

# نقش مهندسان شیمی و شیمیست‌ها در طراحی و عملیات واحدهای نیمه صنعتی

مهرداد مظفریان، منوچهر نیک آذر و سیما مهدیزاده

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

**چکیده:** در این مقاله ضمن برشمردن وظایف مهندسان شیمی و شیمیست‌ها و معرفی جایگاه آنها و نحوه مشارکت و همکاریشان در توسعه فرایندها، نشان داده شده است که دیدگاه نسبتاً متداولی که کارهای آزمایشگاهی را منحصرأً وظایف شیمیست‌ها و مراحل طراحی و ساخت و بهره‌برداری از واحدهای نیمه صنعتی را فقط خاص مهندسان شیمی می‌داند، صحیح نیست و این دو گروه در تمام مراحل توسعه طرحها باید همکاری مستمر و مشترکی داشته باشند.

## ۱. مقدمه

پیشرفت مؤثر در فرایندهای شیمیایی، نیاز به تلفیق مهارتها، دانش و تجربه شیمیستها و مهندسان شیمی دارد. این گروه از متخصصان، توسعه فرایند را از دیدگاههای مختلفی دیده‌اند و اهداف گوناگونی را دنبال می‌کنند. ارزیابی وظایف هر یک از آنها نیاز به داشتن درکی روشن از تمام عوامل مؤثر بر توسعه فرایند است که این دو گروه می‌توانند آن را تأمین کنند.

انجام دادن مرحله را مراحل نیمه‌صنعتی یک طرح<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از اقدامات توسعه مطرح است و هر گروه با متخصصان خود، طراحی و عملیات واحد نیمه‌صنعتی را بر عهده گرفته‌اند و در صدد یافتن اطلاعات دقیقی هستند.

در این مقاله سعی شده است که با مرور اهداف مختلف عملیات پایلوت، مزایای بهره‌گیری از نظرهای کارشناسی مهندسی شیمی بررسی شود. این مزایا می‌تواند در طراحی نهایی واحد اصلی و آزمایشهای آزمایشگاهی آینده مورد استفاده قرارگیرد.

## ۲. وظایف شیمیستها و مهندسان شیمی

جهت آگاهی از کمکها و همکاریها و نقش این دو گروه در برنامه توسعه فرایندها، لازم است که برداشتی صحیح از اصول دانش هر دو گروه، دیدگاهها و علایق آنها داشته باشیم. در مجموع، یک شیمیست، شناسایی ترکیبات مختلف مواد، کاتالیستها و شرایط تبدیل بهینه محصولات مطلوب را بر عهده دارد، در مقابل، نقش مهندس شیمی، تعیین عوامل عملی، اقتصادی و آرایش ایمن تجهیزات است.

بر خلاف مسائل شیمیایی که با تغییر مقیاس و ظرفیت تولید تغییر نمی‌کند، مسائل مهندسی در افزایش ظرفیت تولید، دستخوش تغییر و تحول می‌شود و بسیاری از مسائل فرایندی در مقیاسها و ظرفیتهای بزرگ، شرایط ویژه‌ای را طلب می‌کند که در افزایش ظرفیت یا بزرگنمایی<sup>۲</sup> باید بدانها توجه کرد. آگاهی از این مسائل و نیاز به تولید محصول با کیفیت خوب، ایجاب می‌کند که به اصول و مبانی شیمی و مهندسی ارزش لازم و برابر داده شود. برخی از مشکلات با دخالت دادن مهندسان شیمی در طراحی فرایند آزمایشگاهی قابل رفع است که در نهایت، این امر می‌تواند به صورت

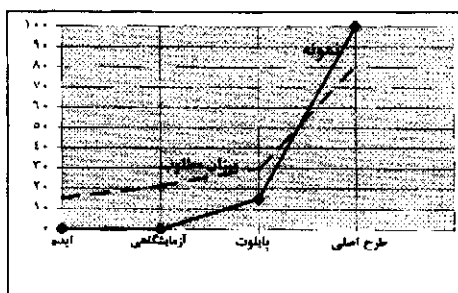
۱. Pilot Plant

۲. Scale Up

چشمگیری در حاصل نهایی کار تأثیر مثبت بگذارد. مهندسان شیمی، تأثیر متقابل طراحی فیزیکی تجهیزات و مشخصات عملیاتی آنها را بر یکدیگر می‌دانند و این امر اجازه می‌دهد که آنها بتوانند پیش‌بینی‌هایی در خصوص تغییرات محصولات، در قبال افزایش مقیاس داشته باشند. همکاری و مشارکت شیمیست‌ها و مهندسان شیمی می‌تواند در تخمین و توضیح تغییرات کاربری و عملیاتی طرح در حین افزایش مقیاس از حد آزمایشگاهی به حد صنعتی از طریق پایلوت کمک کند و این همکاری در به حداقل رساندن خطرهای ناشی از حوادث غیرمترقبه مؤثر خواهد بود.

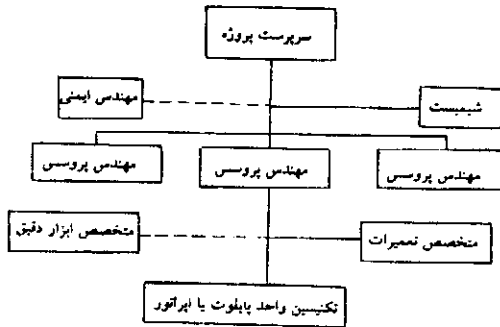
شکل (۱) میزان کارایی و همکاری مهندسان شیمی را در توسعه یک فرایند شیمیایی نشان

می‌دهد.



شکل ۱ میزان همکاری و مشارکت مهندسان شیمی در مراحل مختلف توسعه یک طرح شیمیایی.

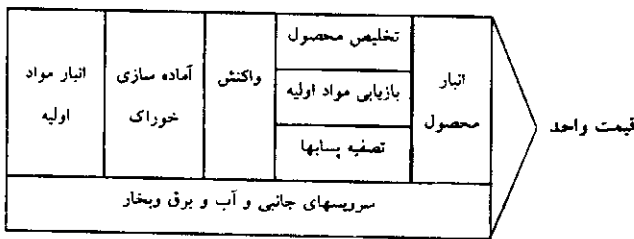
همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، توصیه می‌گردد که مهندسان شیمی از مراحل ابتدایی طرح همکاری داشته باشند و نیز همکاری شیمیست‌ها تا مراحل نهایی طرح واحد صنعتی ادامه یابد. این همکاری‌ها در تمام مراحل و مسائل مطرح شده در چرخه توسعه است و با توجه به تمام قوانین ایمنی و سلامتی و محیط زیست، مسائل صرفه‌جویی در انرژی، کیفیت و خلوص محصولات، برگشت مواد خام و بازیابی آنها، منجر به کسب نتیجه بهتر و اصلاح روند توسعه فرایند خواهد شد. در پروژه پایلوت باید به دقت کارکنان را به کارگماشت. مثلاً، شخصی که هم به فرایند شیمیایی و هم به دستگاه‌ها آشنایی داشته باشد، معمولاً به‌عنوان سرپرست پروژه انتخاب می‌شود. در اروپا این کار به شیمیست‌ها و در آمریکا معمولاً به مهندسان شیمی واگذار می‌شود. در حالت کلی، نقش افراد مختلف در پروژه پایلوت در شکل (۲) نشان داده شده است.



— افراد مورد نیاز  
 .... در صورت نیاز

شکل ۲ کارکنان یک واحد پایلوت

شکل (۳) عوامل و اجزای مؤثر در قیمت واحد را برای فرایندهای ساده نشان می‌دهد که دربرگیرنده جنبه‌های کلی مطرح شده در حاشیه بخش واکنش<sup>۱</sup> است.



شکل ۳ عوامل مؤثر در قیمت واحد

### ۳. اهداف واحدهای نیمه صنعتی

عملیات نیمه صنعتی در مراحل مختلفی از چرخه توسعه فرایند انجام می‌پذیرد و جهت رسیدن به اهداف مختلفی، بنابر احتیاجات، در یک یا چند مقطع زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این

اهداف را به طور کلی می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- تأیید نکات شیمیایی مقیاس آزمایشگاهی و بررسی اثر آن روی تجهیزات در مقیاس صنعتی؛
- تهیه اطلاعات مورد نیاز برای افزایش مقیاس؛
- تهیه اطلاعات جهت موارد و اجزای مختلف فرایند؛
- آزمایش عملکرد تجهیزات اختصاصی طرح؛
- تولید مواد برای فرایندهای پایین‌دستی؛
- تحقیق و بررسی در مورد تولید و ساخت محصول جدید با کیفیت‌های مختلف یا فرمولاسیون آن؛
- بهینه‌سازی عملکرد واحد.

ضمن اینکه مهندسان شیمی مجرب می‌توانند تمام داده‌ها یا اطلاعات مربوط به موارد فوق را به طرز مطلوبی مهیا سازند، ولی نقش این داده‌ها بستگی زیادی به شرایط خاص دارد. توصیه‌های ایمنی و عوامل زیست‌محیطی و عملکرد، به هر یک از حالات فوق وابسته است. توجه بیشتر یا مشارکت مهندسان در شرایط مناسب، موفقیت در طراحی کارخانه و برنامه‌های آزمایشگاهی را تضمین خواهد کرد و حداکثر بهره و فایده از کوشش‌های به عمل آمده حاصل می‌شود. بر حسب شرایط خاص، مشکلات طراحی در هر یک از مراحل توسعه ممکن است ایجاد شود و عملکرد تجهیزات در هر مرحله ممکن است بر روی نتیجه آزمایشها یا ارزیابی آن تأثیر گذارد. در نتیجه، این فرضیه که اطلاعات و داده‌های معتبر مهندسان شیمی فقط مربوط به طراحی واحد نهایی می‌باشد، اشتباه است.

## ۴. موارد عمومی همکاری و کمک‌های مهندسان شیمی

### ۴.۱. آزمایشها در مقیاس آزمایشگاهی

آزمایشها در مقیاس آزمایشگاهی<sup>۱</sup>، بسیار دور از شرایطی است که در عملکرد کارخانه وجود دارد. به خصوص، از دیدگاه حرارتی، عملکرد ترکیبات شیمیایی در این دو حالت (مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی) متفاوت خواهد بود که این امر در سرعت واکنش و توزیع محصولات و تولید محصولات فرعی<sup>۲</sup> تأثیر می‌گذارد. لازم است مکانیسمی که هدایت و عملکرد این تغییرات

را بر عهده دارد، کاملاً درک شود تا تأثیرات ایجاد شده توسط تجهیزات و روشهای عملکرد، جدا از تأثیرات ناشی از جنبه‌های شیمیایی فرایند مورد بررسی قرار گیرد.

به طریق مشابه، در این مرحله انتخاب حلالها، دماها و فشارهای عملیاتی و کیفیت محصول و موضوعات انتخابی ممکن است تأثیر چشمگیری بر اقتصاد نهایی واحد بگذارد. از طرفی، همین انتخابها ممکن است تأثیر زیادی در بهبود عملکرد آزمایشها در مقیاس آزمایشگاهی داشته باشد. لازم است که چنین تصمیماتی در مواقع بحرانی به وسیله افرادی که توانایی ارزیابی مفاهیم واحد را دارند، گرفته شود.

همان‌طور که آزمایشها ادامه می‌یابد، بهتر است عوامل پیشرفت عملکرد در یک قسمت به‌خاطر سپرده شود، چون ممکن است که این عوامل باعث بروز اشکال در جای دیگری شود. به‌عنوان مثال، پیگیری و کوشش در جهت افزایش تولید محصول اصلی می‌تواند منجر به تشکیل محصول فرعی نیز شود که جداسازی آن آسان نیست. بنابراین، بدون داشتن دورنمایی از تولید، تصمیماتی از این نوع می‌تواند مشکل‌آفرین باشد.

## ۴.۲ اهداف واحد نیمه‌صنعتی<sup>۱</sup>

### ۴.۲.۱. تأیید فرایند

در صورتی که اصول مشاهدات آزمایشگاهی کلاً مورد مطالعه و درک قرار گیرند، از واحد نیمه‌صنعتی برای طراحی واحد اصلی به راحتی می‌توان سود جست. در برخی از موارد، طراحی تجهیزات واحد پایلوت ممکن است از طراحی تجهیزات در مقیاس آزمایشگاهی<sup>۲</sup> یا مقیاس نهایی واحد<sup>۳</sup> مشکلتر باشد. زیرا شرایط عمل با قابلیت‌های تجهیزات صنعتی برابری نمی‌کند یا هزینه‌ها نمی‌تواند موجه جلوه کند.

معمولاً اختلافات ظریفی بین تجهیزات واحد پایلوت و تجهیزات آزمایشگاهی وجود دارد که ناشی از افزایش ظرفیت و اندازه عملکرد است، و حتی نوع تجهیزات، گاهی می‌تواند ساختار مواد را تغییر دهد.

۱. Pilot Plant

۲. Bench Scale

۳. Full Scale Plant

یکی از مهمترین مسائل در بزرگسازي مقياس کارخانه آن است که با افزایش مقياس، نسبت مساحت به حجم کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که در افزایش مقياس از آزمایشگاهی به واحد نهایی، از طریق واحد پایلوت، گرم کردن و سرد کردن مواد، مشکلات بیشتری را به وجود می‌آورد، مگر اینکه نسبت ظاهري تجهیزات تغییر کند که معمولاً امکان‌پذیر نیست، زیرا این امر خود مشکلات دیگری را ایجاد خواهد کرد.

یک مبحث مربوط به طراحی روش استفاده از گرماست. در آزمایشگاه معمولترین روش برای ایجاد گرمای الکتریکی، استفاده از گرمکن‌ها<sup>۱</sup> است، در حالی که در تجهیزات تولیدکننده گرما در مقياس بزرگتر، از مایعات داغ یا بخار استفاده می‌کنند. استفاده از مایع داغ بر اساس شار حرارتی ثابت با دمای سطحی قابل تغییر برحسب شرایط است، در حالی که استفاده از بخار بر اساس اختلاف دمای ثابت با شار حرارتی متغیر است. این بدان معناست که هم دمای دیواره و هم پیشینه دمایی واکنش‌کننده‌ها در هر مقياسی از عملکرد متفاوت می‌باشد. نتیجه این امر هم باعث تشکیل محصولات مختلف می‌شود و هم این نتایج می‌تواند برخی از شرایطی که محققان را متعجب ساخته است که چرا یک فرایند ظاهراً موفقیت‌آمیز، نمی‌تواند قابل تعمیم به مقياس پایلوت باشد، توجیه کند. تأثیرات مشابه را می‌توان برای سیستم خلا ملاحظه کرد. در آزمایشگاه به راحتی فشارهای پایین با استفاده از تجهیزات کوچکتر به دست می‌آید، ولی در شرایطی که تقطیر یا جوشاندن مورد نیاز است، بایستی به عمق مایع توجه کرد. در مقادیر زیاد خلا، هداستاتیک<sup>۲</sup> مایع می‌تواند برای جلوگیری از جوشیدن کافی باشد. این امر به نوبه خود میزان انتقال حرارت را کاهش خواهد داد و باعث افزایش دمای دیواره و احتمالاً باعث تولید محصولات فرعی نیز می‌شود.

این عوامل و موضوعات مربوط، اهمیت وجود مهندسان شیمی در طراحی واحدهای پایلوت را برای این نوع وظایف نشان می‌دهد، هرچند وظایف دیگری نیز وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. یک وظیفه کلیدی آن است که چه پارامترهایی از فرایندها را در طی آزمایش بایستی اندازه‌گیری و ثبت کرد. اهمیت این امر بدان جهت است که در صورت وجود هر نوع اشکالی، لازم است مشخص شود که برای رفع اشکال مربوط باید توجه خود را به طراحی واحد پایلوت معطوف کنیم یا درک شیمی فرایند. این می‌تواند بدان معنا باشد که ابزارهای اضافی برای امکان‌ارزیابی

عملکرد مبدل‌های حرارتی یا تجهیزات دیگر مورد نیاز است.

همان‌طور که تجهیزات برای آزمایش مهیا می‌شود، باید مسائل ایمنی و جنبه‌های زیست‌محیطی نیز مورد توجه قرار گیرد. وظایف کاری مهندسان، ارزیابی ماهیت و گستردگی ایمنی در ارتباط با موضوعات مربوط و انتخاب عملیاتی با حداقل احتمال خطر است. ممکن است انجام دادن مطالعات (Hazard and Operability) Hazop (Hazard and Operability) مطلوب باشد که این مطالعات به طور رسمی برای ثبت تجزیه و تحلیل خطرهای نهایی و بالقوه و روشهای انتخابی به جهت حداقل رساندن این خطرها انجام می‌شود. در بعضی از حالات، انتخاب عملیات سهلتر می‌تواند مناسبتر باشد.

در هر رویدادی لازم است که از وجود تمهیدات مناسب برای ترمیم مخازن و محدود نگاه‌داشتن مواد زاید اطمینان حاصل شود. اگر در طی فرایند با کاهش فشار سریع یا تبخیر مقادیر زیاد گاز مواجه شویم، لازم است که طراحی بر مبنای جریان‌ات دوفازی انجام گیرد. ارزیابی این نوع فرایندهای دوفازی به مراتب پیچیده‌تر و به صورت بالقوه خطرناک‌ترند و احتمال فوران و تخلیه محتویات داخلی راکتور وجود دارد. در صورت وجود چنین پدیده‌ای، آزمایشهای تخصصی اضافی برای به دست آوردن اطلاعات ترموشیمیایی جهت محاسبات طراحی مورد نیاز خواهد بود. نکته مهم دیگر آن است که ترکیبات شیمیایی به کار برده شده در واحد پایلوت ممکن است از نظر خلوص تفاوت اندکی نسبت به مواد به کار برده شده در تستهای آزمایشگاهی داشته باشند، که این امر می‌تواند روی فرایند یا کیفیت محصول اثر بگذارد، لذا حساسیت فرایند به مشخصات خوراک تا آنجا که امکان دارد، باید مورد بررسی قرار گیرد.

ممکن است حضور یک مهندس در طول آزمایشها مفید باشد، نه فقط به دلیل ارائه دیدگاههای خود در مورد روشهای غلبه بر مسائل و مشکلات احتمالی پیش آمده، بلکه برای مشاهده عملکرد فرایند. بعضی از پدیده‌ها که ممکن است در آزمایشها بدانها توجه نشود یا نتایج آنها ثبت نشود، مثل کف کردن، گاهی مشکلات مهمی برای طراحی کارخانه با مقیاس بزرگ فراهم می‌سازند. این اثرها در عملکرد فرایند در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت تأثیر می‌گذارد، ولی عمدتاً تأثیر آنها در طراحی در مقیاس بزرگ دشوارتر است، به خصوص اگر به اهمیت آنها توجه کافی مبذول نشود.



### ۴.۲.۲. تثبیت و تأیید دانش فنی

نکات بسیاری در بالا مطرح شد که می‌توان به‌خوبی از این نکات برای تأیید دانش فنی واحد پایلوت استفاده کرد. در تلاش برای مفید بودن دانش فنی فرایند، تفاوت‌های بین عملکرد آزمایشگاهی و واحد پایلوت باید مشخص شوند. این تفاوتها در اثر تفاوت مقیاس، تغییرات خوراک یا روشهای عملکرد حاصل می‌شود. تجزیه و تحلیل نتایج برای توجیه این تفاوتها باید مورد استفاده قرار گیرد تا امکان ارزیابی دقیقی در رابطه با این مسأله که آیا جنبه شیمیایی فرایند بعد از بزرگ شدن مقیاس تغییر می‌کند یا نه، فراهم شود.

ممکن است در مرحله بعدی بزرگ شدن مقیاس، نیاز به تکرار این تجزیه و تحلیلها باشد تا ارزیابی عملکرد احتمالی واحد در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر باشد. استفاده‌کننده از دانش فنی بیشتر تمایل به دانستن عملکرد واحد در مقیاس تجارتي دارد تا مقیاس آزمایشگاهی یا پایلوت. ارزیابی این آثار در فرایندها به جنبه‌های مهندسی نیاز دارد. جایی که فرایند نیاز به حلقه‌های برگشتی<sup>۱</sup> یا بازیابی مواد خام واکنش نشده دارد، وجود این جنبه‌های مهندسی بیشتر مورد نیاز است. به‌خصوص اینکه در واحدهای پایلوت، شرایط را برای مدت زمان طولانی نمی‌توان ثابت نگه داشت تا چنین جریانات برگشتی دوباره به حالت پایدار<sup>۲</sup> برسد.

### ۴.۲.۳. اطلاعات در زمینه بزرگ شدن مقیاس

پارامترهایی که باید در طی آزمایشهای واحد پایلوت مورد اندازه‌گیری قرار گیرد، اهمیت ویژه‌ای برای مهندسان فرایند دارد. یک مهندس فرایند در این مرحله حساسیت چندانی ندارد که عملکرد واحد بر مشاهدات آزمایشگاهی منطبق باشد. همکاری دوجانبه بین شیمیدانان و مهندسان در این مرحله امری ضروری محسوب می‌شود تا بتوانند مکانیسم واکنش، عوامل مؤثر بر بازده<sup>۳</sup> و Selectivity و ماهیت محصولات فرعی را درک کنند و بشناسند. همان‌طور که قبلاً بحث شد، پیشینه حرارتی مواد واکنش‌کننده احتمالاً در فرایندی با مقیاس بزرگ تغییر می‌کند. این چنین تغییراتی قابل پیش‌بینی هستند و با استفاده از اطلاعات مهندسان باید امکان پیش‌بینی تغییرات

برای طراحی تجهیزات مورد نیاز فراهم آید. برای حصول این امر، از دید یک مهندس شاید نیاز به انجام آزمایشگاهی در آزمایشگاه باشد، در حالی که ممکن است از دید یک شیمیست چنین چیزی لازم نباشد. این امر هم برای یک شیمیدان و هم برای یک مهندس ضروری است که لزوم انجام دادن کارهای اضافی و چگونگی کاربرد آنها را در فرایندهای با مقیاس بزرگ درک کنند و بشناسند.

در فرایندهای آلی در شرایط ویژه ممکن است احتمالاً کمبودی از نظر خواص فیزیکی مناسب و اطلاعات فراریت وجود داشته باشد و نیاز به طراحی یک برنامه آزمایشگاهی برای تحقیق در مورد اثرهای فرضیات مختلف لازم باشد. این امر می‌تواند منجر به تمرکز ویژه بر روی مراحل مختلف تقطیر شود، زیرا اطلاعات تعادلی بخار - مایع برای بسیاری از مخلوطها معمولاً در دسترس نیست.

ماهیت و توزیع محصولات فرعی از دیگر نکات مهم و قابل توجه است. اطلاعات آزمایشگاهی که مورد نیاز و قبول شیمیدانان برای درک فرایند است، غالباً برای یک مهندس شیمی جهت موازنه جرم در سیستم کافی نیست. غالباً به دلایل مختلفی انواع مسائل ناشناخته در جریان تولید و موازنه جرم آزمایشگاهی ایجاد می‌شود. متأسفانه، همان‌طور که مقیاس کارخانه افزایش می‌یابد، مسائل مهم ناشناخته و ضایعات مواد بسیار مهم جلوه می‌کند. اختلاف ۵٪ در موازنه جرم در یک لیتر از مواد آزمایشگاهی، آزمونی قابل قبول و احتمالاً دارای پیامدهای ناچیزی است. هرچند هنگامی که واحد به واسطه افزایش مقیاس دهها هزار تن در سال تولید دارد، این مسأله بسیار با اهمیت است. حتی اطلاعات کیفی ناشی از آزمایشهای آزمایشگاهی که نشان می‌دهد موارد اختلاف از کجا به وجود آمده، برای یک مهندس بسیار با اهمیت است. اگر منشأ خطاها از آزمایشهای انجام شده در آزمایشگاه به درستی فهمیده شود، آنگاه می‌توان فرضیات قابل قبولی در باره عملکرد فرایند در مقیاس پیلوت ارائه داد و بر این اساس می‌توان فرضیات بهتری نیز در رابطه با عملکرد واحد نهایی ارائه کرد. مؤثرترین روش ارزیابی این مسائل آن است که شیمیدانان و مهندسان شیمی به‌طور توأم با یکدیگر کار کنند، چراکه هر یک به قسمتی از دانش یکدیگر نیاز دارد.

#### ۴.۲.۴. استخراج اطلاعات طراحی برای تجهیزات منفرد

طراحی تجهیزات مورد نیاز برای واحدهای عملیاتی مشخص، بر مبنای مطلق ثوری غیرممکن است و برای به دست آوردن اطلاعات طراحی مورد لزوم، نیاز به آزمایشهایی با استفاده از یک واحد پایلوت می‌باشد. یک مثال خوب برای این موضوع، می‌تواند تجهیزات برای انتقال جرم در سیستم مایع - مایع یا سیستمهای استخراج با حلال باشد.

این تجهیزات نیاز به بزرگ شدن مقیاس دارند و این کار بر مبنای یک واحد پایلوت طراحی شده که از نظر هندسی مشابه واحد با مقیاس بزرگ است، انجام می‌شود.

فرضیات باید در خصوص نوع، اندازه و شکل وسیله مورد نظر در مقیاس بزرگ در نظر گرفته شود و این اطلاعات برای طراحی واحد پایلوت که مدل عملی است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عین حال همیشه این احتمال وجود دارد که چندین واحد پایلوت مورد نیاز باشد تا بر طراحی واحد نهایی صحه گذاشته شود.

هدف از طراحی واحد پایلوت، فراهم کردن ابعادی با همان الگوهای جریان مشاهده شده در مقیاس کل کارخانه است.

برای به دست آوردن ابعاد منطقی و قابل قبول برای تجهیزات، باید از جزیانهای به حد کافی کوچک استفاده کرد. همچنین باید عملکرد تجهیزات را در ابعاد کاملاً وسیع در یک مجموعه شرایط کنترل نمود. تعداد متغیرهای مختلف ممکن است منجر به انجام گرفتن مجموعه‌ای از آزمایشها شود تا اثرهای هر پارامتر به تفکیک مورد بررسی قرار گیرد.

از طرف دیگر، ممکن است برای اطلاع از چگونگی عملکرد فرایند، نیاز به مشاهده کیفی فرایند احساس شود و یک سری از اطلاعات، از طریق مشاهده تغییرات در الگوی جریان سیال کسب شود. این مشاهدات با استفاده از ابزار شیشه‌ای انجام می‌شود و معمولاً نمی‌توان در فشارهای مورد استفاده در واحد با مقیاس بزرگ از این ابزار استفاده کرد. نداشتن دسترسی به تجهیزات مناسب در اندازه مناسب و مورد نیاز برای احداث واحد پایلوت، ممکن است امکانات طراحی را شدیداً محدود کند و منجر به عملکرد رضایت بخشی نشود. این نوع مشکلات می‌تواند سبب شود تا طراحی واحد پایلوت بسیار پیچیده‌تر از واحد آزمایشگاهی یا واحد نهایی شود. به طور کلی واحدهای پایلوت ابزار مهندسی هستند که مهندسان آن را طراحی کرده و عملکرد این واحدها در جهت به دست آمدن نتایج مورد لزوم تنظیم شده است. نقش یک شیمیدان در این

موقعیت، پشتیبانی از فعالیتهای مهندسی با تجزیه و تحلیل دقیق می‌باشد.

مسئله دیگری که در این موارد از اهمیت خاصی برخوردار است، فراهم کردن تجهیزاتی برای تهیه خوراک واحد پایلوت است تا بتوان مشکلات حاصل از تزریق خوراک را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، لذا لزومی ندارد که برای قسمتهایی از فرایند که با جریانات واحد اصلی تطبیق می‌کند، واحد پایلوت ایجاد شود. این بدان معناست که ممکن است لازم باشد فرایندها یا واحدهایی طراحی شود که به بخشهایی که به صورت پایلوت باید مورد آزمایش قرار گیرد، سرویس داده شود و در عین حال در واحد نهایی نیاز به این کار نباشد. این امر مستلزم همکاری بین شیمیدان و مهندس است تا تجهیزات بهینه فراهم شود.

#### ۴.۴.۵. تست کردن تجهیزات اختصاصی

این امر غالباً برای بخشهایی مانند فیلترها، خشک‌کن‌ها و تجهیزات انتقال گرما ضروری است. تمایل مهندسان در این بخش، تمرکز برای تهیه تجهیزاتی است که خوراک را به صورت کنترل شده با شرایط فیزیکی مورد نیاز جهت تجهیزات مورد نظر انتقال می‌دهد و جریانات حاصل را ارزیابی می‌کند. در ضمن، در این مرحله یک مهندس باید از نمونه‌گیریها و اندازه‌گیریهای مناسب که امکان ارزیابی عملکرد تجهیزات را فراهم می‌آورد، اطمینان حاصل کند. میزان شرکت و همکاری یک شیمیدان در این قسمت کاملاً به میزان تأثیر عملکرد واحد بر روی فرایند بستگی دارد.

#### ۴.۴.۶. تولید آزمایشی

در این بخش، تعدادی از آزمایشها انجام خواهد شد و امکان تغییر شرایط عملکرد یا استفاده از خوراکیهای از منابع مختلف وجود دارد. این امر امکان بهینه کردن فرایند و همچنین امکان تهیه اطلاعات جری تری برای طراحی را فراهم می‌آورد. به‌طور مشخص، اجرای چندباره فرایند، چگونگی قابلیت تغییر در فرایند و زمینه‌هایی را که نیاز به کنترل قویتر و دقیقتر دارد، مشخص می‌کند و تجهیزاتی را که با گذشت زمان عملکرد آنها با اشکال مواجه می‌شود، از بقیه متمایز می‌سازد. تمام این اطلاعات، امکانات سودمندی برای طراحی فرایندهای بعدی فراهم می‌آورد. هرگاه واحد پایلوت، محصولاتی با کمیت و کیفیت مورد نظر تولید نکند، مهندسان باید درگیر برنامه‌های تشخیص و اصلاح معایب شوند. اگر معایب در ارتباط با شیمی فرایند باشد، احتمالاً راه

حل ارائه شده باعث تغییر شرایط عملکرد می‌شود و لازم خواهد بود که مهندسان شیمی بر روی قابلیت و توانایی واحد در سازگاری با شرایط عملکرد جدید کار کنند.

#### ۴.۲.۷. بهینه‌سازی عملکرد واحد

واحد پایلوت و امکانات آن معمولاً می‌تواند به طور همزمان و موازی با واحد اصلی عمل کند و در این خصوص امکان آزمایشها و بررسی اثر تغییراتی که اعمال آنها در واحد اصلی با ظرفیت بالا امکان پذیر نیست، در واحد پایلوت عملی است. مثل تغییر شرایط و نوع خوراک، تغییر کاتالیستها و غیره. در تمام این آزمایشها در واحد پایلوت، مهندسان شیمی و شیمیست‌ها باید همکاری مستمری داشته باشند.

#### ۴.۲.۸. تهیه دستورالعمل یا راهنمای بهره‌برداری

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از واحدهای پایلوت، مهندسان شیمی و شیمیست‌ها با همکاری یکدیگر باید دستورالعمل‌های لازم جهت عملکرد واحد اصلی را تهیه و تنظیم کنند. این دستورالعمل می‌تواند شامل آزمایشهای قبل از شروع، شروع ساخت، بهره‌برداری، راه‌اندازی و از کاراندازی اضطراری سیستم باشد. شیمی عملیات و مشخصات دستگاهها، روش ساخت، روشهای ایمنی و ضروری و مطالب ایمنی برای تمام واکنشها و شکلها نیز می‌تواند بخشی از این دستورالعمل باشد.

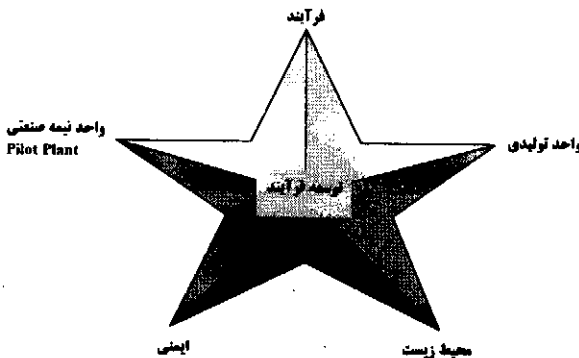
#### ۴.۳. طراحی واحد اصلی با مقیاس بزرگ

به‌طور طبیعی، این مرحله صرفاً به‌وسیله مهندسان اداره می‌شود و شیمیدانان به‌ندرت درگیر آن هستند، هرچند از تلفیق شیمیدانان بخش تحقیق و توسعه (R&D) با یک تیم طراحی مزایان عمده‌ای به دست می‌آید و این امر باعث می‌شود که از به کارگیری دانش آنها در زمینه مکانیزمهای شیمیایی اطمینان حاصل شود. مهندسان درگیر در طراحی فرایند باید از زمینه‌های کارشناسانه شیمیدانان آگاه باشند تا در تبادل نظر مؤثر ترغیب شوند. این تبادل نظر به بهبود عملکرد واحد می‌انجامد.

## ۵. نتیجه‌گیری

توسعه فرایند، یک فعالیت چندمنظوره پیچیده است که نیاز به دانش تئوری، تجربه عملی و دقت و پشتکار دارد. برای این منظور نیاز است که تعادلی بین عوامل مؤثر وجود داشته باشد. این امر به هماهنگی کامل بین شیمیدانان و مهندسان شیمی نیاز دارد. اطلاعات تئوری شیمیدانان داده‌های مفیدی برای مهندسان شیمی است تا فرایند توسعه به‌نحو مطلوبی انجام گیرد.

شکل (۴) مهمترین پارامترهایی را که در مراحل مختلف پایلوت وجود دارد، به‌صورت یک چرخه توسعه فرایند نشان می‌دهد. بین این پارامترها تعادل وجود دارد و باید دقت کافی کرد. میزان دقت و تعادل به میزاق واقعی فرایند توسعه بستگی دارد. شیمیدانان و مهندسان شیمی، هر یک این مجموعه را از زوایای دید خود می‌نگرد و نظرهایی روی دیدگاه‌های خود دارد. برای اینکه کار مفید و گسترده‌ای انجام گیرد، باید این دو گروه همکاری و هماهنگی داشته باشند، به‌طوری که اعضای یک تیم محسوب شوند. بهبود کیفیت توسعه فرایندها در وهله اول توسط مهندسان شیمی انجام می‌گیرد و بهبود کیفیت واحدهای طراحی شده، که از درک عمیق‌تر فرایند سرچشمه می‌گیرد، توسط شیمیدانان صورت می‌پذیرد.



شکل ۴ عواملی که در توسعه فرایند باید موازنه شود