

## آموزش فنون افزایش مقیاس، راهبردی کلیدی جهت نیل به دانش فنی در مقیاس صنعتی

### زهرا اکثیری

شرکت ملی صنایع پتروشیمی  
شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی

### آرش فیروزی

شرکت ملی صنایع پتروشیمی  
شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی

### محمدرضا جعفری نصر

شرکت ملی صنایع پتروشیمی  
شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی  
[m.jafarinasr@npc-rt.ir](mailto:m.jafarinasr@npc-rt.ir)

### مهدی احتشامی

شرکت ملی صنایع پتروشیمی  
شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی

### چکیده:

تجارب و گزارشات موجود از پروژه‌های پژوهشی انجام گرفته در مراکز پژوهشی و دانشگاهی کشور طی سال‌های اخیر مشخص نموده که توانایی توسعه دانش فنی سنتز مواد شیمیایی و پتروشیمیایی و حتی کاتالیست‌های مورد نیاز آن در مقیاس آزمایشگاهی موجود می‌باشد. اگرچه، امکان توسعه دانش فنی در مقیاس‌های بالاتر نیز حاصل گردیده اما هنوز روش‌های علمی و طبقه‌بندی شده برای نیل به دانش فنی در مقیاس صنعتی که اساس تجاری‌سازی و درآمدزایی بنگاه‌های اقتصادی مرتبط است، تبیین نگردیده است. در این مقاله کوشش شده تا با اشاره‌ای به کلیدی‌ترین جنبه‌های فرآیندی در زمینه افزایش مقیاس، روش‌های مورد استفاده که متناسب با سیستم‌های فرآیندی و بر مبنای اطلاعات موجود از این سیستم‌ها قابل استفاده هستند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. پیشنهاد ایجاد دروسی با سرفصل‌های آموزشی در حد یک درس چهار واحدی یا حتی دو دوره سه واحدی بخش دیگری از این مقاله را به خود اختصاص داده است. به عنوان یک مورد مطالعاتی گزارشی از روند یک پروژه واقعی در زمینه افزایش مقیاس مرتبط با فرآیند تولید پروپیلن از متانول (MTP) که در شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی تجربه گردیده، مورد بررسی قرار داده می‌شود.

واژه های کلیدی: افزایش مقیاس، توسعه دانش فنی، راکتورهای شیمیایی



## مقدمه:

با نگاهی گذرا به فعالیتهای انجام شده در مراکز دانشگاهی، تحقیقاتی و صنعتی کشور، می‌توان به اهمیت و ضرورت تکنیک‌های تغییر مقیاس واحدهای فرایندی در مقطع کنونی پی برد و با اطمینان اعلام نمود که پیشرفت‌های چشم‌گیری در زمینه تولید علم و دانش در کشور صورت پذیرفته که اکثراً در قالب پایان نامه، گزارش، مقاله و در نهایت به صورت پتنت منتشر شده است، اما اکثر فعالیتهای در این مرحله متوقف شده و به مرحله نیمه صنعتی و صنعتی نرسیده و نتوانسته است در ارتقاء صنعتی و تجاری کشور مفید اثرو واقع گردد.

از سوی دیگر با تعریف پروژه‌های مختلف در زمینه‌های نفتی، نیروگاهی و صنایع معدنی توانایی و قابلیت‌های شرکت‌های مجری مهندسی تفصیلی و شرکت‌های ساخت و نصب تجهیزات به شکل قابل توجهی ارتقاء یافته است، به طوری که در پروژه‌های بسیار پیچیده نیز می‌توان با مشارکت شرکت‌های خارجی گام‌های موثر و مطمئنی برداشت. اگرچه این قابلیت تاثیرات مثبتی بر صرفه‌جویی ارزی داشته و توانسته بازار کار داخلی را بهبود بخشد، اما در زمینه توسعه تکنولوژی و ایجاد لیسانس برای فرآیندهای صنعتی پیشرفت چندانی نکرده و همچنان هزینه‌های بالایی در زمینه خرید تکنولوژی و مهندسی پایه پرداخت می‌گردد. حلقه گم شده این زنجیر عدم توانایی دانشمندان و مهندسان داخل کشور در زمینه تغییر مقیاس می‌باشد، که می‌تواند علل مختلفی داشته باشد.

اکثر فارغ التحصیلان دانشگاه به علت عدم آموزش و تجربه کافی، قابلیت بالایی در زمینه تجزیه و تحلیل مسائل تغییر مقیاس ندارند. توانایی افزایش مقیاس فرآیندها یک نیاز آموزشی در دانشکده‌های مهندسی شیمی و بویژه مراکز تحقیقاتی می‌باشد و ارائه دوره‌های تخصصی تغییر مقیاس در رشته مهندسی شیمی بسیار حائز اهمیت است. از طرف دیگر به علت کمبود منابع، دانشجویان و اساتید تمایلی به تعریف پروژه در این زمینه ندارند. می‌توان گفت در زمینه تغییر مقیاس دوره آموزشی جامعی در داخل کشور توسط شرکت‌های دولتی و خصوصی برگزار نمی‌گردد و دوره‌های خارجی، با تعداد محدود و هزینه‌های بالا برای بسیاری از مهندسان و دانشجویان قابل استفاده نمی‌باشد. یکی دیگر از دلایل، عدم حمایت مالی از مخترعین در زمینه توسعه و افزایش مقیاس ایده‌های آزمایشگاهی است و دلیل دیگر عدم مدیریت صحیح در تشکیل تیم‌های خبره از افراد متخصص و با تجربه در زمینه تغییر مقیاس می‌باشد. از اینرو با وجود نتایج آزمایشگاهی خوب در زمینه فرآیندهای مختلف و یا ساخت کاتالیست، متاسفانه ساخت یک واحد صنعتی با تکنولوژی داخلی و یا ساخت یک کاتالیست در مقیاس صنعتی صورت نپذیرفته است.

## هدف از افزایش مقیاس<sup>1</sup>

اصلی‌ترین هدف از تغییر و افزایش مقیاس رسیدن به ظرفیت تولید مورد نظر براساس پیش‌بینی تقاضای بازار و بررسی‌های اقتصادی است. روش‌های متعددی برای این منظور وجود دارد، هر کدام از این روش‌ها باید با توجه به شرایط فرآیندی و اقتصادی بررسی و روش بهینه انتخاب گردد. هنگامی که یک فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی طراحی می‌شود، با توجه به کم بودن حجم خوراک و یوتیلیتهای مورد نیاز توجه به بعضی نکات طراحی مانند بهینه کردن شرایط عملیاتی به منظور کاهش هزینه‌ها کم اهمیت خواهد بود و برای کنترل فرآیند نیاز به سیستم کنترل پیچیده‌ای نیست، همچنین مسائل ایمنی نیز از اولویت کمتری برخوردار هستند. در حالیکه در تغییر مقیاس همان واحد، باید تمام مشکلات و ریسک‌های احتمالی بررسی گردد. لذا انجام تغییر مقیاس توسعه کمی و کیفی تکنولوژی را نیز به همراه دارد.

یکی دیگر از مزایای تغییر مقیاس، سودآور کردن پژوهش‌های علمی است. تحقیقات مداوم در زمینه یک موضوع خاص نیاز به صرف هزینه و انرژی زیادی دارد که این هزینه‌ها شامل خرید تجهیزات، ماده اولیه، منابع علمی پژوهشی، نیروی انسانی و ... می‌باشد. در کشور ما معمولاً این اعتبارات از سرمایه ملی تامین می‌شود اما در اکثر موارد بازگشت سرمایه هرگز صورت نمی‌پذیرد که علت اصلی آن

<sup>1</sup>-Scale up

عدم توانایی انتقال دانش و تکنولوژی از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس‌های بالاتر به منظور تولید محصول و فروش آن می‌باشد. همچنین به روشنی آشکار است که با انجام تغییر مقیاس توانایی مهندسان در این زمینه افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد یافت که در ارتقاء و تربیت نیروی انسانی بسیار حائز اهمیت است.

### روش‌های تغییر مقیاس

همانگونه که ملاحظه گردید برای تغییر مقیاس دو رویکرد تئوری و عملی را می‌توان بکار برد. در رویکرد تئوری که در ادامه بیشتر به آن پرداخته خواهد شد تلاش بر این است که با شناخت کافی از تمام پارامترهای تاثیرگذار سیستم، مدلسازی رفتاری آن در قالب یک مدل جامع بر مبنای روابط و معادلات پایه و ایجاد ارتباط مناسب بین آنها صورت پذیرد، به‌گونه‌ای که مدل توان پیشگویی رفتار سیستم در شرایط مختلف را با دقت لازم داشته باشد. این رویکرد همانگونه که در ادامه خواهد شد در سیستم‌هایی که از پیچیدگی رفتاری برخوردار می‌باشند دچار محدودیت فراوانی است. در رویکرد دیگر، تلاش بر اینست که به ساده‌ترین و مطمئن‌ترین روش ممکن مدلی (حتی مجازی و بدون بنیان تئوری) برای پیشگویی رفتار سیستم در محدوده مورد نظر بر پایه اطلاعات انبوه موجود تدوین گردد تا مبنای طراحی قرار گیرد. این رویکرد و یا تلفیقی از هر دو، در حال حاضر مبنای تغییر مقیاس در صنعت را تشکیل می‌دهند.

روش‌های متعددی جهت تغییر مقیاس وجود دارند. این روش‌ها معمولاً به تنهایی پاسخگوی دقت مورد نیاز برای تضمین عملکرد صحیح سیستم با ابعاد جدید نبوده و بسته به پیچیدگی سیستم مورد مطالعه، باید ترکیبی از آنها را بکار برد. باید توجه داشت که حتی با استفاده از این روش‌ها نیز نمی‌توان تمام ظرفیت‌های مورد نیاز بعضی سیستم‌ها (بعنوان مثال یک راکتور) را طراحی نمود و ممکن است شرایطی پیش آید که با کمک هیچ یک از روش‌هایی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، امکان طراحی سیستم در ظرفیت مطلوب میسر نشود، که در چنین شرایطی جهت غلبه بر مشکل ناگزیر به تغییر طراحی سیستم خواهیم بود. در ادامه به روش‌های متداول اشاره می‌شود.

### تکرار ظرفیت مشخص جهت نیل به ظرفیت مورد نیاز (1 و 2)

این روش، ساده‌ترین حالت ممکن بوده و کمترین میزان خطا را دارد. روش کار بدین صورت است که از اطلاعات یک سیستم در مقیاس مشخص (که قبلاً در مقیاس مناسب نیمه‌صنعتی و صنعتی آزموده شده و نتایج آن قابل استناد می‌باشد) استفاده شده و با تکرار آن با آرایش موازی، ظرفیت مطلوب بدست می‌آید. در شرایطی که هزینه طراحی و ساخت تجهیز جدید با ظرفیت مدنظر بیش از هزینه مجموعه چیدمان چندتایی از تجهیزات موجود باشد، یا هدف تولید ماده‌ای با ویژگی بسیار خاص یا خلوص بسیار بالا و یا عدم تولید یکی از محصولات جانبی باشد، یا مقیاس فرآیند کم و متغیر باشد، نیز وقتی که افزایش مقیاس تجهیز اصلی بنا به محدودیت‌های موجود در معادلات حاکم بر سیستم با محاسبات تئوری و تجربی امکان‌پذیر نباشد، و نهایتاً وقتی هدف تبدیل فرآیندهای مجزای غیر پیوسته به یک مجموعه نیمه پیوسته یا پیوسته باشد این روش کاربرد فراوانی خواهد داشت. در این روش مهم‌ترین عاملی که باید بدقت بررسی گردد اقتصاد فرآیند است. هرچه ارزش افزوده خروجی فرآیند بالاتر و هزینه‌های بهره‌برداری کمتر باشد، روش مزبور اقتصادی‌تر خواهد بود.

### قواعد سرانگشتی<sup>1</sup> (3، 4 و 5)

یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین روش‌های محاسبات و طراحی اولیه تمام تجهیزات، قواعد سرانگشتی هستند. در زمینه بسیاری از تجهیزات مطرح در فرآیندهای نفت، گاز و پتروشیمی قواعد بسیاری برای محاسبات اولیه می‌توان یافت که اغلب از دقت بالایی نیز برخوردار می‌باشند. با این وجود در زمینه محاسبات مربوط به سیستم‌های پیچیده همچون واکنش‌های شیمیایی قواعد بسیار اندکی موجود می‌باشد. این امر عمدتاً<sup>1</sup> بدلیل پیچیدگی فراوان و وجود تعداد بسیار پارامترهای تاثیرگذار در این محث و همچنین تفاوت‌های اساسی بین فرآیندهای مختلف است.

<sup>1</sup>-Rules of Thumb

قواعد سرانگشتی در طراحی هیدرودینامیکی راکتور کاربرد دارند. همچنین پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را می‌توان تا حدودی با این روش فرمول‌بندی نمود. برای سیستم‌های هموزن (مایع- مایع) و دوغابی (جامد- مایع) بیشتر کاربرد دارند. در این موارد قواعد سرانگشتی بیشتر معطوف به ابعاد راکتور، محاسبات سیستم‌های همزن و تبادل حرارتی می‌باشند. سری خاصی از این قواعد نیز بیانگر محدوده تغییر مقیاس قابل قبول برای فرآیندهای شناخته شده هستند. بطور کلی این روش در ارتباط تنگاتنگ با دو روش آنالیز ابعادی و مشابه‌سازی مورد استفاده بوده و به تنهایی کارایی مطلوبی ندارد. هرچه در سیستمی مباحث پدیده‌های انتقال شناخته شده‌تر باشند به نسبت تغییر مقیاس بالاتری می‌توان دست یافت. وجود کاتالیست و پارامترهایی نظیر تاثیر انتقال حرارت بر فرآیند، نوع فرآیند (پیوسته یا غیرپیوسته)، هندسه سیستم واکنشگر (میزان تشکیل نقاط مرده و یا دارای زمان ماند متفاوت)، تاثیر نسبت سطح به حجم محیط واکنش و ... می‌توانند تعیین‌کننده محدوده تغییر مقیاس باشند.

## تحلیل ابعادی<sup>1</sup> (6)

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین روش‌های فرمول‌بندی معادلات حاکم بر سیستم‌های مشابه، روش آنالیز ابعادی است. اساس این آنالیز بر این امر استوار است که با کاهش دادن پارامترهای تاثیرگذار سیستم و بیان آنها در قالب پارامترهای جدید که ارتباط بین دو یا چند پدیده را با همدیگر در سیستم بیان می‌نمایند، می‌توان میزان تشابه رفتاری دو سیستم مورد بررسی را تعیین نمود. پس از شناسایی و تعیین پارامترهای مهم و تاثیرگذار در سیستم، ابتدا پارامترها از نظر نوع تاثیر (سینتیکی، هیدرودینامیکی، انتقال حرارت و ...) دسته‌بندی می‌شوند. سپس اعداد بدون بعد مناسب تعریف می‌شوند. برای دو سیستم متفاوت از نظر ظرفیت (و حتی تا حدودی ساختار) چنانچه اعداد بدون بعد مشابه، مقادیر یکسانی داشته باشند رفتار سیستم در زمینه مرتبط با پدیده‌های مستتر در عدد (اعداد) بدون بعد مورد بررسی مشابه خواهد بود. از جنبه‌های مهم در افزایش مقیاس توجه به این نکته است که اعداد بی‌بعد دو سیستم باید یکسان باشند. نیز باید بین دو سیستم تشابه (هندسی، سینماتیکی و دینامیکی) وجود داشته باشد. آنالیز ابعادی کاربرد فراوانی در زمینه تغییر مقیاس هر نوع تجهیز را دارا بوده و در گستره وسیعی از پدیده‌ها نیز قابل استفاده است، با این وجود این روش در مواردی که مدلی از فرآیند موجود نیست و فقط پارامترهای مهم آن (نظیر قطر، توان و دور پرها در ظروف اختلاط، قطر تانک، ارتفاع سیال، دانسیته و ویسکوزیته سیال) شناخته شده است، نیز در صورت موجود بودن مدل پیوستگی و مومنتم (جهت تعیین تعیین اعداد بی‌بعد  $Fr$  و  $Re$  برای سیستم موجود) با دقت بالایی قابل استفاده است.

بطور کلی آنالیز ابعادی برای مسایل تغییر مقیاس تجهیزات مکانیکی و حرارتی و نیز تحلیل‌های هیدرولیک و هیدرودینامیک (هندسه و رژیم جریان) سیستم مناسب است و با دقت کمتری در بررسی سیستم‌های شیمیایی کاربرد دارد.

## مشابه‌سازی

در این روش عمدتاً<sup>2</sup> سعی می‌شود که هندسه و هیدرودینامیک سیستم در مقیاس‌های متفاوت شباهت داشته باشد، بعبارت بهتر در سه زمینه هندسی<sup>3</sup> (4)، سینماتیکی<sup>4</sup> (7)، و دینامیک<sup>5</sup> (7) بین دو سیستم در دو مقیاس متفاوت تشابه باشد. مورد اول مبین هندسه سیستم است، یعنی نسبت ابعاد دو سیستم یکسان است. مورد دوم اشاره بر یکسان بودن بردارهای سرعت در نقاط مختلف هر دو سیستم دارد و مورد سوم تضمین می‌کند که نیروهای اعمال شده در تمام نقاط متناظر در هر دو سیستم مشابه هستند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد این روش نیز بر مباحث رفتار هیدرودینامیکی سیستم تاکید دارد و برای افزایش مقیاس هندسی راکتورهای شیمیایی استفاده می‌شود. در این میان باید به این نکته توجه داشت که در مشابه‌سازی برای بسیاری از موارد (بخصوص مواردی که دارای رفتار

## ۲-Dimensional Analysis

### ۱- Geometric

### ۲- Kinematics

### ۳- Dynamic



هیدرودینامیکی پیچیده‌ای هستند) محدودیت‌های فراوانی وجود خواهد داشت. بعبارت دیگر احتمال دارد که برای دو مقیاس متفاوت وقتی که تلاش بر ثابت نگاه داشتن پارامتری در دو سیستم داشته باشیم، اختلاف حاصل شده در مورد سایر پارامترهای دو سیستم بسیار فاحش باشد.

## روش‌های بنیادین<sup>1</sup> (9 و 11)

در این روش بر مبنای تعیین معادلات حاکم برای موازنه جرم (معادلات انتقال جرم، معادلات واکنش‌های شیمیایی) (8، 13، 14 و 15)، موازنه حرارت (معادلات انتقال حرارت) (12) و موازنه مومنتم (معادلات مومنتم) (7) روند لازم برای تغییر مقیاس تعیین می‌شود. تمام معادلات در قالب روابط تئوریک دقیق بیان شده و با حل همزمان آنها می‌توان مدل جامعی از فرآیند را تبیین نمود و طراحی مناسب را برای ظرفیت مد نظربه انجام رسانید. این روش بسیار دقیق و کارآمد است، و با تعیین مدل دقیق فرآیند و معادلات مربوطه می‌توان با دقت بسیار بالایی تغییر مقیاس مناسب را بر سیستم اعمال نمود. با این وجود بجز برای موارد محدود که دارای رفتار بسیار ساده و ابتدایی می‌باشند، برای هیچیک از سیستم‌های واکنشی فرآیندهای مطرح معادلات دقیق تئوری در مراجع ارائه نشده است و تعیین آنها نیز بسادگی میسر نیست. همچنین استفاده از این روش برای فرآیندهای هتروژن بسیار مشکل می‌باشد.

در مورد واکنش‌های شیمیایی روش کار بدین صورت است که ابتدا اطلاعات تجربی اولیه برای تعیین سینتیک ذاتی در مقیاس آزمایشگاهی توسط کاتالیست پودری و در شرایط ایزوترمال و فشار اتمسفریک تهیه می‌شوند. دومین گام تعیین پارامترهای تاثیرگذار (محدود کننده) نظیر انتقال جرم، حرارت و ... در فاز یا فازهای مربوطه است. هرچه از مقیاس آزمایشگاهی دورتر می‌رویم، تاثیر این پارامترهای بیشتر می‌گردد و لذا دقت استفاده از سینتیک ذاتی در طراحی شدیداً کاهش می‌یابد. مقیاس آزمایشگاهی اطلاعات کمی در زمینه تاثیر پارامترهایی چون نقش انتقال جرم و حرارت در واکنش‌های اصلی و جانبی، انباشت حرارت و میزان تولید گازهای خطرناک می‌دهد. بنابراین معادلات بدست آمده در فاز قبلی باید در مقیاس‌های بالاتر در شرایط واقعی‌تر بررسی و تصحیح شوند، لذا با استفاده از اطلاعات تجربی بدست آمده در مقیاس آزمایشگاهی سینتیک واقعی با بکارگیری کاتالیست صنعتی و در شرایط فرآیندی تعیین می‌شود. معادله سرعت حاصل شده سپس با معادلات انتقال جرم و حرارت ترکیب شده و مبنای طراحی واحد پیش‌تاز می‌گردد. این مدل بدست آمده با اطلاعات موجود از راکتورهای صنعتی مشابه (در صورت وجود) مقایسه و تصحیح می‌شود. تلفیق مدل نهایی سرعت واکنش با موازنه مومنتم و حل همزمان معادلات، مدل جامع رفتار راکتور را بدست خواهد داد. با توجه به پیچیدگی معادلات و حجم بسیار زیاد محاسبات در این مرحله از نرم‌افزارهای مناسب برای حل استفاده می‌گردد. نیز از آنجایی که معادلات حاصل بندرت قابل حل بروش تحلیل می‌باشند لذا از روش‌های حل عددی در این حالت استفاده فراوانی می‌شود. امروزه مدل‌سازی و انجام محاسبات این روش معمولاً با رویکرد استفاده از CFD (10) انجام می‌گردد. از مهمترین دلایل استفاده از تکنیک CFD توجه به این نکته است که علیرغم در نظر گرفتن جنبه‌های تشابه دو سیستم، باز هم در افزایش مقیاس امکان بروز و ظهور غیر ایده‌آلی‌هایی در سیستم وجود دارد که در مقیاس کوچکتر مشاهده نمی‌شود. از جمله این غیر ایده‌آلی‌ها می‌توان به تشکیل نواحی یا نقاط مرده در سیستم اشاره نمود. در این حالت آنالیز CFD کمک موثری در شناخت نقاط دارای بردارهای سرعت و غلظت و ... متفاوت داشته و لذا کمک قابل ملاحظه‌ای در شناخت مخاطرات احتمالی در مقیاس جدید (تشکیل نقاط داغ و ...) می‌باشد.

## معادلات تجربی (22)

این روش در واقع دارای مبنای روش قبل بوده و تنها تفاوت آن، نوع معادلات و روش‌های تعیین آنها است. مطابق با روش قبل، بر مبنای داده‌های تجربی تهیه شده برای پدیده‌های انتقال قید شده معادلات تجربی حاکم بر سیستم تعیین و روند لازم برای افزایش مقیاس تعیین می‌شود. تمام معادلات در قالب روابط تجربی دقیق بیان شده و با حل همزمان آنها می‌توان مدل جامعی از فرآیند را تبیین نمود و طراحی مناسب را برای ظرفیت موردنظر انجام داد. این روش بسیار دقیق و کارآمد است، و با تعیین مدل تجربی دقیق فرآیند و معادلات مربوطه می‌توان با دقت بسیار بالایی تغییر مقیاس مناسب را بر سیستم اعمال نمود. برخلاف روش قبل، این روش برای اغلب



موارد حتی مواردی که دارای رفتار بسیار پیچیده می‌باشند قابل استفاده بوده و دارای دقت بالایی می‌باشد. برای پیشبرد کار ابتدا با استفاده از اطلاعات تجربی بدست آمده در مقیاس آزمایشگاهی، سینتیک واقعی با استفاده از کاتالیست صنعتی و در شرایط فرآیندی بصورت مستقیم تعیین می‌شود. مدل سینتیکی می‌تواند بصورت معادلاتی متفاوت با مدل‌های متداول سینتیکی بیان شده و تنها بیان دقیق از موازنه جرم حاکم بر سیستم در شرایط مورد بررسی باشد. با بهینه‌سازی روابط برای گستره بیشتری از پارامترها و تشکیل دستگاه معادلات می‌توان بصورت مجازی رفتار سینتیکی سیستم را تبیین نمود. معادله سرعت تجربی حاصل شده سپس با معادلات تجربی انتقال جرم و حرارت ترکیب شده و مبنای طراحی واحد پیشتاز می‌گردد. مدل بدست آمده با اطلاعات موجود از فرآیند مشابه (در صورت وجود) مقایسه و تصحیح می‌شود. از سوی دیگر در سیستم دارای تشابه مناسب، اطلاعات تجربی برای مدل‌سازی رفتار هیدرودینامیکی تهیه و مدل هیدرودینامیکی نهائی سیستم تعیین می‌گردد. در نهایت تلفیق مدل نهایی سرعت واکنش با مدل مومنت مبنای طراحی خواهد بود.

### تحلیل رژیم جریانی و کاهش مقیاس

در این روش اطلاعات موجود در یک مقیاس نیمه‌صنعتی و یا صنعتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تحلیل دقیق سیستم سعی می‌شود پارامترها و رفتارهای سیستم مدل شده و در قالب اطلاعات تئوریک توسعه یافته بر مبنای داده‌های تجربی واقعی سیستم مدل صحیحی از رفتار سیستم بدست آید. این مدل باید پاسخگویی قابل قبول و کم‌خطایی از سیستم اصلی را داشته و بتواند رفتارهای آنرا در شرایط مختلف پیش‌بینی نماید. شبیه‌سازی حاصل از این مدل، که صحت عملکرد آن با داده‌های واقعی در شرایط مختلف تایید گردیده است مورد بهینه‌سازی‌های مد نظر قرار گرفته و در نهایت مبنای طراحی مقیاس‌های جدید خواهد بود. چنانچه دو مقیاس متفاوت از یک فرآیند کاملاً مشابه برای سیستم مورد مطالعه موجود بوده و داده‌های تجربی آندو در دسترس باشد، دقت عملکرد این روش بسیار بالا خواهد بود.

### تکنیک‌های خاص برای سیستم‌های واکنشگر (13، 14، 15، 16 و 17)

مبحث تغییر مقیاس در راکتورهای شیمیایی از پیچیدگی قابل توجهی نسبت به سایر تجهیزات عملیات واحد برخوردار است. دلیل اصلی این امر نیز به تنوع بسیار زیاد واکنش‌های شیمیایی، اطلاعات اندک موجود درباره مکانیزم‌ها و مدل‌های پیش‌بینی رفتار واکنش‌ها و حضور همزمان تمام پدیده‌های انتقال در مقیاس میکرو و ماکرو در محیط واکنش برمی‌گردد. برای سهولت کار معمولاً در طراحی راکتور برای مقیاس جدید ابتدا بررسی‌ها به دو شاخه مرتبط با یکدیگر شامل سینتیک و پدیده‌های انتقال تفکیک می‌شود. بررسی قابلیت تغییر مقیاس از دیدگاه پدیده‌های انتقال و مسایل مرتبط با آن با تکنیک‌های اشاره شده قبلی (آخری) با تکیه بر تکنیک‌های CFD امکان‌پذیر است و در صورت لزوم از مطالعات تجربی بر روی سیستم‌های آزمایشگاهی مشابه طرح جدید استفاده می‌گردد. حال آنکه برای بخش سینتیک روش‌های تئوری و فرمول‌بندی‌های پیشین کارایی لازم را نداشته و در اغلب مواقع باید بررسی‌های کاملاً تجربی در مقیاس‌های مختلف (که در ادامه اشاره خواهد شد) صورت گرفته و بر مبنای اطلاعات بدست آمده مدلی که پاسخگوی نیازهای طراحی در شرایط مدنظر باشد تدوین گردد.

مدل مزبور که کاملاً منحصر به شرایط خاص فرآیندی است که اطلاعات تجربی برای آن شرایط تهیه شده‌اند (شکل بستر، شرایط عملیاتی، کاتالیست و ...) می‌تواند از مبنای تئوری‌های سینتیک منتج شده باشد. این امر بندرت و برای تعداد واکنش‌های کم با مکانیزم‌های ساده رخ می‌دهد، که در این صورت بر اساس داده‌های تجربی سعی در تعیین ضرایب معادلات سینتیک و نیز وزن واکنش‌های مختلف (موازی، رقابتی، برگشتی و ...) رخ داده در سیستم می‌شود. با این وجود بیشتر فرآیندهای پتروشیمیایی دچار پیچیدگی مکانیزم و تعدد واکنش‌ها هستند، که این موضوع تلاش برای فرموله کردن آنها بر شالوده قوانین علم سینتیک را بسیار دشوار می‌نماید. در چنین شرایطی ناگزیر به استفاده از روش‌های به اصطلاح جعبه مسدود<sup>۱</sup> خواهیم بود. در این روش به کل محیط واکنش به صورت جعبه‌ای نگریسته می‌شود که عملکردی در آن وجود دارد که ورودی (ها) را تبدیل به خروجی (ها) می‌کند. تنها مشکل تعیین عملکردی است که با دقت کافی نتایجی شبیه نتایج مقیاس واقعی گزارش کند. در این روش دو موضوع مقدار کافی از داده‌های مناسب و انتخاب عملکردی مناسب اهمیت دارد.

۱- Block Box



برای تعیین تناسب داده‌ها می‌توان از تکنیک‌هایی نظیر طراحی آزمایشات بهره برد (18). با این وجود حتی استفاده از طراحی آزمایشات نافی اهمیت نیاز به حجم بالای داده‌های تجربی در شرایط مناسب فرآیندی نیست. نیز باید توجه داشت که ارائه یک مدل قابل استفاده برای طراحی مستلزم در نظر گرفتن تمام حالت‌های محتمل فرآیندی نظیر راه‌اندازی واحد، کاتالیست تازه، کاتالیست مستعمل، توقف واحد و ... تهیه داده کافی برای این حالت‌ها است. در ادامه به نمونه‌ای از مقیاس‌های لازم برای کسب این اطلاعات پرداخته خواهد شد. در انتخاب عملگر می‌توان از طیف گسترده‌ای از تکنیک‌ها نظیر پرازش داده‌ها بر روی منحنی<sup>۱</sup> (ساده‌ترین راه برای شروع) تا شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک، منطق فازی و... را نام برد (19). در گام بعدی، مهمترین پارامتر کنترل‌کننده، اطمینان از عملکرد صحیح راکتور طراحی شده با ظرفیت جدید است که شامل جنبه‌های ایمنی، زیست محیطی، پایداری فرآیندی، بازده و کیفیت محصولات می‌گردد. عبارت دیگر طراحی قابل قبول خواهد بود که کیفیت محصولی کاملاً مطابق با حداقل نیازمندی‌های عملیات واحد پایین دست موجود در فرآیند بدهد، بازده مناسب داشته باشد (بازده در این حالت به مفهوم نسبت محصول مطلوب تولید شده به خوراک فرآیند است)، پایداری فرآیندی آن قابل قبول باشد و سرانجام مسایل ایمنی و زیست‌محیطی در آن رعایت شده باشند (20).

### مقیاس‌های مطرح در طراحی فرآیندها

در انتخاب مقیاس مناسب برای طراحی، در قدم اول باید سعی نمود که نزدیکترین ظرفیت موجود به ظرفیت مد نظر بعنوان مبنای طراحی انتخاب شده و با اعمال کمترین تغییرات در پارامترها و مشخصات سیستم، به ظرفیت مد نظر رسید. هر چه ظرفیت موجود به ظرفیت مد نظر نزدیکتر باشد، میزان تغییرات اعمال شده در پارامترهای سیستم کاهش خواهد یافت و میزان خطای ناشی از تغییر ظرفیت کمتر خواهد بود. برای تمام فرآیندهای شناخته شده صنایع پتروشیمی، حداقل ظرفیت مجاز برای تضمین طراحی یک واحد صنعتی، واحد پیش‌تاز می‌باشد. از دیدگاه کلی، برای توسعه یک فرآیند از مرحله کارهای آزمایشگاهی اولیه، مراحل زیر بایستی طی گردند:

- مقیاس تست‌های راکتور آزمایشگاهی کوچک
- مقیاس تست‌های راکتوری در ظرفیت آزمایشگاهی
- مقیاس تست‌های فرآیندی در ظرفیت واحد پیش‌تاز<sup>۲</sup>
- مقیاس تست‌های فرآیندی و بهینه‌سازی در مقیاس نیمه صنعتی نمایشی<sup>۳</sup>
- مقیاس صنعتی

بسته به پیچیدگی فرآیند، در واکنش‌های صورت گرفته و سایر پدیده‌های مطرح، ضریب افزایش مقیاس و سطح پیچیدگی پارامترهای مورد بررسی در هریک از مراحل بالا متفاوت بوده و در بسیاری از موارد، مراحل 2 و 3 خود به چند ظرفیت دیگر تقسیم می‌شوند تا حداکثر شناخت نسبت به پارامترهای کمتر شناخته شده حاصل شود. ترکیبی از مدل تولید شده توسط اطلاعات واحد پیش‌تاز و بهبود یافته توسط مقایسه آن با نتایج واحد صنعتی، مسیر مطمئنی برای تغییر مقیاس فرآیند خواهد بود.

### واحد آزمایشگاهی

به سیستمی اطلاق می‌شود که دارای مقیاس بسیار کوچک (مقدار کاتالیست بستر تا 20 گرم) بوده و در شرایط نزدیک به فشار اتمسفریک عمل می‌کند، و عمدتاً جهت تعیین سینتیک ذاتی فرآیند استفاده می‌شود. معمولاً شرایط انتقال حرارت در چنین سیستمی بصورت کاملاً ایزوترمال در نظر گرفته می‌شود. نیز با استفاده از حالت پودری برای کاتالیزر، حتی الامکان سعی می‌شود تا بر مقاومت‌های انتقال جرم ناشی از نفوذ در حفرات کاتالیست غلبه گردد. چنین واحدی می‌تواند اطلاعاتی از واکنش را در اختیار بگذارد که کاملاً معطوف به سینتیک ذاتی بوده و کمترین اغتشاش ناشی از پدیده‌های انتقال (جرم، حرارت، مومنتم) و هیدرودینامیک (توزیع زمان ماند) را

۱- Curve Fitting

۲- Pilot Plant

۳- Demonstration



داراست. سینتیک حاصل از بررسی‌های انجام شده از این مقیاس بنام سینتیک ذاتی معروف است که تابعی از خصلت ماهوی واکنش و نوع کاتالیزر استفاده شده است. چنین سینتیکی اطلاعات ذیقیمتی برای پیش‌بینی رفتار کیفی سیستم در اختیار می‌گذارد، ولی بتنهایی قابل استفاده برای طراحی مقیاس‌های بالاتر نمی‌باشد. بطور کلی می‌توان گفت تعیین سینتیک ذاتی شرط لازم و نه کافی برای تعیین مدل تئوریک و دقیق واکنش‌های موجود در طول فرآیند است که البته در مورد روش‌هایی که بر معادلات تجربی بعنوان مبنای تغییر مقیاس تاکید می‌کنند میتوان به طور کامل از این مرحله صرف‌نظر نمود.

بزرگترین نقش سیستم تست راکتوری آزمایشگاهی در بهینه‌سازی کاتالیزرهای در حال توسعه است، مرحله‌ای که هنوز فرمولاسیون کاتالیزر نهایی نشده است و تلاش برای توسعه و بهبود آن به منظور دستیابی به حداکثر پایداری، انتخاب‌پذیری و بازده در جریان می‌باشد. اطلاعات تست راکتوری این مقیاس که فارغ از تاثیر پارامترهای دیگر (ناشی از پدیده‌های انتقال و ...) می‌باشد راهنمای مناسبی برای تعیین فرمولاسیون بهینه کاتالیزور بشمار می‌رود. از یک سیستم تست راکتوری مقیاس آزمایشگاهی می‌توان رفتار سیستم نسبت به تغییرات دما (سینتیک ذاتی)، تغییرات زمان ماند (سینتیک ذاتی و هیدرودینامیک مناسب سیستم) تغییرات فشار جزئی خوراک و تاثیر افزایش مواد مختلف در خوراک بر روی رفتار سیستم واکنش را تعیین نمود.

### واحد مقیاس پایلوت کوچک<sup>۱</sup>

مهمترین تفاوت این مقیاس نسبت به مقیاس آزمایشگاهی، نزدیکتر بودن شرایط فرآیندی (فشار، توزیع دما و زمان ماند) و شکل کاتالیزور بکار رفته در آن به شرایط واقعی است. در مقیاس پایلوت کوچک با از کم کردن محدودیت‌های مقیاس آزمایشگاهی تلاش می‌شود که سینتیک واقعی واکنش‌های انجام شده در سیستم تعیین گردد. با تصحیح توزیع دمای محیط واکنش بر اساس رفتار بین ایزوترمال تا آدیاباتیک مشابه آنچه در فرایند واقعی رخ می‌دهد، تأثیر پارامتر دما بر توزیع محصولات، بازده، سینتیک و غیره مشخص می‌گردد. بهمین ترتیب تصحیح فشار از مقدار نزدیک به اتمسفریک به فشار عملیاتی مناسب، اطلاعات لازم جهت بهینه‌سازی سینتیک اولیه و پیش‌بینی توابعی نظیر توزیع محصولات، بازده و ... را بر اساس تغییر پارامتر فشار بدست می‌دهد. در نهایت استفاده از کاتالیزور در شکل تجاری آن دانش کافی جهت تصحیح مسایل مرتبط با پدیده‌های انتقال (مقاومت‌های انتقال جرم و حرارت) را در اختیار می‌گذارد. بطور کلی مقیاس پایلوت کوچک اطلاعات سینتیکی لازم و نه کافی جهت تعیین مدل‌ها و روابط تجربی حاکم بر فرآیند صنعتی ایجاد می‌نماید. افزون بر آنچه در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، در مقیاس پایلوت کوچک رفتار سیستم نسبت به تغییرات فشار، توزیع غیر یکنواخت دما و سینتیک واقعی فرآیند استخراج می‌گردند.

### واحد پیشتاز

واحد پیشتاز به واحدی گفته می‌شود که دارای ظرفیتی بیش از مقیاس‌های آزمایشگاهی و پایلوت کوچک بوده و شرایط عملکردی بخش واکنش‌های آن کاملاً مشابه شرایط فرآیند صنعتی باشد. در واحد پیشتاز معمولاً بجز بخش واکنش گر مابقی عملیات واحد از اهمیت چندانی برخوردار نبوده و در بیشتر موارد ساده‌سازی قابل توجهی در این قسمت‌ها می‌توان مشاهده نمود، در واقع سایر بخش‌های فرآیند زمانی اهمیت می‌یابند که تأثیر مستقیمی بر بخش واکنش داشته باشند و یا اینکه بدلیل پیچیدگی‌های خاص موجود در ماهیت عملکردی آنها، اهداف پژوهشی مشخصی نیز برای آنها در نظر گرفته شده باشد. در چنین حالاتی واحد پیشتاز دارای طراحی پیچیده‌تری بوده و سایر بخش‌های فرآیند آن نیز که از اهمیت برخوردار می‌باشند مشابه واحد صنعتی طراحی و ساخته می‌شوند. اطلاعاتی که از یک واحد پیشتاز می‌توان استخراج نمود شامل محدوده گسترده‌ای نظیر شرایط عملیاتی بهینه، پارامترهای طراحی، مبانی طراحی راکتور صنعتی، مشکلات و ریزه‌کاری‌های بهره‌برداری، روند بهره‌برداری، روشهای نمونه‌گیری، پایداری فرآیند، مسایل تعادلات فازی و مباحث جداسازی، ناخالصی‌های خوراک، مواد شیمیایی و محصولات، خوردگی و رسوب‌گذاری، مسایل زیست محیطی و ایمنی، و در نهایت بازیافت دورریزها می‌گردد.

### واحد نیمه صنعتی یا نمایشی

۱- Bench





اطلاعات بدست آمده از واحد پیشتاز در بیشتر موارد برای طراحی واحد صنعتی قابل استفاده می‌باشد. با این وجود در مورد فرآیندهای جدید پیچیده‌ای که دارای ساختار کنترل فرآیندی گسترده بوده و از چند بخش واکنش با عملکرد مرتبط با همدیگر و جریان‌های برگشتی تشکیل شده‌اند، برای اطمینان از صحت عملکرد کل فرآیند و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی، نیز ایجاد بستر مناسب مهندسی برای طراحی مطمئن واحدهای تولیدی و ارائه تضمین به مشتری، واحد نیمه صنعتی فرآیند احداث می‌گردد. واحد نیمه صنعتی از نظر نوع و تعداد تجهیزات ساختار فرآیند و فلسفه کنترل کاملاً مشابه فرآیند اصلی می‌باشد. در بهره‌برداری از واحد نیمه صنعتی تمام تلاش و کوشش در جمع‌آوری مطالعات به منظور بهینه‌سازی نهایی جنبه‌های فرآیندی طرح نهایی است.

### سرفصل‌های آموزشی مرتبط با تغییر مقیاس (23، 24، 25، 26، 27 و 28)

با توضیحاتی که در بخش‌های قبل ارائه شد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اصول و مبانی تغییر مقیاس تا حد قابل توجهی برگرفته از دروس اصلی مهندسی شیمی می‌باشد، که مکمل یکدیگر بوده و در کنار هم مراحل تغییر مقیاس از واحد آزمایشگاهی تا واحد صنعتی را پوشش می‌دهند. به نظر می‌رسد برگزاری یک دوره 4 واحدی و یا دو دوره 3 واحدی مقدماتی و پیشرفته تغییر مقیاس می‌تواند آشنایی لازم با رئوس اصلی و مراحل انجام تغییر مقیاس را برای دانشجویان و پژوهشگران علاقه‌مند در این زمینه مهیا نماید. در ادامه سرفصل‌هایی که در دوره آموزشی تغییر مقیاس حائز اهمیت بوده پیشنهاد گردیده است.

#### مبانی طراحی واحد آزمایشگاهی

هنگامی که هدف ما از طراحی و ساخت یک واحد آزمایشگاهی، تغییر مقیاس باشد، بایستی این سرفصل با جزئیات کافی در دو تا سه جلسه از دوره تغییر مقیاس مطرح گردد، که مهمترین آنها به شرح ذیل می‌باشد:

- **تعیین ظرفیت واحد آزمایشگاهی**

معرفی و ارائه تکنیک‌های تعیین ظرفیت واحد آزمایشگاهی به‌گونه‌ای که نتایج حاصل قابل استفاده در افزایش مقیاس واحد باشد و ارائه منابع مرتبط با ضرائب افزایش مقیاس برای سیستم‌های واکنش در نظر گرفته شده در این مقیاس.

- **معرفی بخش‌های مهم و پیچیده فرآیند**

یکی دیگر از بخش‌های مهم در طراحی واحد آزمایشگاهی، بحث و معرفی بخش‌های مهم فرآیند مانند راکتور و سیستم‌های خاص می‌باشد، که در تعیین مدل سینتیکی، حرارتی و ترمودینامیکی حائز اهمیت هستند. از اینرو بازنگری مبانی دروس ترمودینامیک، راکتور و حرارت و معرفی برنامه‌های قابل کاربرد در این زمینه ضروری است.

- **سیستم کنترل و نمونه‌گیری**

معرفی روش‌ها و سیستم‌های کنترلی اصلی واحد آزمایشگاهی با توجه به فرآیند و تعیین محل‌های نمونه‌گیری، به‌طوری که نتایج بدست آمده از آن قابل اعتماد باشد.

- **معرفی روش‌های برنامه‌ریزی انجام آزمایشات**

معرفی و آشنایی با برنامه‌ها و روش‌های انجام آزمایشات و تحلیل نتایج آنها که می‌تواند در کاهش زمان، هزینه و رسیدن به حالت بهینه مفید واقع گردد که از جمله آن می‌توان به روش‌های زیر اشاره نمود:

تاگوچی، Curve Fitting و Mixture، Response Surface، البته معرفی و آموزش هر کدام از این روش‌ها می‌تواند در قالب یک دوره 3 تا 5 روزه در نظر گرفته شود.

#### تعیین محدودیت‌های طراحی

- **معرفی و آشنایی با استانداردها**

معرفی استانداردهای فرآیندی و آشنایی با آنها در تغییر مقیاس بسیار حائز اهمیت می‌باشد. دانش روش استفاده از این استانداردها در انجام صحیح طراحی بسیار موثر است.

#### تعیین ظرفیت واحد

آشنایی با پارامترهای مهم در تعیین ظرفیت واحد مانند آنالیز نتایج، بررسی فنی و اقتصادی، بررسی محدودیت های فرآیندی، طراحی و بهره برداری در راستای تغییر مقیاس و تعیین ظرفیت واحد به گونه‌ای که بتوان موارد فوق را بهینه کرد، حائز اهمیت است.

#### • بررسی فنی و اقتصادی

بررسی فنی و اقتصادی در تغییر مقیاس به دو بخش مهم تقسیم می شود، که می توان به طور مجزا در یک دوره 2 واحدی ارائه نمود، ولی خلاصه آن و توجه به نکات مهم در زمینه تغییر مقیاس را می توان در 3 تا 4 جلسه برای دانشجویان جمع بندی نمود.

#### ○ بررسی اقتصادی فرایند

آشنایی با ملاحظات و ضرورت های انجام بررسی و محاسبات اقتصادی با لحاظ شرایط محیطی، فرایندی، عرضه و تقاضای بازار به منظور تعیین ظرفیت واحد صنعتی.

#### ○ بررسی فنی و اقتصادی تجهیزات

آشنایی با ملاحظات و ضرورت های انجام بررسی فنی و اقتصادی به منظور انتخاب نوع تجهیزات با توجه به شرایط فرآیندی. از اینرو بازنگری مبانی مطرح شده در دروس اقتصاد مهندسی و آشنایی با برنامه های بررسی اقتصادی مانند Aspen Icarus و Comfar حائز اهمیت می باشد.

### شناخت کامل فرآیند، تجهیزات، فلسفه کنترل، روش بهره برداری

معرفی پارامترهای مهم جهت آشنایی کامل و جامع در زمینه موارد فوق، در تشخیص و پیش بینی شرایط بحرانی واحد بسیار حائز اهمیت می باشد. نتایج بدست آمده در این مرحله در تدوین سیستم کنترلی دقیق، دستورالعمل راه اندازی و توقف واحد کاربرد فراوانی دارد.

### آشنایی با تکنیک های تغییر مقیاس

همانطور که اشاره شد روش های متعددی برای تغییر مقیاس وجود دارد که معمولا با توجه به شرایط و تجهیزات فرآیندی به صورت مجزا و یا ترکیبی مورد استفاده قرار می گیرند. از اینرو معرفی تکنیک های شبیه سازی در روش های تغییر مقیاس، نحوه کاربرد و حل معادلات آنها یکی از بخش های مهم در دوره تغییر مقیاس می باشد و می توان 8 تا 10 جلسه در مورد آنها صحبت کرد.

#### • تکنیک های مدل سازی

از آنجائیکه با تغییر ابعاد و ظرفیت واحد پدیده های کنترل کننده نیز تغییر می کنند، لذا بررسی پدیده های انتقال جرم، حرارت، مومنتوم و تعیین عامل محدود کننده و کنترل کننده در تغییر مقیاس حائز اهمیت می باشد، از اینرو آگاهی از مفاهیم مرتبط و آشنایی با برنامه های CFD و ... در این راستا برای دانشجویان بسیار مفید واقع می گردد.

#### • تکنیک های شبیه سازی

با تغییر ظرفیت واحد و تغییر سایز تجهیزات، در بعضی موارد نیاز به تغییرات جزئی در فرآیند می باشد، شناخت و آشنایی با برنامه های شبیه ساز مانند Aspen، Hysys و ... می تواند کارساز باشد و امکان و تاثیر این تغییرات را بر واحد نشان دهد، بنابراین معرفی و آشنایی با برنامه های شبیه ساز در این راستا حائز اهمیت می باشد. البته آموزش هر کدام از این برنامه های شبیه ساز در غالب یک دوره چند روز قابل انجام می باشد.

#### • توانایی شناسایی و ارزیابی مشکلات احتمالی فرآیند و محاسبه ریسک<sup>۱</sup> برای واحد و ارائه راه حل

با افزایش مقیاس و بزرگ شدن تجهیزات احتمال انتشار مواد فرایندی، خرابی در سیستم کنترل، اشتباهات بهره برداری و سایر موارد حادثه ساز در واحد افزایش پیدا می کند، از اینرو توانایی شناسایی موارد پرخطر، تعریف سناریوهای مختلف، پیش گیری از وقوع آنها و یافتن راه حل مناسب در مبحث تغییر مقیاس بسیار مهم می باشد. از اینرو معرفی و آشنایی با مفاهیم و نرم افزار مرتبط مانند PHA-Pro به صورت یک دوره چند هفته ای بسیار حائز اهمیت می باشد.

1- Risk assessment study



• **بررسی مسائل ایمنی و خطرآفرین واحد**

در ادامه بحث تحلیل ریسک افزایش ضریب ایمنی واحد از نظر ایمنی تجهیزات و نیروی انسانی بسیار حائز اهمیت بوده و باید تدابیر امنیتی لازم در مواقع پرخطر لحاظ گردد. لذا این موضوع در ادامه مبحث قبلی در غالب یک دوره 2 جلسه‌ای قابل ارائه می‌باشد.

• **تکنیک‌های بهینه‌سازی**

به منظور حداقل کردن تاثیر تغییر مقیاس بر روی راندمان، انتخاب‌پذیری و درجه خلوص محصول تکنیک‌های بهینه‌سازی در بحث تغییر مقیاس مطرح می‌شوند. از اینرو معرفی و آشنایی با این روش‌ها هم در مقیاس آزمایشگاهی و هم در مقیاس صنعتی برای کارآموزان دوره تغییر مقیاس حائز اهمیت می‌باشد.

• **بررسی ملاحظات مهندسی**

آشنایی و آگاهی از ملاحظات مکانیکی و متالوژی در طراحی، ساخت، انتخاب مواد و بهره‌برداری از تجهیزات در تغییر مقیاس حائز اهمیت است، از اینرو آشنایی با این موارد برای کارآموزان دوره تغییر مقیاس لازم و ضروری می‌باشد.

**از آزمایشگاه تا واحد نمایشی، تجربه موفق MTP (22)**

ایده اولیه فرآیند تبدیل متانول به پروپیلن نخستین بار طی یک همکاری مشترک بین شرکت‌های سودکیمی ( Sud Chemie) به عنوان سازنده کاتالیست و شرکت لورگی (Lurgi) بعنوان توسعه دهنده فرآیند مطرح گردید. با بهبود و تکمیل کاتالیست جدید توسط شرکت سودکیمی، شرکت لورگی برآن شد تا فرآیند مناسبی بر مبنای کاتالیست مزبور طراحی و در صورت قابل قبول بودن، نتایج آنرا برای مقیاس‌های بالاتر توسعه دهد. در ادامه مراحل انجام این پروژه از مرحله آزمایشگاهی تا مقیاس واحد نمایشی مرور می‌گردد.

**طراحی راکتور**

تست‌های میکروراکتوری اولین مرحله از تدوین فرآیند بودند که اطلاعات حاصل از آنها نکات کلیدی زیر را ارائه دادند: (1) بیشترین دمای عملیاتی مجاز در بستر واکنشگر 500 درجه سانتی‌گراد می‌باشد و کاتالیست در دماهای بالاتر آسیب خواهد دید (2) فرآیند بشدت گرماساز (3) فرآیند بخوبی در فشارهای پایین انجام‌پذیر است (4) کاتالیست بشدت نسبت به حضور ترکیبات آمین‌دار و کلردار حساس می‌باشد.

در گام بعدی تجهیزات آزمایشگاهی تک‌بستره برای بررسی رفتار کاتالیست در شکل واقعی در یک راکتور بستر ثابت بررسی شد. راکتور استفاده شده بصورت بستر لوله‌ای آدیاباتیک بود. کاتالیست در این راکتور در عمق‌های بستر متفاوت قرار داده شد، بطوری که دمای خروجی بستر از 490 درجه سانتی‌گراد تجاوز ننماید (محدودیت افزایش عمق بستر)، و نیز میزان تبدیل متانول (و دی‌متیل اتر) در خروجی بستر 100% باشد (محدودیت کمترین عمق مجاز). تابع هدف نیز بیشینه نمودن سرعت واکنش‌ها (افزایش دمای بستر) بمنظور بهینه نمودن ابعاد تجهیزات فرآیند صنعتی و نیز بهینه‌سازی توزیع محصول و کاهش محصولات جانبی در نظر گرفته شد. اقدام دیگری که جهت بهبود عملکرد سیستم راکتوری انجام گردید افزودن یک مرحله راکتور جهت تبدیل متانول به دی‌متیل اتر (DME) قبل از راکتور تولید پروپیلن بود. طبق نتایج حاصل از تست‌های انجام شده عمق بستر بهینه برای راکتور در دماهای مختلف خوراک در سرعت فضایی 1 و فشار 2 بار تعیین گردید. با توجه به نتایج گردآوری شده در شرایط فوق، در انتهای این مرحله روش طراحی راکتور با مقیاس بالاتر بر اساس گزاره‌های زیر تعیین شد (1) در عمق بستری حدود 30 سانتی‌متر، راندمان تبدیل متانول/دی‌متیل اتر به محصولات 100% خواهد بود (2) دمای ورودی خوراک برای چنین بستری باید کمتر از 460 درجه سانتی‌گراد باشد تا دمای خروجی در مقدار مجاز باقی بماند (3) افزایش عمق بستر باید همراه با کاهش دمای ورودی خوراک باشد که سبب کاهش سرعت واکنش و افزایش تولید مواد جانبی می‌شود (4) افزایش دما، گزینش‌پذیری تولید پروپیلن را افزایش می‌دهد (5) کاهش بیش از حد عمق بستر سبب کاهش راندمان تبدیل خوراک و خروج متانول و دی‌متیل اتر واکنش نداده از بستر خواهد بود.

با توجه به ماهیت به شدت گرماسازی واکنش‌های انجام شده در محیط واکنش، توجه مهندسی توسعه دهنده فرآیند به روش‌های طراحی راکتور مناسب معطوف گردید. هدف نهایی طراحی راکتوری بود که بتواند نیمرخ دمایی مشابه همدمای را در حداکثر دمای مناسب برای توزیع مناسب محصول و پایداری کاتالیست ارائه دهد. اینکار مستلزم طراحی سامانه‌ای جهت حذف و یا کاهش حرارت تولید شده در بستر از یک سو، و روشی برای تزریق خوراک در طول راکتور از سوی دیگر بود. راه‌حل‌های اولیه‌ای چون افزایش سرعت فضایی عبور گاز خوراک از بستر کاتالیست جهت کاهش تجمع حرارتی نقطه‌ای و یا رقیق‌سازی خوراک با استفاده از تزریق مواد خنثی جهت



جذب بخشی از حرارت تولید شده، بدلیل به صرفه نبودن از دیدگاه اقتصاد فرآیند در گام‌های نخست کنار گذاشته شدند. بررسی مشابهی بر روی ساختار راکتوری بستر سیال از جنبه فرآیندی صورت پذیرفت که در نهایت بدلیل پیچیدگی مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری، هزینه‌های بالا، خرد شدن ذرات کاتالیست و همچنین مشکل توزیع نامناسب محصولات بعلت توزیع متفاوت زمان ماند در اینگونه راکتورها کنار گذاشته شد. استفاده از روش‌های سرمایش بستر و لذا افزایش عمق آن نیز بدلیل اشکالات عمده‌ای نظیر پیچیدگی طراحی سیستم سرمایشی کارآمد، احتمال وقوع واکنش‌های جانبی در اثر افزایش زمان ماند خوراک و محصولات، و امکان بروز توزیع نامتقارن دما در بستر و شوک‌های حرارتی در مجاورت سطوح انتقال حرارت به‌مراه اغتشاش در رژیم جریان‌ی مواد واکنشگر در بستر که منجر به توزیع متفاوت محصولات خواهد گردید مورد تایید قرار نگرفت.

از آنجایی که تعیین سینتیک برای واکنش‌های رخ داده در محیط واکنش بسیار پیچیده و در صورت انجام نیز فاقد کارایی لازم جهت تضمین طراحی فرآیند بود، لذا جهت پیش‌گیری از هرگونه خطای پیش‌بینی نشده تصمیم گرفته شد که از روش افزایش مقایسه کاملاً خطی یعنی تکرار بسترها استفاده شود بگونه‌ای که کمترین تفاوت هندسی و رفتاری بین راکتورها در مقیاس‌های مختلف وجود داشته باشد. جهت کسب دانش تجربی کافی برای تکمیل اطلاعات طراحی تصمیم به احداث واحد جدیدی با سامانه چند بستره گرفته شد که انتقال حرارت در آن توسط سرمایش میان‌بستری انجام شده و تک‌تک بسترها بصورت آدیاباتیک عمل کنند. مهمترین هدف واحد چند بستره، تکمیل اطلاعات درباره رفتار فرآیند در اثر تغییر زمان ماند مواد حاصل از واکنش، تعیین عمق مناسب بسترها با آرایش سری و سرانجام بررسی تاثیر افزایش جریان‌های بازگشتی و تعیین موقعیت مناسب بمنظور تزریق آنها به محیط واکنش هدف‌گذاری گردید. سطح مقطع بستر بمنظور اعمال کمترین تغییرات نسبت به تجهیزات آزمایشی قبلی و اطمینان از عدم بروز جریان‌های شعاعی کوچک نگاه داشته شد. جهت خنک‌سازی گاز ورودی به بسترهای دوم به بعد از تزریق آب در حالت مایع استفاده شد. نیز سامانه‌ای برای تزریق متانول و دی‌متیل اتر در ورودی بسترها در نظر گرفته شد که کنترل دبی ایندو را بگونه‌ای تنظیم نماید که جزء مولی آنها در ورودی تمام بسترها مشابه هم‌دیگر باشد.

این سیستم آزمایشی به مدت بیش از 8000 ساعت در شرایط مختلف مورد بهره‌برداری قرار گرفت. طی این مدت تلاش کافی بعمل آمد تا تمام حالت‌های ممکن برای واکنش‌ها و فرآیند نظیر اغتشاش در شرایط خوراک، انواع جریان‌های بازگشتی، چرخه‌های احیا و غیره بازسازی شده و اطلاعات تجربی لازم جهت طراحی فایل شبیه‌سازی فرآیند استخراج شود. در نهایت بر مبنای اطلاعات بدست آمده مدلی تجربی برای تبیین رفتار راکتور پیشنهاد شد.

با اعمال مدل راکتور در در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی، طراحی مفهومی فرآیند آغاز شد. ابتدا نمودار بلوکی فرایند مورد بحث و بررسی قرار گرفت و بر اساس اطلاعات بدست آمده تخمینی از ویژگی‌های خوراک و جریانات محصول مشخص شد. در این مرحله با توجه به آمادگی بدست آمده برای طراحی فرآیند واحد صنعتی، تصمیم بر طراحی و ساخت واحدی آزمایشی جهت نمایش قابلیت‌های فرآیند، کسب دانش فنی و مهندسی برای طراحی فرآیند واقعی و بهبود آن بر مبنای نتایج واحد نمایشی گرفته شد. در نخستین گام با تعیین ظرفیت واحد، نسبت افزایش سطح مقطع بسترها نسبت به تجهیزات تحقیقاتی مشخص گردید. از آنجا که از ابتدا هدف اصلی در افزایش مقیاس راکتور پرهیز از بروز تفاوت در تشابه هندسی، سینتیکی و هیدرودینامیکی مشخص شده بود، لذا از بسترهای با ساختار لانه زنبوری با عمق بستر بدست آمده از نتایج تجربی استفاده شد، بطوری که قطر هیدرولیکی اجزای بستر مشابه قطر لوله بستر تجهیزات آزمایشی پیشین بود. طراحی راکتور دی‌متیل‌اتر بعلت وجود سینتیک واکنش‌های رخ داده در آن بروش‌های شناخته شده مهندسی صورت پذیرفت. در تعیین چیدمان بخش جداسازی نیز بعلت تشابه بسیار با واحدهای الفین، از اطلاعات این فرآیندها در طراحی فرآیند و تجهیزات آن استفاده گردید. تنها تفاوت این بخش با واحدهای الفین وجود دو برج جداسازی جهت جدا نمودن ترکیبات اکسیژن‌دار است، که طراحی آنها بدلیل کمبود اطلاعات کافی تجربی با دقت فراوان و با بیش‌بینی پارامترهای طراحی صورت پذیرفت و بهبود طراحی آنها منوط به کسب دانش کافی در زمینه ترمودینامیک مخلوط متانول، دی‌متیل‌اتر و آب گردید. در طراحی سایر بخش‌ها نظیر چرخه احیا، خدمات جانبی و غیره نیز از دانش موجود مهندسی استفاده شد. در طراحی بخش‌هایی نظیر برج‌ها، سامانه کنترل و راکتورها (بویژه طراحی مکانیکی راکتور MTP و ملحقات داخلی آن) از دانش مهندسی شرکت‌های معتبر سازنده تجهیزات نیز جهت افزایش ضریب اطمینان طراحی استفاده گردید.

**نتیجه گیری:**

در مقطع کنونی که کشور در حال توسعه و گسترش صنایع مادر می‌باشد، توجه به تغییر مقیاس بویژه در زمینه افزایش مقیاس به گونه‌ای که کشور قابلیت توسعه تکنولوژی را از مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت به مقیاس صنعتی داشته باشد، بسیار حائز اهمیت است. همانطور که ملاحظه گردید برای تغییر مقیاس دو رویکرد تئوری و عملی را می‌توان بکار برد. در رویکرد تئوری تلاش بر این است که با شناخت کافی از تمام پارامترهای تاثیر گذار سیستم، مدلسازی رفتاری آن در قالب یک مدل جامع بر مبنای روابط و معادلات پایه و ایجاد ارتباط مناسب بین آنها صورت پذیرد. در رویکرد دیگر، تلاش بر اینست که به ساده‌ترین و مطمئن‌ترین روش ممکن مدلی (حتی مجازی و بدون بنیان تئوری) برای پیشگویی رفتار سیستم در محدوده مورد نظر بر پایه اطلاعات انبوه موجود تدوین گردد، تا مبنای طراحی قرار گیرد. این رویکرد و یا تلفیقی از هر دو، در حال حاضر مبنای تغییر مقیاس در صنعت را تشکیل می‌دهند.

روش‌های متعددی جهت تغییر مقیاس وجود دارند. این روش‌ها معمولاً به تنهایی پاسخگوی دقت مورد نیاز برای تضمین عملکرد صحیح سیستم با ابعاد جدید نبوده و بسته به پیچیدگی سیستم مورد مطالعه، باید ترکیبی از آنها را بکار برد. مهمترین روش‌های تغییر مقیاس شامل تکرار ظرفیت مشخص جهت نیل به ظرفیت مورد نیاز، افزایش تعداد راکتورها و تجهیزات فرآیندی به صورت موازی در یک واحد و یا طراحی یک واحد جدید با ظرفیت مورد نظر می‌باشد. از اینرو توانایی افزایش مقیاس فرایندها یک نیاز آموزشی در دانشکده‌های مهندسی و بویژه مراکز تحقیقاتی می‌باشد. مهندسان شیمی تاثیر متقابل بین پدیده‌های انتقال، طراحی فیزیکی تجهیزات و مشخصات عملیاتی را می‌دانند و می‌توانند پیش‌بینی‌هایی در خصوص تغییر محصولات و شرایط عملیاتی در قبال افزایش مقیاس داشته باشند. لذا دانشجویان و محققان با مبانی و مفاهیم تغییر مقیاس آشنا بوده و می‌توان به منظور بالا بردن قابلیت آنها در تحلیل مسائل و آشنایی بیشتر با مراحل انجام تغییر مقیاس، دو دوره سه واحدی با توجه به سرفصل‌های آموزشی مطرح شده، آماده و ارائه نمود. به این ترتیب ضعف موجود در زمینه توسعه تکنولوژی تا حد زیادی برطرف خواهد شد و کشور به نیروهای متخصص در این زمینه تجهیز شده و علاوه بر کاهش وابستگی به خرید تکنولوژی از شرکت‌های خارجی، باعث بازگشت سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در زمینه تحقیقات و پژوهش در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی خواهد شد.

## مراجع:

۱. Nico Oosterhuis, "Scaleup of Bioreactors"; Apr. ۲۰۰۶, Presented at AALBORG UNIVERSITET ESBJERG
۲. "Crystallization and Precipitation Engineering"; Jones A., Zauner R., Rigopoulos S., Presented at University College London
۳. Walas Stanly M., "Chemical Process Equipment, Selection and Design"; ۱۹۹۰, ISBN: ۰-۷۵۰۶-۹۳۸۵-۱
۴. Branan C., "Rules of Thumb for Chemical Engineers"; Third Edition, ISBN: ۰-۷۵۰۶-۷۵۶۷-۵
۵. Ludwig E., Third Edition, "Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants"; ISBN: ۰-۷۵۰۶-۷۷۶۶-۰
۶. Zlokarnik M., "Scale-up in Chemical Engineering"; ۲۰۰۲, ISBN: ۳-۵۲۷-۳۰۲۶۶-۲
۷. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., "Transport phenomena"; ۲nd Edition, ISBN: ۰۴۷۱
۸. Robert E. Treybal, "Mass-Transfer Operations"; ۱۹۸۰, ISBN-۱۰: ۰-۰۷۰۶-۵۱۷۶-۰
۹. B.A. Finlayson, "Introduction to Chemical Engineering Computing"; ۲۰۰۶, ISBN: ۰-۴۷۱۷-۴۰۶۲-۴
۱۰. Guy B. Marin, "Advances in Chemical Engineering, Vol ۳۱, Computational Fluid Dynamics"; ۲۰۰۶, ISBN: ۰۱۲۰۰۸۵۳۱۳
۱۱. Octave Levenspiel, "Modeling in chemical engineering"; Chemical Engineering Science ۵۷ (۲۰۰۲) ۴۶۹۱ – ۴۶۹۶
۱۲. Warren M. Rohsenow, James R Hartnett, Young I. Cho, "Handbook of Heat Transfer"; Third Edition, ۱۹۹۸, ISBN ۰-۰۷-۰۵۳۵۵۵-۸
۱۳. Nauman E. B., ۲۰۰۲, "Chemical Reactor Design, Optimization and Scaleup"; ISBN: ۰-۰۷-۱۳۷۷۵۳-۰
۱۴. Kayode Coker A., "Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design"; ۲۰۰۱, ISBN: ۰-۸۸۴۱۵-۴۸۱-۵
۱۵. Charles G Hill, "An Introduction to Chemical Engineering Kinetics & Reactor Design"; ۱۹۷۷, ISBN ۰-۴۷۱-۳۹۶۰۹-۵
۱۶. M.P. Dudukovic, "Advances in Scale-Up of Multiphase Systems"; AIChE Process Development Symposium (PDS), Palm Springs, California, June ۱۱-۱۴, ۲۰۰۶
۱۷. Bakker A., Fasano J. B., "Turbulent Mixing and Chemical Reaction in Stirred Tanks"; Published in "The Online CFM Book" at <http://www.bakker.org/cfm>.
۱۸. Zivorad R. Lazic, "Design of Experiments in Chemical Engineering"; ۲۰۰۴, ISBN: ۳-۵۲۷-۳۱۱۴۲-۴
۱۹. Sandhya Samarasinghe, "Neural Networks for Applied Science and Engineering"; ۲۰۰۷, ISBN: ۰-۸۴۹۳-۳۳۷۵-۰
۲۰. "Safety Issues in the Scaleup of Chemical Reactions"; Royal Society of Chemistry, Environment/Health and Safety Committee, <http://www.rsc.org>
۲۱. "Perry's Chemical Engineers' Handbook"; ۸th Edition,  
22. آرش فیروزی، "تحلیل روند افزایش مقیاس در فرایند MTP"؛ اولین کنفرانس پتروشیمی ایران، 1386
۲۳. Francis X. Mc Conville, The Do's and Don'ts of Scale Up Training Course , CEP, October ۲۰۰۷
۲۴. E. M. Bower, Pilot Plant and Scale-up Methods for industrial Mixing Training Course, in Philadelphia, Pennsylvania, June ۲۰۰۷.
۲۵. C. Kumaresan, Pilot Scale-up and Process Control in Product Development, Pharma Times, Vol. ۴۰, Feb ۲۰۰۸, P-۱۱-۱۵
۲۶. Safety Issues In The Scale Up Of Chemical Reactions, Health and Safety Committee, Sep ۲۰۰۷
۲۷. Dr Francis X. McConville, Secrets of Batch Process Scale-up Training Course, Sep. ۲۰۰۹