز جامد نسبت به



شکل ۵: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط سه فازی نسبت به درصد‌های جرمی مختلف ذرات جامد.



شکل ۶: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط سه فازی نسبت به سرعت‌های ظاهری گاز.

## تأثیر مقدار ذرات جامد

بررسی تأثیر مقدار ذرات جامد بر میزان انتقال حرارت برای درصدهای جرمی متغیر ۲/۱۴، ۶/۶ و ۱۰/۳ مورد آزمایش قرار گرفت و مشاهده گردید که با افزایش مقدار ذرات جامد در مخلوط سه فاز ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. عموماً وجود ذرات جامد در مخلوط باعث کاهش آشفستگی توده مخلوط می‌شود و این امر ناشی از کاهش توان مصرفی بعلت وجود بیشتر ذرات جامد است [۲۹]. همچنین وجود بیشتر ذرات جامد باعث کاهش سرعت ته نشینی ذرات جامد می‌شود و این امر در مجاورت دیواره مخزن باعث افزایش ضخامت زیر لایه آرام لایه مرزی بعلت وجود بیشتر ذرات جامد و کاهش سرعت ذرات در کناره دیواره مخزن است [۳۰].

در مجاورت دیواره مخزن ضخامت زیر لایه آرام لایه مرزی بعلت وجود بیشتر ذرات جامد و کاهش سرعت پایین آمدن ذرات در کناره دیواره مخزن افزایش می‌یابد در نتیجه میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد. همچنین قابل ذکر است که ماندگی گاز نیز به مقدار ذرات جامد موجود در مخلوط سه فاز وابسته می‌باشد و می‌تواند بعنوان عاملی مؤثر بر ضریب انتقال حرارت تأثیر گذار باشد [۳۱].

میزان پراکندگی گاز در سرتا سر مخزن در یک سرعت معین همزن با افزایش مقدار ذرات جامد کمتر می‌شود. در نتیجه می‌توان تعامل هیدرودینامیکی بین دو فاز جامد و گاز را بعنوان یکی از عوامل کاهش ضریب انتقال حرارت در نظر گرفت [۲۲]. شکل (۵) نشان دهنده تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب غلظت های مختلف ذرات جامد برای سرعت همزن معین و سرعت ظاهری گاز مشخص حاصل از آزمایشات انجام شده می‌باشد.

## تأثیر سرعت ظاهری گاز

بررسی تأثیر میزان گاز ورودی به سیستم بر میزان انتقال حرارت برای سرعت های همزن مشخص و اندازه و میزان ذرات معین مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت با افزایش میزان گاز ورودی افزایش می‌یابد. شکل (۶) میزان تغییرات ضریب انتقال حرارت را با میزان گاز ورودی به سیستم برای سرعت همزن معین و اندازه و میزان ذرات مشخص نشان می‌دهد.

در نظر بگیریذرات جامد در مخلوط دو فاز جامد - مایع کاملاً بحالت دوغابی قرار گرفته باشد. با حضور فاز گازی در سیستم دوفازی جامد - مایع مقداری از ذرات جامد شروع به ته نشینی می‌کنند و ارتفاع صعود ذرات جامد نیز در کناره های دیواره مخزن با حضور فاز گازی کاهش می‌یابد [۳۳].

عموماً سرعت بحرانی برای پراکندگی کامل گاز در سطح پایین تری از سرعت بحرانی برای ایجاد سوسپانسیون ذرات جامد می‌باشد [۳۴]. بنابراین فاز گازی در سرتاسر مخزن بخوبی پراکنده می‌شود و در کناره های دیواره مخزن حبابهای گاز جایگزین ذرات جامد می‌شود. با حضور بیشتر فاز گازی غلظت ذرات جامد در نواحی اطراف دیواره مخزن کاهش می‌یابد و در نتیجه ضخامت زیر لایه آرام لایه مرزی کاهش می‌یابد و حرکت دو فاز مایع و گاز در کناره های دیواره مناسبتر صورت می‌گیرد. همچنین صعود حبابها به همراه سرعت چرخشی بالای همزن مسیرهای چرخشی مجددی را از حبابهای گاز در نزدیک سطح انتقال حرارت بوجود می‌آورد که این مسیرهای چرخشی با افزایش حبابهای گاز بیشتر می‌شوند [۳۵].

بطور کلی گردش همزن باعث چرخش توده مخلوط می‌شود. با حضور فاز گازی و گردش همزن در سرعت های بالا حلقه ثانویه ای ناشی از حرکت حبابهای گاز علاوه بر گردش مایع در سرتاسر مخزن بوجود می‌آید. وجود حبابهای گاز و گردش متناوب این حبابها در سیستم باعث آشفستگی در جریان توده مخلوط می‌شود. با حضور بیشتر حبابهای گاز در سیستم جریان توده مخلوط در هم تر و تغییرات اندازه حرکت بیشتر می‌شود. در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش آشفستگی یعنی حضور بیشتر فاز گازی زیاد می‌شود [۳۶].

## رابطه بین داده های تجربی

ارایه یک راه حل تئوری و نظری برای مکانیسم انتقال حرارت در مخازن مجهز به همزن مکانیکی بعلت پیچیدگی رفتار هیدرودینامیکی سیال و تأثیر بسزای آن در مسایل انتقال حرارت بسیار مشکل می‌باشد. بنابراین آنالیز ابعادی روش مناسبی برای پیش بینی های میزان انتقال حرارت در این مخازن می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی



$$C_{p_s} = x_L C_{p_L} + x_p C_{p_p} \quad (۵)$$

$$\rho_s = \rho_L \phi_L + \rho_p \phi_p \quad (۶)$$

$$\frac{\mu_s}{\mu_L} = \frac{10^{1.82(1-\phi_L)}}{\phi_L} \quad (۷)$$

$$k_s = \frac{2k_L + k_p - 2\phi_p(k_L - k_p)}{2k_L + k_p + \phi_p(k_L - k_p)} \times k_L \quad (۸)$$

خواص فیزیکی ذرات جامد به منظور محاسبه خواص فیزیکی مخلوط بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\rho_p = 1800 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_{p_p} = 850 \frac{j}{kg \cdot c}$$

$$K_p = 1.5 \frac{w}{m \cdot c}$$

برای محاسبه ثابت  $A_1$  و مقادیر توانهای گروههای بی‌بعد در رابطه عدد ناسلت از روش عددی حداقل مربعات و رگرسیون خطی استفاده می‌شود. مقایسه بین اعداد ناسلت فراهم شده از آزمایش  $(Nu_e)$  و رابطه تجربی  $(Nu_c)$  در شکل (۷) نشان داده شده است.

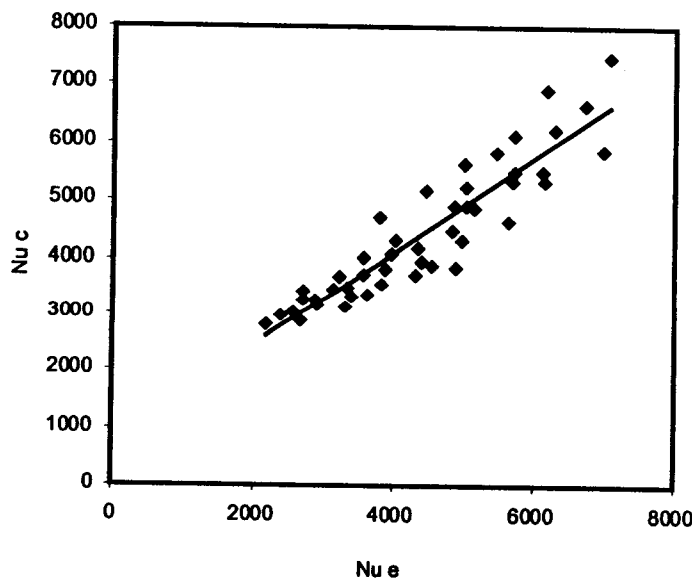
پارامترهای متعدد مؤثر بر میزان انتقال حرارت را می‌توان بصورت گروههای بی‌بعد نمایش داد. برای سیستم مورد آزمایش با استفاده از تئوری باکینگهام می‌توان تابعیت ضریب انتقال حرارت را با استفاده از گروههای بی‌بعد به شکل زیر بیان نمود:

$$\Psi \left( \frac{hD}{k}, \frac{d^2 N \rho}{\mu}, \frac{C_p \mu}{k}, \frac{\mu}{\mu_w}, \frac{V_g}{d \cdot N}, \frac{d_p}{d}, \frac{E}{d}, \frac{C}{d}, \dots \right) = 0 \quad (۳)$$

با توجه به اینکه هندسه سیستم مورد آزمایش بدون تغییر در نظر گرفته شد رابطه عددناسلت را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$Nu = A_1 (Re)^a (Pr)^b \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^c \left( \frac{d_p}{d} \right)^d \left( \frac{V_g}{Nd} \right)^e \quad (۴)$$

به منظور محاسبه اعداد رینولدز و پراتل از خواص فیزیکی  $k, C_p, \mu, \rho$  مربوط به سیستم‌های دوغابی دو فازی جامد - مایع استفاده می‌شود و بصورت زیر بیان می‌گردد:



شکل ۷: مقایسه بین اعداد ناسلت فراهم شده از آزمایش  $(Nu_e)$  و رابطه تجربی  $(Nu_c)$ .

## نتیجه گیری

تأثیر تغییرات سرعت چرخشی همزن، سرعت ظاهری گاز، قطر ذرات جامد و میزان فاز جامد موجود در مخلوط بر میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی سیستم سه فازی جامد - مایع - گاز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که با افزایش سرعت چرخشی همزن، سرعت ظاهری گاز و قطر ذرات ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش و با افزودن بیشتر ذرات جامد به مخلوط سه فازی ضریب انتقال حرارت جابجایی مخلوط کاهش می‌یابد. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایشات و ارتباط داده‌های تجربی بدست آمده با یکدیگر و همچنین روش عددی حداقل مربعات رابطه‌ای برای عدد ناسلت در سیستم سه فازی جامد - مایع - گاز فراهم گردید که تأثیر هر یک از پارامترهای مورد آزمایش را بر ضریب انتقال حرارت جابجایی بیان می‌کند. این رابطه بصورت زیر ارائه می‌گردد:

$$Nu = 1.2467(Re)^{0.896}(Pr)^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left( \frac{d_p}{d} \right)^{0.238} \left( \frac{V_g}{Nd} \right)^{0.393} \quad (9)$$

رابطه فوق انطباقی خوبی با داده‌های تجربی بدست آمده دارد. میزان این انطباق ۸۵/۴ درصد می‌باشد.

## فهرست علائم

A: سطح انتقال حرارت  
 $A_1$ : ضریب ثابت بی بعد  
 $C_p$ : ظرفیت گرمایی ویژه  
 C: فاصله همزن از کف مخزن  
 D: قطر مخزن  
 $d_p$ : قطر ذره  
 d: قطر پره

E: پهناى بافل

h: ضریب انتقال حرارت جابجایی  
 k: ضریب هدایت حرارتی  
 N: سرعت دورانی همزن  
 Nu: عدد بی بعد ناسلت  
 Re: عدد بی بعد رینولدز  
 Pr: عدد بی بعد پرانتل  
 V: سرعت ظاهری گاز  $(4Q_g/\pi D^2)$   
 X: جزء وزنی  
 w: دبی جرمی آب ورودی به جداره  
 T: درجه حرارت

## حروف یونانی

$\mu$ : ویسکوزیته مخلوط دوغابی در دمای مخلوط  
 $\rho$ : دانسیته  
 $\phi$ : جزء حجمی

## زیر نویسها

b: توده مخلوط  
 c: محاسباتی  
 e: آزمایشگاهی  
 g: فاز گاز  
 i: آب ورودی  
 z: جداره  
 l: فاز مایع  
 p: ذره جامد  
 o: آب خروجی  
 s: مخلوط دوغابی جامد-مایع  
 w: دیواره

## مراجع

- 1 - Karcz, J. and Sterk, F. (1995). "Heat transfer in jacketed agitated vessels equipped with non-standard baffles." *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 58.
- 2 - Rai, C. L., Devotta, I. And Rao, P. G. (2000). "Heat transfer viscous Newtonian and non-Newtonian fluids helical ribbon agitator." *Chemical Engineering Journal*, Vol. 79.

- 3 – Kizilcec, F. and Onsan, I. (1990). "Heat transfer Coefficients in finned-coil Stirred –Tank systems." *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 68.
- 4 - Wichterle, K. (1994). "Heat transfer in agitated vessels." *Chemical Engineering Science*, Vol. 49.
- 5 - Havas, G., Deak, A. and Sawinsky, J. (1982). "Heat transfer coefficients in an agitated vessel using vertical tube baffles." *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 23.
- 6 – Kumpinsky, E. (1996). "Heat transfer coefficient in agitated vessel." *Ind. Eng. Che. Res.*, Vol. 35.
- 7 - Desplanches, H. and Bruxelmane, M. (1983). "Characteristic variable, prediction and scale-up for heat transfer to coils in agitated vessels." *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 61.
- 8 – Brain, T. J. S et al. (1989). "Heat transfer in stirred tank bioreactor." *Che. Eng. Prog.*
- 9 – Mizushina, T. et al. (1977). "Heat transfer under solidification of liquid on agitated vessel wall." *J. of Che. Eng., Japan*, Vol. 10.
- 10 – Kung, D. M. and Harriott, P. (1987). "Heat transfer to concentrated suspensions in agitated systems." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 26.
- 11- Frobes, D. and Bohnet, M. (1989). "Heat transfer to liquids and suspensions in agitated narrow vessels." *Ceh. Eng. Technol.*, Vol. 12.
- 12 – Steiff, A. and Weinspach, P. (1982). "Fluid dynamics, heat and mass transfer in agitated aerated slurry reactor." *Ger. Che. Eng.*, Vol. 5.
- 13 – Taca, C. D. and Paunescu, M. (1999). "Suspension or solid particles in spherical stirred vessels." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 55.
- 14 - Fletcher. (1987). "Heat transfer coefficient for stirred batch reactor design." *Chemical Engineer.*
- 15 - Bolliger, D. H. (1982). "Asseing heat transfer in process vessel jacket." *Che. Eng. Magazine.*
- 16 – Kamil, M. et al. (2001). "Minimum agitation speed for liquid-liquid-gas dispersion in mechanically agitated vessels." *Che. Eng. Proc.*, Vol. 40.
- 17 – Armenante, M. and Nagamine, (1998). "Effect of low off-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete solid suspension in stirred tanks." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 53, No. 9.
- 18 – Nienow, A. W. et al. (1986). "Studies on three-phase mixing: A review and recent results." *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 64.
- 20 – Nienow, A. W. (1968). "Suspensions of solid particles in turbine agitated baffled vesels." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 23.
- 21 – Rewatkar, B. V. and Joshi, J. B. (1991). "Role of sparger design in mechanically agitated gas-liquid reactors." *Part two, Che. Eng. Technol.*, Vol. 14.
- 22 – Rao, B. and Murti, P. S. (1973). "Heat transfer in mechanically agitated gas-liquid systems." *Ind. Eng. Che. Process. Des. Develop*, Vol. 12, No. 2.
- 23 – Kurpiers, P. et al. (1986). "Reactor wall/fluid heat transfer in a stirred single-or multi phase reactor using single or two-stage disc stirrers." *Ger. Che. Eng.*, Vol. 9.
- 24 – Joshi, J. B. et al. (1982). "Mechanically agitated gas-liquid reactors." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 37, No. 6.
- 25 – Aubin, J. et al. (2001). "Effect of axial agitator configuration on flow pattern generated in stirred vessel." *Trans Ichem E.*, Vol. 79.

- 26 - Nasr-el-din, H. A. et al. (1996). "Local solids concentration measurement in a slurry mixing tank." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 51.
- 27 - Janzon, J. and Theliander, H. (1994). "On the solid suspension of particles in a agitated vessels." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 49.
- 28 - Guiraud, P. et al. (1997). "Local measurements of fluid particle velocities in a stirred suspeneion." *Che. Eng J.*, Vol. 68.
- 29 - Chapman, C. M. et al. (1983). "Particles-gas-liquid mixing in stirred vessels." *Part 2, Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 61.
- 30 - Dohi, N. et al. (2001). "Suspension of solid particles in multi-impellers three-phase stirred tank reactors." *CJCHE*, Vol. 79.
- 31 - Kawase, B. et al. (1997). *Can. J. of Chem. Eng., HE*, Vol. 75.
- 32 - Frijlink, J. J. et al. (1990). "Suspnsion of solid particles with gassed impellers." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 45, No. 7.
- 33 - Rewatkar, et al. (1991). "Critical impeller speed for solid suspension in mechanically agitated three-phase reactors." *Ind. Eng. Che.*
- 34 - Dutta, N. N. and Pangarkar, V. G. (1995). "Critical impeller speed for solid suspension in multi impeller three phase agitated contactors." *Can. J. of Chem. Eng.*, Vol. 73.
- 35 - Koloni, T. et al. (1989). "Power consumption, gas holdup and interfacial area in aerated non-newtonian suspension in stirred tank of square gross-section." *Che. Eng. Res. Des.*, Vol. 67.
- 36 - DE Maerteleire, E. (1978). "Heat transfer to a helical cooling coil in mechanically agitated gas-liquid dispersions." *Che. Eng. Sci.*, Vol. 33.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Non-Standard Baffle
- 2 - Simple Jacket
- 3 - Four-Pitched Blade Turbine
- 4 - Ring Sparger
- 5 - Suspension
- 6 - Tubular Electrical Heater
- 7 - Pumping Capacity