

# اختلاط در فرایندهای پلیمر شدن (II)، پلیمر شدن همگن

## Mixing in Polymerization Processes (II), Homogeneous polymerization

شهریار سجادی، سپیده درّه  
مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی مواد پلیمری

واژه‌های کلیدی:

جریان، توان، گرانروی، مقیاس اختلاط، پلیمر شدن همگن

### چکیده

افزایش گرانروی، اختلاط در راکتورهای پلیمر شدن را مشکل می‌سازد. اختلاط در سیستمهای پلیمر شدن همگن، به وسیله جریان کنترل می‌شود. تعداد همزنها و محل استقرار آنها از جمله عواملی است که در تعیین شدت جریان ایجاد شده اهمیت دارد. روشهای متعددی برای تعیین دور همزن در سیستمهای اختلاط پیشنهاد شده است که در این مقاله روش مقیاس اختلاط (شاخص سرعت سیال در مخزن) با تعیین آن به سیستمهای پلیمر شدن همگن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و به دلیل سهولت کاربرد و دقت آن توصیه می‌شود. توان مصرفی در راکتور پلیمر شدن براساس مشخصات عمومی همزن و گرانروی مخلوط واکنش تعیین می‌گردد. در این مقاله روشی نیز برای تصحیح توان مصرفی برای حالتی خاص پیشنهاد می‌شود.

### مقدمه

اختلاط قلب فرایندهای شیمیایی و از جمله پلیمر شدن را تشکیل می‌دهد. طراحی سیستمهای پلیمر شدن، بدون توجه به ویژگیهای سیستم اختلاط آن امکان پذیر نیست [1]. در نخستین مقاله از این مجموعه شاخصهای اختلاط در انواع سیستمهای پلیمر شدن مورد بحث و بررسی قرار گرفت و توصیه‌هایی برای چگونگی انتخاب همزنها، همچنین ویژگیهای ابعادی و شکلی انواع سیستمهای اختلاط ارائه شد [2]. در این مقاله مبانی طراحی اختلاط در سیستمهای همگن به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### سیستمهای همگن حساس به جریان

در هریک از فرایندهای اختلاط، اهداف خاصی تعقیب می‌شود. نتایج مشهود از یک فرایند اختلاط را می‌توان در قالب مفاهیم مهندسی شیمی نظیر شدت انتقال گرما، شدت انتقال جرم، زمان امتراج، درجه اختلاط

و سرعت واکنش بیان کرد. اگر انتقال گرما به عنوان هدف اختیار شود، در این صورت سیستم اختلاط باید به گونه‌ای طراحی شود که میزان گرمای مورد نیاز جذب سیستم یا از آن منتقل گردد. در واکنشهای شیمیایی نظیر پلیمر شدن، سیستم اختلاط باید قادر به جذب حداکثر گرمای آزاد شده در واکنش باشد. از این رو، اختلاط جنبه‌ای بحرانی می‌یابد. در حالی که در سیستمهای فیزیکی مانند گرم یا سرد کردن مواد، شدت اختلاط عامل بحرانی نیست و کیفیت عمل را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد، با اینکه در این مورد نیز زمان لازم برای رسیدن به دمای مورد نظر متناسب با شدت اختلاط تغییر می‌کند. اگر امتراج هدف نهایی یک سیستم اختلاط باشد، می‌توان به روشی مشابه از سیستمهای اختلاط گوناگون با زمانهای امتراج متفاوت استفاده کرد. هدف اصلی در این مقاله بررسی سیستمهای اختلاطی است که اختلاط در آنها جنبه بحرانی یا نیمه بحرانی دارد. اختلاط در واکنشهای همگن گرماده، نظیر پلیمر شدن جرمی و محلول، از آن جمله‌اند.

تقریباً تمامی سیستمهای اختلاط همگن نظیر امتراج، انتقال جریان و انتقال گرما به جریان حساس‌اند [2]. سیستمهای پلیمر شدن جرمی و محلول از جمله سیستمهای حساس به جریان تلقی می‌شوند. اگر چه وقوع واکنش در این فرایندها نیاز به برش را تحمیل می‌کند، ولی در صورتی که حداقل برش مورد نیاز این سیستمها تأمین شود، دیگر حساسیتی به برش نشان نمی‌دهند و تنها به وسیله جریان کنترل می‌گردند. در اکثر سیستمهای پلیمر شدن تا گرانروی متوسط (زیر  $10^5$  cp) حداقل برش لازم خود به خود تأمین می‌شود و از این رو این سیستمها به طور عمده به جریان حساسیت نشان می‌دهند.

سیستمهای شامل ذرات ریز جامد، مانند امولسیونها، را می‌توان به‌طور تجربی (ولی نه نظری) در چهارچوب سیستمهای همگن حساس به

### Key Words:

flow, power, viscosity, scale of agitation, homogeneous polymerization

جریان طبقه بندی کرد [3]. اگر چه در پلیمر شدن امولسیون در ابتدا به برش زیادی برای توزیع مناسب قطرات مونومر و میسلها نیاز است، ولی بعد از تشکیل لاتکس پایدار اختلاط تنها به واسطه انتقال گرما و پراکنده کردن مونومر اضافه شده در طی واکنش (در فرایند نیمه پیوسته) صورت می گیرد. بنابراین، در مرحله پلیمر شدن می توان سیستم را مستقل از برش و تنها تابعی از جریان تعریف کرد. اعمال برش زیاد در سیستمهای امولسیونی منجر به چسبندگی ذرات پلیمر به یکدیگر می گردد که تدابیر لازم برای جلوگیری از وقوع آن باید در نظر گرفته شود.

#### درجه بندی شدت اختلاط

اگر چه تعیین مشخصه های سیستم اختلاط برای انواع کاربردها به طور تجربی ممکن است، ولی جهت سهولت انتخاب و تصمیم گیری نیاز به یک تقسیم بندی کلی و در عین حال کمی است که بتوان براساس آن شدت اختلاط مورد نظر را تعریف کرد. تا بیست سال پیش اختلاط به صورت کیفی به سه گروه شدت زیاد، متوسط و کم تقسیم می شد. امروزه نیز این تقسیم بندی همچنان به کار می رود، بدون آنکه هیچ گونه مشخصه کمی دقیقی برای آن ارائه شده باشد. هلند شدت اختلاط را بر مبنای سرعت نوک پروانه و برای سه گروه یاد شده چنین توصیه می کند [4]:

شدت کم: ۶۵۰-۵۰۰ فوت در دقیقه (معادل ۲۳۰-۲۵۴ سانتی متر در ثانیه)  
 شدت متوسط: ۸۰۰-۶۵۰ فوت در دقیقه (معادل ۴۰۶/۴-۳۳۰/۲ سانتی متر در ثانیه)  
 شدت زیاد: ۱۱۰۰-۸۰۰ فوت در دقیقه (معادل ۵۵۸/۸-۴۰۶/۴ سانتی متر در ثانیه)

اخیراً معیار جدیدی پیشنهاد شده که براساس سرعت چرخش سیال درون مخزن است [5]. هر چه محتویات یک مخزن سریعتر به هم خورد شدت اختلاط نیز بیشتر می شود. با این فرض شدت اختلاط تابعی از سرعت سیال درون مخزن می شود. بر طبق این پیشنهاد دامنه شدت اختلاط کم تا زیاد بر سرعت توده سیال (از ۶ تا ۶۰ فوت بر دقیقه) قابل تطبیق است. بنابراین، یک مقیاس دهگانه نیز برای پوشش این دامنه برگزیده شده است. این طبقه بندی به صورت گسترده ای مورد استقبال قرار گرفته است. این روش علاوه بر درجه بندی شدت اختلاط، شاخصهای شدت مناسب را برای انواع سیستمهای اختلاط ارائه می دهد. جدول ۱ مقیاس اختلاط لازم را برای انواع سیستمهای مختلف، از جمله پلیمر شدن جرمی و محلول نشان می دهد. شدت اختلاط لازم برای اختلاط مایعات امتراج پذیر بر مبنای نسبت گرانروی و وزن مخصوص آنها توسط هیکس و همکارانش ارائه شده [5] که این جدول توسط بوئن به تصویر کشیده شده است [6]. شکل ۱ حد مقیاس اختلاط لازم را برای امتراج مایعاتی با نسبت گرانروی  $\mu/\rho$  نشان می دهد.

زمان چرخش (tank turnover time) یا زمان لازم برای یک دور چرخش کامل محتویات مخزن  $\frac{V}{Q}$  نیز برای درجه بندی شدت اختلاط پیشنهاد شده است. با توجیه این درجه بندی را برای همان گروههای سه گانه هلند به صورت زیر ارائه می دهد [7]:

شدت کم: ۳۰-۱۰ دقیقه  
 شدت متوسط: ۳- $\frac{1}{2}$  دقیقه  
 شدت زیاد: ۳۰-۱۰ ثانیه

با توجیه ادعا می کند که این درجه بندی مستقل از اندازه مخزن اختلاط است بوئن نشان می دهد که زمان چرخش تابعی از حجم مخزن است و از این رو به عنوان یک مقیاس اختلاط کاربرد ندارد [6].

بهترین درجه بندی اختلاط، همان مقیاس دهگانه هیکس است که درباره برتریهای این روش و همچنین کاربرد آن در طراحی بحث خواهیم کرد.

#### طراحی سیستمهای اختلاط همگن حساس به جریان

تعیین ویژگیهای یک سیستم اختلاط که براساس آن امکان طراحی تفصیلی مکانیکی حاصل می شود، مستلزم تعریف و ارزیابی دقیق پارامترهای زیر است [8]:

- همزن و مخزن که شامل نوع، تعداد همزن و پره ها، محل قرار گرفتن همزن، اندازه همزن و پره ها و همچنین شکل و ابعاد مخزن است،
- دور همزن،
- توان مورد نیاز.

#### همزن و مخزن

نوع و اندازه همزن و همچنین شکل و ابعاد مخزن و موجگیرهای درون آن در بخش اول این مجموعه مقالات [2] مورد بحث و بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که برای سیستمهای همگن حساس به جریان، نظیر امتراج و انتقال گرما، همزنهای محوری مانند توربینهای مورب کارآیی مناسبی دارند. همچنین توصیه های اولیه برای انتخاب ابعاد همزن و مخزن ارائه شد. در این مقاله به تعداد همزنهای لازم و محل قرار گرفتن آنها پرداخته می شود.

تعداد همزنها و محل قرار گرفتن آنها یکی از مهمترین مسائل در طراحی سیستمهای اختلاط است که هنوز پاسخ صریح و روشنی به آن داده نشده است. برای رفع این ابهام باید دانش کافی نسبت به دامنه ای داشت که در آن هر همزن می تواند مؤثر باشد. این فاصله عمودی به شرایط فیزیکی سیستم اختلاط و شدت آن بستگی دارد. اولین توصیه ای که برای تعیین تعداد همزنها (توربینی) ارائه شده از جانب وبر بوده است [9]. وبر پارامتری را با عنوان WELH تعریف می کند که برابر است با

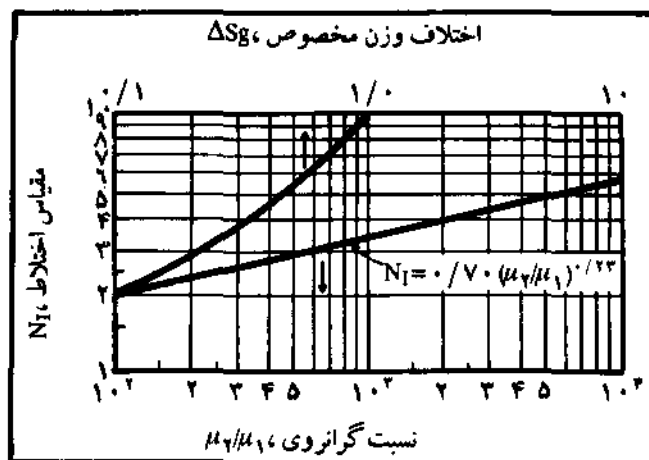
فرایند	صنعت	کاربرد	مقیاس دهگانه اختلاط
پلیمر در مونومر انحلال پذیر است	پلیمر	پلیمر شدن جرمی	۸-۱۰
پلیمر و مونومر در حلال انحلال پذیرند	پلیمر	پلیمر شدن محلول	۸-۱۰
مونومر به صورت امولسیون در آب پراکنده می‌شود	پلیمر	پلیمر شدن امولسیون	۶-۱۰
تهیه نشاسته برای پوشش	چوب و کاغذ	پخت نشاسته	۶-۸
برای پراکنده ساختن آهک مرده در آب (۰ تا ۳۸% جامد)	تصفیه آب	تهیه گلاب آهک	۴-۷
امتراچ اجزای سازنده چسب	چسب	مخزن اختلاط	۳-۸
تولید شربت از شکر	شکر و نشاسته	مخزن انحلال شکر	۳
تبدیل آنزیمی	شکر و نشاسته	تبدیل کننده نشاسته	۲-۴
حفظ امولسیون	پلیمر	مخزن نگهداری	۲-۳
حفظ تعلیق	رنگ	تعلیق رنگینه‌ها	۲-۳
مخزن نگهداری شربت	شکر و نشاسته	ذخیره شربت	۲
اختلاط مواد امتراج پذیر	نفت	امتراج افزودنی‌های سوخت	۱

۱ یا کمتر می‌توان از یک همزن بهره جست که با نتایج تجربی سازگاری ندارد. فاصله عمودی که در آن یک همزن مؤثر است علاوه بر وزن مخصوص به گرانروی سیال نیز بستگی دارد. جدول ۲ عمق تقریبی از مایع را که همزنهای توربینی در آن ناحیه به نحو مؤثری عمل می‌کنند بر حسب گرانروی ارائه می‌دهد.

جدول ۲ - فاصله عمودی (تقریبی) برای تأثیر پروانه‌های توربینی [10].

گرانروی مایع $\varphi$	فاصله عمودی، برابر قطر همزن توربینی
< ۵۰۰۰	۳/۰ - ۴/۰
۵۰۰۰	۲/۵
۱۵۰۰۰	۲/۰
۲۵۰۰۰	۱/۷
۵۰۰۰۰	۱/۴

توربینهای شعاعی برای مخزنهای کم عمق (Z/T کوچک Z، عمق مایع و T قطر مخزن) که دارای پوشش مایع (منظور ارتفاع مایع روی پروانه همزن است) کمتر از  $1/2D$  (D قطر پروانه) است، توصیه



شکل ۱ - مقیاس اختلاط لازم برای امتراج مادی با نسبت گرانروی و وزن مخصوص متفاوت [6].

حداکثر ارتفاع مایع ضربدر وزن مخصوص متوسط مخلوط. بدین ترتیب تعداد توربینهای مورد نیاز از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\text{تعداد توربینها} = \frac{WELH}{D}$$

اگر عدد به دست آمده برای تعداد توربینها عددی صحیح نباشد، نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر از آن باید انتخاب شود. بنابراین، برطبق نظریه وبر تنها برای مخازنی با وزن مخصوص ۱ و نسبت قطر به ارتفاع

می‌شود. اگر اطلاعات پایه نشان داد که پروانه توربینی محوری باید در فاصله‌ای کمتر از ۳۰٪ قطر خود از کف مخزن قرار گیرد، رانش محوری این پروانه‌ها نه تنها باعث کاهش کارایی اختلاط می‌شود، بلکه باعث ناپایداری و لرزش میله پروانه نیز می‌گردد. در این موارد پروانه توربینی شعاعی انتخاب مناسبتری است [10].

هنگامی که کل عمق مایع از ارتفاع مؤثر پروانه توربینی کمتر باشد، معمولاً پروانه توربینی در فاصله‌ای حدود ۳۵٪ عمق مایع از کف مخزن قرار داده می‌شود.

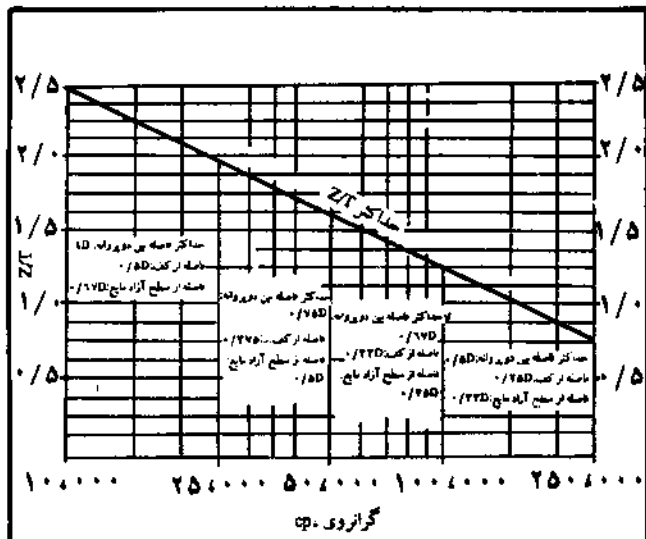
به عنوان یک قاعده عمومی چنین می‌توان اظهار داشت که اگر نسبت عمق مایع به قطر مخزن (Z/T) از ۱/۳ تجاوز کند، دو پروانه توربینی مورد نیاز است. ولی هنگامی که اختلاط مایعاتی با گرانروی کم مطرح باشد، استفاده از یک توربین بزرگ با دور کم برای Z/T بزرگتر از ۱/۳ نیز کفایت می‌کند [10].

در صورتی که به دلیل افزایش سرعت تخلیه یا احتمال انجام عملیات در ظرفیت کمتر، دستکم یک همزن توربینی در ارتفاع کمی از کف مخزن مورد نیاز باشد، پوشش مایع باید به گونه‌ای انتخاب شود که امکان نصب یک پروانه توربینی دوم در قسمت فوقانی پروانه اول فراهم گردد.

براساس یک منبع [11] همزنهای توربینی دوتایی در راکورهای پلیمر شدن جرمی و محلول با Z/T حدود ۱/۵ به کار می‌روند. در چنین شرایطی پروانه پایینی ضمن ایجاد اختلاط در انتهای مخزن، سرعت تخلیه راکتور را نیز افزایش می‌دهد. پروانه بالایی نیز کنترل مناسبی را برای اختلاط کامل در سطح راکتور ایجاد می‌کند. بیشتر راکتورهای پلیمر شدن همگن برای دو همزن توربینی مورب با Z/T برابر ۱/۵ طراحی می‌شوند [11]. جدول ۳ محل قرار گرفتن توربینهای یکتایی و دوتایی را برای اشکال هندسی مختلف مخزنها نشان می‌دهد.

جدول ۳- راهنمای انتخاب تعداد و محل پروانه‌های توربینی [11].

صفحه‌ای در پایین و یک همزن توربینی محوری (با زاویه ۴۵°) در بالا، بهترین نتیجه را از دیدگاه عملکرد سیستم و توان مصرفی به دست می‌دهد [12]. اندشو در مورد امتزاج سیالات نیوتنی گرانرو، مشخصاتی برای همزنها ونحوه استقرار آنها توصیه می‌کند که می‌توان از آنها برای سیستمهای پلیمر شدن نیز استفاده کرد [13]. شکل ۲ حداکثر Z/T و فاصله بین پروانه‌ها (S) (در صورت وجود چند پروانه)، فاصله همزن از سطح آزاد مایع (C) و فاصله همزن از کف مخزن (B) را برای گرانرویهای مختلف نشان می‌دهد. با معلوم بودن حداکثر گرانروی فرایند می‌توان حداکثر مقدار قابل قبول Z/T را از این شکل مشخص ساخت. به همین ترتیب حداکثر مقادیر  $\frac{S}{D}$ ،  $\frac{C}{D}$  و  $\frac{B}{D}$  نیز از این شکل به دست می‌آیند.



شکل ۲- حداقل و حداکثر سطوح مایع و موقعیتهای پروانه برای اختلاط مواد گرانرو [13].

با تعیین Z/T از این شکل، تعداد همزنهای توربینی محوری

حداکثر Z/D	فاصله پروانه پایینی از کف	فاصله پروانه اول از کف	تعداد پروانه‌ها	دامنه گرانروی	نوع همزن
۱/۴	Z/۳	-	۱	گرانروی تا ۲۵۰۰۰ cp	توربینی محوری
۲/۱	T/۳	( $\frac{Y}{3}$ ) Z	۲	گرانروی تا ۲۵۰۰۰ cp	توربینی شعاعی
۰/۸	Z/۳	-	۱	گرانروی بیش از ۲۵۰۰۰ cp	توربینی شعاعی
۱/۶	T/۳	( $\frac{Y}{3}$ ) Z	۲	گرانروی بیش از ۲۵۰۰۰ cp	توربینی شعاعی

لازم براساس حداکثر گرانروی از جدول ۴ مشخص می‌شود. فاصله همزنها از یکدیگر و از سطح آزاد مایع و کف مخزن از شکل ۲ قابل تخمین است.

کابوی در یک مقاله پژوهشی نشان داده است که همزنهای دوتایی برای سیالات غیرنیوتنی و به ویژه شبه پلاستیک و بسیار گرانرو ضرورت دارند. براساس نظری استفاده از یک همزن توربینی

جدول ۴- راهنمای تعیین حداکثر Z/T برحسب تعداد پروانه و گرانروی فرایند [13].

گرانروی فرایند، cp				تعداد پروانه‌های توربینی محوری لازم
۱۰۰،۰۰۰ تا ۲۵۰،۰۰۰	۵۰،۰۰۰ تا ۱۰۰،۰۰۰	۲۵،۰۰۰ تا ۵۰،۰۰۰	۱۰،۰۰۰ تا ۲۵،۰۰۰	
۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۹۰	۱/۱۵	۱
۱/۱۰	۱/۴۰	۱/۶۰	۲/۱۵	۲
۱/۶۰	۲/۱۰	۲/۴۰	۳/۱۵	۳
۲/۱۰	۲/۷۵	۳/۱۰	۴/۱۵	۴

#### دور همزن

بعد از تعیین شکل و ابعاد سیستم اختلاط، مرحله انتخاب دور همزن فرا می‌رسد. به غیر از روشهای خاص تجربی یا آزمایشگاهی، روشهای کاربردی دیگری نیز در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یکی از این روشها سرعت نوک پروانه به عنوان یک شاخص طراحی تعریف می‌شود. دامنه سرعت نوک پروانه برای اکثر کاربردهای صنعتی استاندارد ۱۲۰۰-۶۰۰ فوت بر دقیقه است. جدول ۵ سرعت نوک پروانه را برای برخی از سیستمهای اختلاط نشان می‌دهد [14]. سرعت نوک همزن به علت دقت کم، شاخص مناسبی برای تعیین دور همزن نیست.

جدول ۵- راهنمای انتخاب سرعت نوک پروانه برای برخی از سیستمهای اختلاط.

انواع اختلاط	سرعت نوک پروانه فوت بر دقیقه	معادل آن در مقیاس اختلاط
اختلاط و انتقال گرمای معمولی	۵۰۰-۷۰۰	۲/۵-۹/۵
انتقال گرمای سریع	۷۰۰-۱۰۰۰	۳/۵-۱۳/۵
سیستمهای مایع-مایع و گاز-مایع (برش زیاد)	۱۰۰۰-۱۲۰۰	-

متداولترین روش عمومی، استفاده از مقیاس دهگانه هیکس است. این مقیاس دهگانه طبق معادله زیر تعریف می‌شود [6]:

$$V_b = Q \cdot A \quad (1)$$

$$N_I = \frac{V_b}{\gamma}$$

به عبارت دیگر، جریان ایجاد شده توسط یک همزن تقسیم بر سطح قاعده مخزن اختلاط، سرعت متوسط توده سیال را به دست می‌دهد. روشن است که جریان سیال در تمام سطح مقطع مخزن متناسب با آنچه که از این فرمول پیش بینی می‌شود تک جهت نیست، زیرا معمولاً جریان در ناحیه مجاور همزن توربینی به سمت پایین و در نواحی مجاور دیواره به سمت بالا برقرار است. پس به نظر می‌رسد که سرعت به دست آمده از رابطه نسبتاً محافظه کارانه و حدود نصف حداکثر سرعت سیال می‌باشد. بنابراین، استفاده از این روش مستلزم در اختیار داشتن تعریف دقیقی از جریان رانش پروانه همزن است. خانه ۱ اطلاعات لازم را برای محاسبه جریان رانش یا پمپاژ پروانه‌های توربینی مورب و مسطح ارائه می‌دهد. در این قسمت بعد از تطبیق پارامترهای سیستم اختلاط با مقیاس دهگانه، مقایسه‌ای بین این روش و معیار سرعت نوک پروانه به عمل می‌آید.

سرعت چرخش سیال در درون مخزن از تقسیم کل جریان ایجاد شده توسط همزن بر سطح مقطع مخزن اختلاط به دست می‌آید. بنابراین با استفاده از معادله ۱، معادله‌های زیر به ترتیب به دست می‌آیند:

$$Q = V_b \cdot A \left( \frac{V}{\varphi A} \right) = \gamma N_I \pi \left( \frac{T^2}{\varphi} \right) \left( \frac{V}{\varphi A} \right) \quad (2)$$

$$V = \left( \frac{V}{\varphi A} \right) A \cdot Z = \frac{V}{\varphi A} \left( \frac{\pi T^2}{\varphi} \right) (Z/T) \quad (3)$$

$$\frac{Q}{V} = \frac{\gamma N_I}{Z} \quad (4)$$

که در دو معادله ۲ و ۳ عدد  $V/\varphi A$  ضریب تبدیل است.

معادله ۳ را برحسب T می‌توان چنین بازنویسی کرد:

$$T = V^{1/3} / \left( (1/A) (Z/T) \right)^{1/3} \quad (5)$$

پس با قرار دادن معادله ۵ در معادله ۴، شکل‌های دیگر معادله سرعت چرخش سیال، برحسب دور در دقیقه به دست می‌آید:

$$\frac{Q}{V} = (10/A) N_I / V^{1/3} (Z/T)^{2/3} \quad (6)$$

$$Q = (10/A) N_I / V^{1/3} (Z/T)^{2/3} \quad (7)$$

سرعت نوک پروانه را نیز می‌توان به مقیاسهای دهگانه مرتبط کرد. با قرار دادن جریان گردش یا رانش کل همزن ( $Q = N_I N_D^2$ ) در معادله ۱ و حل آن برای  $N_D$  چنین خواهیم داشت:

$$N_D = (1/5) \pi N_I / N_Q (D/T)^2 \quad (8)$$

مقدار  $N_Q$  برای همزنهای توربینی محوری در رینولدز بالا از معادله زیر به دست می‌آید (به خانه ۱ مراجعه کنید):

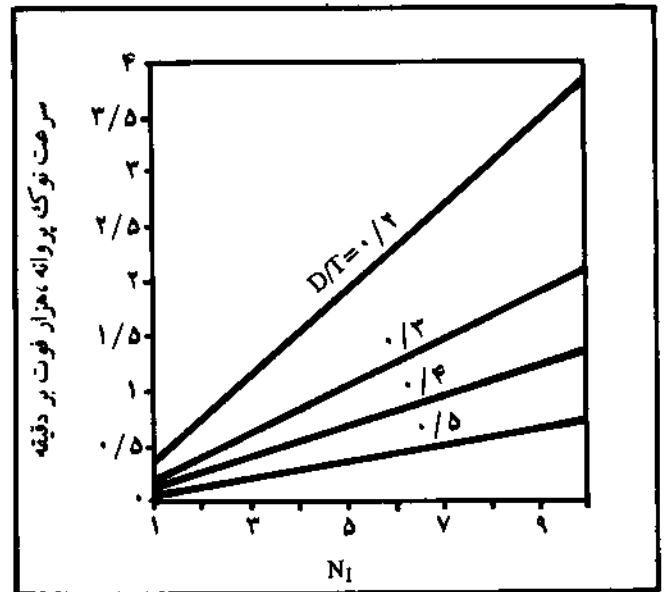
$$N_Q = (0/43) / (D/T)^{1/2} \quad (9)$$

با قرار دادن معادله ۹ در معادله ۸ برای سرعت نوک پروانه معادله زیر حاصل می‌شود:

$$V_p = \pi N_D = (3/50) \pi^2 N_I / (D/T)^{1/5} \quad (10)$$

این معادله نشان می‌دهد که سرعت نوک پروانه به طور مستقیم با  $N_I$  و

معکوس با  $(D/T)^{1/5}$  تغییر می‌کند. برای سیستم‌های مشابه هندسی،  $V_p$  به طور خطی با  $N_I$  تغییر می‌کند (البته در ناحیهٔ درهم). شکل ۳ تبدیل معیار  $N_I$  به  $V_p$  را برای  $D/T$  های مختلف نشان می‌دهد. برطبق این نمودار به ازای هر  $N_I$ ،  $V_p$  های مختلف معادل با آن وجود دارند. در  $N_I$  های کوچک، دامنهٔ  $V_p$  معادل، محدود است و به تدریج با افزایش  $N_I$  بر دامنهٔ  $V_p$  معادل افزوده می‌شود، به طوری که در  $N_I = 10$ ،  $V_p$  معادل با آن در  $D/T$  برابر  $0/2$  تا  $0/5$  بین  $500$  تا  $2500$  فوت بر دقیقه متغیر است. به همین ترتیب نشان داده شده که سرعت‌های نوک پروانه  $500$  تا  $700$  و  $700$  تا  $1000$  فوت بر دقیقه در دامنهٔ  $D/T$  برابر  $0/3$  تا  $0/6$ ، به ترتیب معادل با مقیاس اختلاط  $0/5 - 13/5$  و  $2/5 - 9/5$  می‌گردد. این مقایسه نشان دهندهٔ دقت قابل توجه مقیاس اختلاط هیکس است. از این رو، روش یاد شده که امروزه بسیار متداول نیز شده است. مبنای تعیین دور همزن در مقاله حاضر است.



شکل ۳ - رابطه  $N_I - V_p$  برای  $D/T$  های مختلف.

مراحل انتخاب دور همزن مناسب به شرح زیرند:

- تعیین قطر همزن براساس حجم مورد نظر که توسط معادلهٔ ۵ ارائه شده است.

- انتخاب مقیاس اختلاط مناسب براساس تجارب عملی یا با بهره‌گیری از جدول ۱ یا شکل ۱. بنابراین، سرعت مورد نظر تودهٔ سیال توسط معادلهٔ زیر ارائه می‌شود:

$$V_b = 6N_I \text{ (ft/min)} \quad (11)$$

مقیاس اختلاط همواره به صورت یک عدد صحیح بیان می‌شود، در حالی که یک دامنه را داراست. به عنوان مثال، اختلاطی با مقیاس ۳ سرعت توده‌ای معادل با  $18 \text{ ft/min}$  را نوید می‌دهد. در حالی که به معنای واقعی این سرعت می‌تواند در دامنه  $15 - 21 \text{ ft/min}$  واقع شود. بنابراین

می‌توان به جای سرعت توده، حداقل سرعت توده را در محاسبه‌ها وارد کرد [15]:

$$V_b = 6(N_I - 0/5) \quad (12)$$

- محاسبه  $Q$  که با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$Q = V_b \cdot A = V_b \left( \frac{\pi T^2}{4} \right) \quad (13)$$

می‌توان به طور مستقیم معادله ۷ را برای محاسبهٔ  $Q$  به کاربرد و مراحل اولیه را حذف کرد.

باید توجه داشت که در بررسی توربین‌های شعاعی به علت اینکه این همزن‌ها نیمی از جریان را به سمت بالا و نیم دیگر را به سمت پایین می‌رانند، مقدار  $Q$  در معادله بالا باید بر ۲ تقسیم گردد [6].

محاسبهٔ  $N_Q$ : با معلوم بودن نسبت  $D/T$  و با استفاده از معادله‌های خانهٔ ۱ و منحنی شکل ۴ در ناحیهٔ درهم، مقدار عدد جریان یا عدد پمپ کردن برآورد می‌شود و به عنوان حدس اولیه به کار می‌رود.

محاسبهٔ  $N$ : با استفاده از  $N_Q$  به دست آمده و معادلهٔ ۱۴ سرعت همزن در این شرایط محاسبه می‌شود:

$$N = Q / N_Q D^3 \quad (14)$$

تکرار تا همگرایی: با استفاده از  $N$ ، عدد رینولدز (به خانه ۲ رجوع کنید) محاسبه می‌گردد و با بهره‌گیری از منحنی شکل ۴،  $N_Q$  دوباره محاسبه می‌شود. اگر  $N_Q$  اخیر با مقدار حاصل از مرحلهٔ قبل برابر نبود، عملیات تا رسیدن به مقدار ثابتی برای  $N_Q$  (با استفاده از  $N_Q$  جدید) ادامه می‌یابد.

#### خانه ۱: جریان رانش یا گردش همزن

یکی از مشخصه‌های پروانه‌ها، جریان گردشی به وجود آمده توسط آنهاست. ظرفیت پمپ کردن بیانگر مقدار دبی است که پروانه می‌تواند در واحد زمان جابه‌جا کند. پارامتر مشخصهٔ ظرفیت پمپ کردن عددی بی‌بعد به نام عدد پمپ کردن است که به وسیلهٔ رابطهٔ زیر بیان می‌شود:

$$N_Q = Q / ND^3$$

اگر چه برای جریان رانشی یا گردش پروانه روابط نظری نیز ارائه شده است، ولی هنوز این روابط در پیش بینی دقیق مقدار جریان ناتوان هستند. این روابط در منابع مختلفی آمده‌اند [16]. عدد پمپ کردن تابعی از عدد رینولدز و مشخصات هندسی همزن است.  $N_Q$  برای پروانه‌های ملخی بین  $0/4$  تا  $0/5$  است.  $N_Q$  برای پروانه‌های توربینی بین  $0/7$  تا  $2/9$  متغیر است که مقدار آن بستگی به تعداد پره‌ها، نسبت عرض پروانه به قطر آن و نسبت قطر پروانه به قطر مخزن دارد. هنوز چگونگی این ارتباط برای تمام پروانه‌ها کاملاً شناخته

شده نیست. مقدار  $NQ$  برای مخزنهای دارای موجگیر ۲ تا ۴ برابر مخزنهای بدون موجگیر تخمین زده می‌شود.

منحنی تغییرات  $NQ$  با عدد رینولدز و برای نسبتهای مختلف  $D/T$  پروانه‌های توربینی مورب در شکل ۴ آمده است [4]. در ناحیه جریان درهم ( $NRe > 10^4$ ) عدد پمپ کردن برای هر نسبت از  $D/T$  ثابت است. مقدار  $NQ$  در ناحیه درهم توسط معادله زیر قابل محاسبه است:

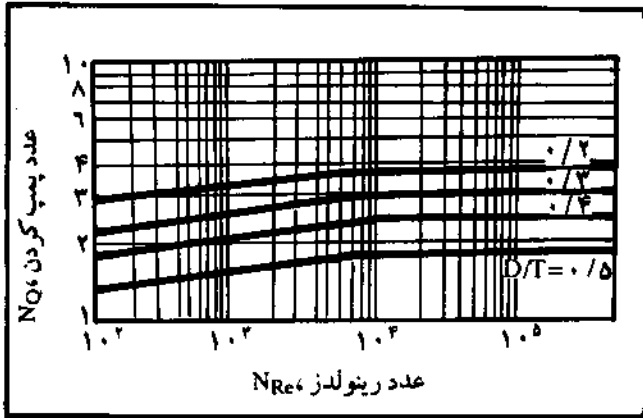
$$NQ = 0.43 \left( \frac{T}{D} \right)^{1/2}$$

به  $NQ$  برای پروانه‌های توربینی صاف در ناحیه انتقالی و آرام در هیچ منبعی اشاره نشده است.  $NQ$  در ناحیه درهم برای انواع پروانه‌های ۶، ۸ و ۴ پره با ضخامت پره‌های مختلف در منابع گوناگونی آمده است که با یکدیگر تفاوت‌های عمده‌ای دارند. منبع ۱۶ انبوهی از این اعداد را گزارش می‌کند. یگانه رابطه‌ای که برای  $NQ$  در پروانه‌های توربینی صاف ارائه شده مربوط به

$$\text{نوع ۶ پره‌ای با پهنای } 0.2 \frac{W}{D} \text{ است [17].}$$

$$NQ = 0.92 \left( \frac{T}{D} \right)$$

اهمیت است، ولی در مورد پروانه‌های شعاعی جریان رانش پروانه (۹) نیز نقش مهمی دارد. زیرا، جریان رانش پروانه نشان دهنده آن بخش از سیال است که از ناحیه مرکز پروانه عبور می‌کند و تحت تأثیر نیروی برش پروانه قرار می‌گیرد، در حالی که جریان گردشی بیانگر سرعت بازگشت سیال به ناحیه همزن است. در این مقاله منظور از  $NQ$ ، عدد پمپ کردن یا جریان گردشی است که مبنای طراحی سیستمهای حساس به جریان می‌باشد.



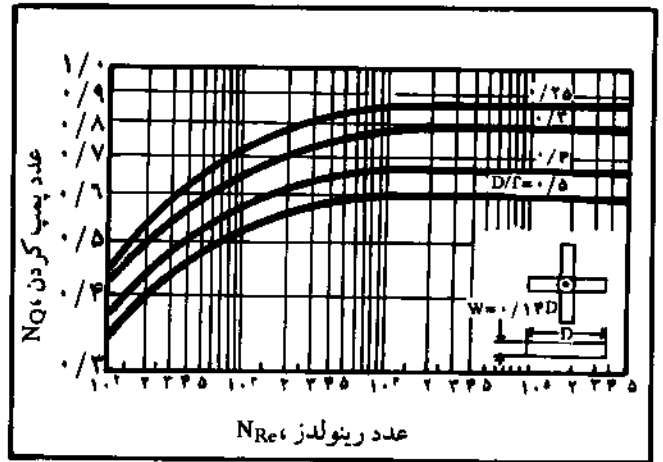
شکل ۵ - منحنی تغییرات  $NQ - NRe$  همزنهای توربینی شعاعی ۶ پره.

خانه ۲: گرانروی ظاهری و عدد رینولدز اصلاح شده عدد رینولدز ( $NRe$ ) مشخصه شدت به هم خوردن در سیستمهای اختلاط است که مطابق با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$NRe = \frac{ND^2\rho}{\mu}$$

عدد رینولدز در سیستمهای غیر نیوتنی مشابه با نیوتنی تعریف می‌شود، با این تفاوت که به جای گرانروی به کار رفته در معادله فوق، گرانروی ظاهری ( $\mu_a$ ) قرار داده می‌شود. عدد رینولدز در سیستمهای غیر نیوتنی و همچنین پلیمر شدن به دشواری قابل تعریف است، زیرا گرانروی ظاهری سیستم پیوسته با گرادیدان سرعت و پیشرفت واکنش تغییر می‌کند. اصولاً در بررسی سیالات غیر نیوتنی باید به دو نوع گرانروی توجه کرد: - گرانروی پروانه (impeller viscosity): گرانروی

تحت شدت برش پروانه است. برای برخی از پروانه‌ها، نظیر پروانه‌های محوری، شدت برش مستقل از اندازه پروانه و تنها تابعی از سرعت پروانه است. بنابراین، گرانروی برای ابعاد مختلفی از این پروانه‌ها یکسان است. گرانروی پروانه، یگانه گرانروی است که باید در



شکل ۴ - منحنی  $NQ - NRe$  همزنهای توربینی محوری ۴ پره.

یک منبع تغییرات  $NQ$  را در ناحیه انتقالی متناسب با  $NRe^{1/2}$  تعریف می‌کند [18]. با استفاده از این رابطه و همچنین معادله بالا شکل ۵ توسط مؤلفان تهیه شده که بیانگر تغییرات  $NQ - NRe$  برای توربینهای صاف در دو ناحیه درهم و انتقالی است. اگر چه برای طراحی پروانه‌های محوری، جریان کل یا جریان گردشی ( $Q$ ) ایجاد شده دارای

محاسبه توان به کار رود.

- گرانروی فرایند (process viscosity): که متعلق به فرایند است و براساس شدت برش متوسط فرایند محاسبه می شود. برای هر پروانه مفروض، شدت برش فرایند تابعی از سرعت و اندازه پروانه (نسبت D/T) است. گرانروی فرایند تنها در تعیین و تفسیر نتایج فرایند کاربرد دارد. در محاسبه جریان ایجاد شده توسط همزن، گرانروی فرایند به کار می رود. باید توجه داشت که هر دو گرانروی فرایند و پروانه مقادیر متوسطی می باشند.

خواص رئولوژیک عمده سیستمهای پلیمر شدن مانند سیالات شبه پلاستیک است [2] در این گونه سیالات، گرانروی ظاهری با افزایش شدت برش کاهش می یابد. بنابراین، شدت برش در مرکز پروانه، که حداکثر است، از شدت برش در سایر نواحی بیشتر است. پس گرانروی ظاهری پروانه از گرانروی فرایند کمتر خواهد بود.

### تعیین توان مصرفی

یکی از فعالیتهای مهم در طراحی سیستمهای اختلاط تعیین توان مصرفی یا لازم برای چرخش همزن است. هنگامی که جریان داخل مخزن اختلاط در هم باشد، توان لازم از حاصلضرب جریان کل تولید شده توسط همزن و انرژی سینتیک سیال در واحد حجم قابل تخمین است.

توان لازم برای چرخش یک همزن در سیال را می توان علاوه بر نوع همزن تابعی از مشخصه های زیر دانست:

- 1- خواص هندسی سیستم که شامل قطر پروانه D، قطر مخزن T، عمق مایع Z، فاصله پروانه از کف مخزن B، فاصله پروانه از سطح آزاد مایع C، فاصله بین دو پروانه S، پهنای هر پره W، پهنای موجگیر  $W_b$ ، تعداد پره های هر پروانه  $N_b$  و تعداد موجگیرها  $n_b$  است.
- 2- خواص فیزیکی سیال که در برگیرنده چگالی  $\rho$ ، گرانروی  $\mu$  و ویژگیهای رئولوژیک سیال است.

3- کمیت های دینامیکی سیستم که شامل سرعت چرخش پروانه N است.

با استفاده از روش آنالیز ابعادی، تابعیت توان از پارامترهای یاد شده را می توان در قالب معادله زیر بیان کرد:

$$\frac{P_{ge}}{\rho N^3 D^5} = f\left[\left(\frac{D^2 N \rho}{\mu}\right), \left(\frac{DN^2}{g}\right), \frac{D}{T}, \frac{Z}{T}, \frac{C}{D}, \frac{B}{D}, \frac{S}{D}, \frac{W}{D}, \frac{W_b}{D}, n_b, N_b\right] \quad (15)$$

اولین جمله سمت چپ عدد توان  $(N_p)$  نامیده می شود که در خانه ۳ تعریف شده است. نخستین گام در تعیین توان مصرفی همزنها دستیابی به

منحنی  $N_p - N_{Re}$  آنهاست. به طور کلی برای هر سیستم اختلاط با پارامترهای هندسی مشخص یک منحنی خاص  $N_p - N_{Re}$  وجود دارد. متأسفانه این منحنیها تنها برای چند سیستم خاص به دست آمده و ارائه شده اند (مانند شکل ۶ در خانه ۳). از این رو، ضروری است که اثر مشخصه های هندسی سیستم اختلاط بر توان مصرفی شناسایی و در حد امکان مقدار آن پیش بینی شود این مشخصه های هندسی عبارت اند از: اثر موجگیرها، نسبت قطر پروانه به قطر مخزن D/T، اثر محل استقرار پروانه (ها)، تعداد پروانه ها، تعداد و مشخصه های فیزیکی پره همزن و سیال مورد استفاده. مؤلفان با شناسایی اثر هریک از این پارامترها بر  $N_p$  و گردآوری و تکمیل روابط مقتضی از منابع پراکنده، یک روش عمومی برای تصحیح عدد توان پیشنهاد کرده اند [19]. در این مقدار تصحیح شده  $(N_{p,corr})$  حاصلضرب پارامترهای تصحیح هریک از این مشخصه های هندسی در  $N_p$  خوانده شده از منحنیهای عمومی  $N_p - N_{Re}$  خواهد بود.

$$N_{p,corr} = \Pi F_i N_p = [F_b \cdot F_l \cdot F_w \cdot F_{bl} \cdot F_\theta \cdot F_\mu \dots] N_p \quad (16)$$

در این معادله ضرایب تصحیح به ترتیب عبارت از ضریب تصحیح موجگیر، محل استقرار پروانه، پهنای پره همزن، تعداد پره های همزن، زاویه پره ها، گرانروی و غیره است.

### خانه ۳: عدد توان

پارامتر مشخصه توان مصرفی همزنها، عددی بی بعد به نام عدد توان است که طبق معادله زیر تعریف می شود:

$$N_p = \frac{P_{ge}}{\rho N^3 D^5}$$

عدد توان نیز مانند توان مصرفی تابعی از پارامترهای هندسی سیستم، خواص فیزیکی سیال و کمیت های دینامیکی سیستم است. با ثابت نگاه داشتن مشخصه های هندسی سیستم، عدد توان را می توان تنها تابعی از عدد رینولدز ( $N_{Re}$ ) و عدد فرود (Froude Number,  $N_{Fr}$ ) دانست که در مخازن مجهز به موجگیر آثار جاذبه از بین رفته و عدد توان مستقل از عدد فرود می گردد. عدد توان در سیستمهای همگن دارای ویژگیهای زیر است:

- در ناحیه آرام ( $N_{Re} < 10$ ) نیروهای داخلی به وسیله نیروهای گرانرو تحت الشعاع قرار می گیرند. بنابراین نیازی به موجگیر نیست و اصولاً در این ناحیه موجگیر نقشی ندارد. در ناحیه آرام  $N_p$  متناسب با  $N_{Re}^{-1}$  و توان (P) متناسب با  $\mu N^2 D^2$  است.

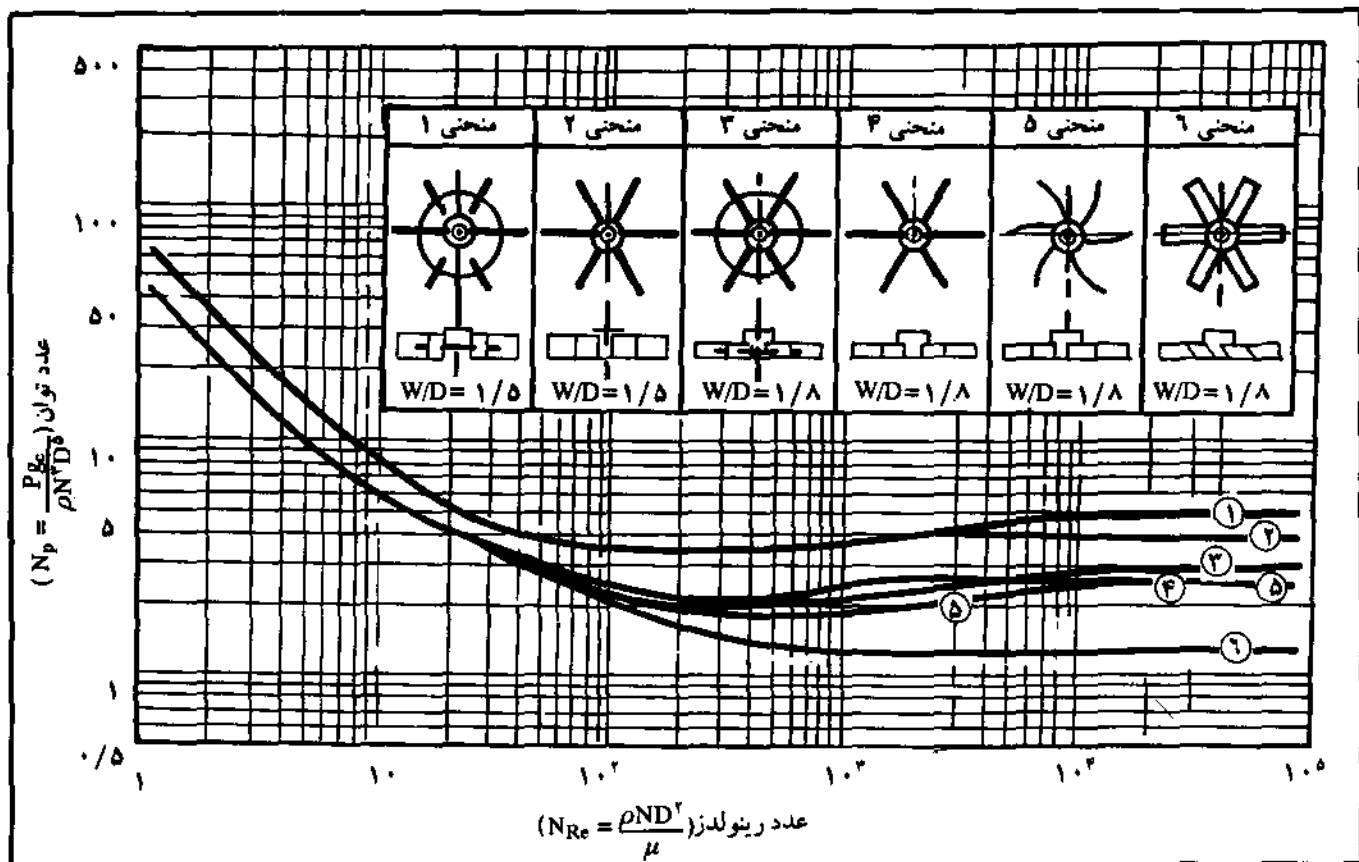
- در ناحیه انتقال ( $10^2 < N_{Re} < 10^4$ ) شیب منحنی  $N_p - N_{Re}$  متغیر است. در این ناحیه هم گرانروی و هم چگالی نقش دارند. به طور تقریبی عدد توان در این



ناحیه با  $N_{Re}^{-1/3}$  تغییر می‌کند [20]

- در ناحیه درهم ( $N_{Re} > 10^3$ ) اثر گرانروی از بین می‌رود و  $N_p$  (مستقل از  $N_{Re}$ ) به مقدار ثابتی می‌رسد. در این ناحیه توان با  $\rho N^3 D^5$  متناسب است.  
شکل ۶، عدد توان را برای شش همزن توربینی مختلف برحسب  $N_{Re}$  در مخازن استاندارد (دارای موجگیر) نشان می‌دهد.

افزایش می‌کند که برای کاربردهای عملی می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت [10]. ولی، پروانه‌های توربینی محوری با افزایش گرانروی توان بیشتری را جذب می‌کنند، به همین دلیل برای سیستمهای پلیمر شدن که گرانروی آنها به تدریج با پیشرفت واکنش افزایش می‌یابد، پروانه‌های شعاعی برتری دارند [21].  
به طور کلی برای هر سیستم اختلاط با خواص

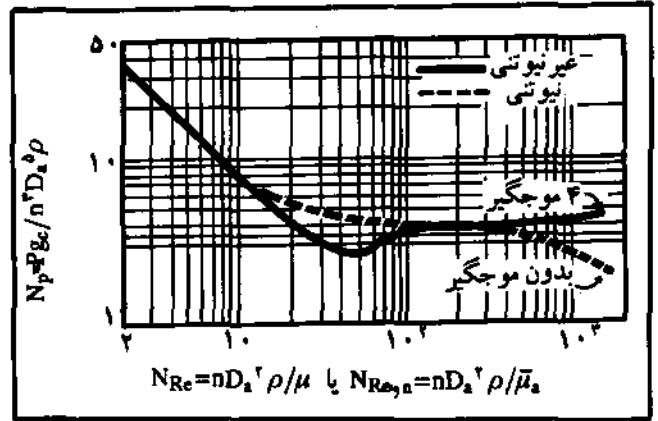


شکل ۶ - منحنی  $N_p - N_{Re}$  برای همزنهای توربینی، مشخصات عمومی سیستمهای اختلاط بالا عبارت‌اند از:  $D/T = 0.33$ ،  $W/T = 1/10$ ،  $C/D = 1$ ،  $(6 و 2)$  برای  $W/T = 1/12$ ،  $C/D = 1$ ،  $6$ ، تعداد پره‌ها و  $4$  = تعداد موجگیرها [16].

فیزیکی و پارامترهای هندسی معین یک منحنی خاص  $N_p - N_{Re}$  وجود دارد. سیالات غیرنیوتنی نیز دارای منحنیهای خاص خود هستند. در میان انواع سیالات غیرنیوتنی، سیالات شبه پلاستیک که بیشترین تطابق را با محلولهای پلیمری دارند، بیشترین شباهت را با سیالات نیوتنی نشان می‌دهند. تنها اختلافی که در مورد منحنیهای  $N_p - N_{Re}$  سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی شبه پلاستیک وجود دارد، در ناحیه انتقالی است. در این ناحیه سیالات شبه پلاستیک توان کمتری نسبت به سیالات نیوتنی مصرف می‌کنند. انتقال از ناحیه جریان آرام به ناحیه انتقالی یا درهم در سیالات شبه پلاستیک تا  $N_{Re} = 40$  (در مقایسه با  $N_{Re} = 10$  برای سیالات نیوتنی) به تأخیر می‌افتد. شکل ۷ منحنی  $N_p - N_{Re}$  را

برطبق این نمودار در میان انواع توربینها، پروانه‌های توربینی محوری کمترین توان را مصرف می‌کنند، در حالی که پروانه‌های توربینی صفحه‌ای بیشترین توان را جذب می‌کنند. پروانه‌های توربینی صاف بعد از نوع صفحه‌ای قرار می‌گیرند. علت این امر تمایل بیشتر پروانه‌های صفحه‌ای به رانش شعاعی سیال است. با افزایش گرانروی، توان مصرفی پروانه‌های توربینی شعاعی در ابتدا کاهش می‌یابد و سپس شروع به

برای یک توربین ۶ پره‌ای در دو حالت سیال نیوتنی و شبه پلاستیک نشان می‌دهد که می‌تواند برای تصحیح  $Np$  خوانده شده از منحنیهای عمومی به کار رود.



شکل ۷ - منحنی  $Np - NRe$  سیالات شبه پلاستیک [22].

مصرفی براساس تجارب عملی قبلی برای یک کاربرد صنعتی خاص، مشخص باشد. در این صورت طراحی برای یافتن قطر همزنی صورت می‌گیرد که حداکثر توان طراحی شده دستگاه را مصرف کند. جدول ۷ توان مصرفی و سرعت همزن را برای سیستمهای پلیمر شدن همگن بر مبنای حداکثر گرانروی نشان می‌دهد.

جدول ۷ - دور همزن مورد نیاز (توربینی) و توان مصرفی (P/V) برای سیستمهای پلیمر شدن همگن (واحد: دور در دقیقه / اسب بخار) [11].

سیستم پلیمر شدن	گرانروی cp	حجم راکتور، گالن*			
		۱۰۰۰	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
امولسیون	۱۰۰۰	۷/۵/۸۴	۱۵/۶۸	۲۰/۴۵	۲۰/۳۷
	۳۰۰۰	۱۰/۶۸	۱۵/۵۶	۲۰/۳۷	۲۵/۳۷
جرمی و محلول	۱۰۰۰	۷/۵/۱۲۵	۲۰/۱۰۰	۲۰/۸۴	۵۰/۶۸
	۵۰۰۰	۱۰/۸۴	۲۵/۸۴	۳۰/۶۸	۷۵/۱۰۰
	۱۰۰۰۰	۱۵/۸۴	۳۰/۶۸	۴۰/۵۶	۷۵/۶۸
	۲۵۰۰۰	۳۰/۱۰۰	۵۰/۶۸	۶۰/۵۶	۱۰۰/۵۶
	۵۰۰۰۰	۶۰/۱۲۵	۷۵/۶۸	۱۰۰/۶۸	۱۵۰/۵۶
۷۵۰۰۰	۷۵/۱۲۵	۱۰۰/۸۴	۱۵۰/۶۸	۲۰۰/۵۶	

\*ضریب تبدیل گالن به لیتر ۳/۷۸۵ می‌باشد.

### روشهای طراحی سیستمهای اختلاط

پس از مشخص شدن خواص سیال مورد نظر و انتخاب نوع همزن و همچنین سیستم اختلاط مناسب، سه متغیر برای بررسی باقی می‌مانند که عبارت‌اند از: قطر همزن، سرعت آن و توان مصرفی. با توجه به آنکه توان مصرفی خود تابعی از سرعت و قطر همزن است، تنها دو متغیر یا دو انتخاب برای سیستمهای اختلاط وجود دارد. بنابراین، هرگونه روش طراحی می‌تواند بر پایه ترکیب دو متغیر از سه متغیر یاد شده به ترتیب زیر بنا گردد:

۱ - قطر همزن و توان (توان به حجم)،

۲ - سرعت و توان همزن،

۳ - قطر و سرعت همزن.

برای بسیاری از سیستمهای اختلاط و از جمله پلیمر شدن، شاخصهای صنعتی نظیر توان به حجم (یا گشتاور به حجم) نیز وجود دارد که امکان استفاده از روش طراحی اول را فراهم می‌کند. دور همزن براساس شاخص یاد شده و همچنین قطر مناسب همزن [2]، محاسبه می‌شود. جدول ۶ دامنه P/V مناسب را برای انواع فرایندهای پلیمر شدن همگن نشان می‌دهد.

جدول ۶ - دامنه P/V پیشنهادی برای انواع سیستمهای پلیمر شدن همگن [2].

پلیمر شدن امولسیونی	پلیمر شدن محلول	پلیمر شدن جرمی
۳-۱۰	۸-۳۵	۱۰-۶۰

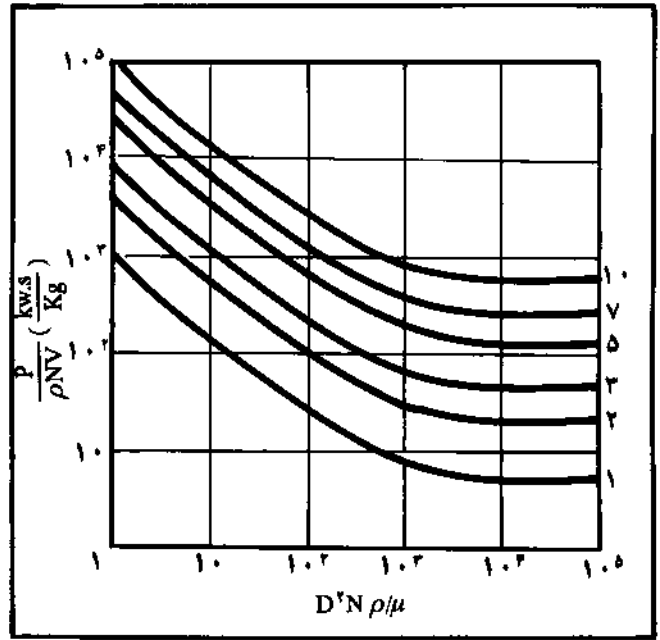
توان به حجم (P/V)  
اسب بخار به هزار گالن

در برخی از موارد نیز ممکن است که سرعت همزن و توان

روش طراحی سوم که متداولترین روش نیز می‌باشد، مبنای مقاله حاضر است و به عنوان بهترین روش توصیه می‌شود. در این روش ابتدا قطر همزن با توجه به ویژگیهای سیستم اختلاط تعیین می‌شود و سپس سرعت همزن براساس روش متداول مقیاس اختلاط یا هر روش دیگر تعیین می‌گردد. توان مصرفی همزن براساس دو متغیر قطر و دور همزن مطابق با آنچه که گذشت محاسبه می‌شود. شکل ۸ محاسبه مستقیم توان مصرفی برحسب مقیاس اختلاط را برای پروانه‌های توربینی ممکن می‌کند [23]. یک برنامه کامپیوتری برای انجام محاسبه‌های مربوط به روش طراحی سوم نوشته شد که امکان ارزیابی و طراحی دقیقتر را فراهم می‌آورد. منحنیهای  $NQ - NRe$  و  $NP - NRe$  برای همزنهای توربینی نیز به شکل معادله‌های جبری در این برنامه کامپیوتری به کار گرفته شد. در جدول ۸ این معادله‌ها ارائه شده است.

شکلهای ۹ و ۱۰ که براساس این برنامه کامپیوتری تهیه شده‌اند، دور لازم را برای اختلاط یک سیستم پلیمر شدن همگن با حداکثر گرانروی ۳۰۰۰ cp و برای  $D/T$  ها و  $N_I$  های مختلف ( $N_I$  بین ۶ تا ۱۰) که برای انواع پلیمر شدن همگن مناسب است) نشان می‌دهد. با افزایش  $D/T$  در  $N_I$  ثابت از دور همزن کاسته می‌شود. با افزایش حجم در  $D/T$  ثابت نیز دور همزن کاهش می‌یابد (شکل ۱۰) با استفاده از این دو منحنی و منحنیهای مشابه می‌توان به طور مستقیم برای هر گرانروی و

شکل ۸- منحنی تعیین P/V بر حسب عدد رینولدز در مقیاس اختلاط [23].



جدول ۸- معادله‌های تجربی توضیح دهنده منحنیهای  $N_Q$  و  $N_p$  -  $N_{Re}$  برای پروانه‌های توربینی ۶ پره با  $\frac{W}{D} = 0.2$  [15].

منحنی  $N_p$  -  $N_{Re}$ :

$$P = 1/0.6 \times 10^{-12} f_{\mu} S_g N^3 D^5$$

$$N_{Re} > 900 \quad f_{\mu} = 1$$

$$8 < N_{Re} < 900 \quad f_{\mu} = \exp [3/154 - 0/848 (\ln N_{Re}) + 0/565 (\ln N_{Re})^2]$$

$$1 < N_{Re} < 8 \quad f_{\mu} = \exp [3/649 - 0/942 (\ln N_{Re}) - 0/106 (\ln N_{Re})^2 + 0/448 (\ln N_{Re})^3]$$

$$N_{Re} < 1 \quad f_{\mu} = (38/4)/N_{Re}$$

منحنی  $N_Q$  -  $N_{Re}$ :

$$N_{Re}^* = N_{Re} \left( \frac{D/T}{0.394} \right)^{1/2}$$

$$N_{Re}^* > 200000 \quad N_Q^* = 0/683$$

$$300 < N_{Re}^* < 200000 \quad N_Q^* = \exp[-5/71 + 1/683 \ln N_{Re}^* - 0/179 (\ln N_{Re}^*)^2 + 0/064 (\ln N_{Re}^*)^3]$$

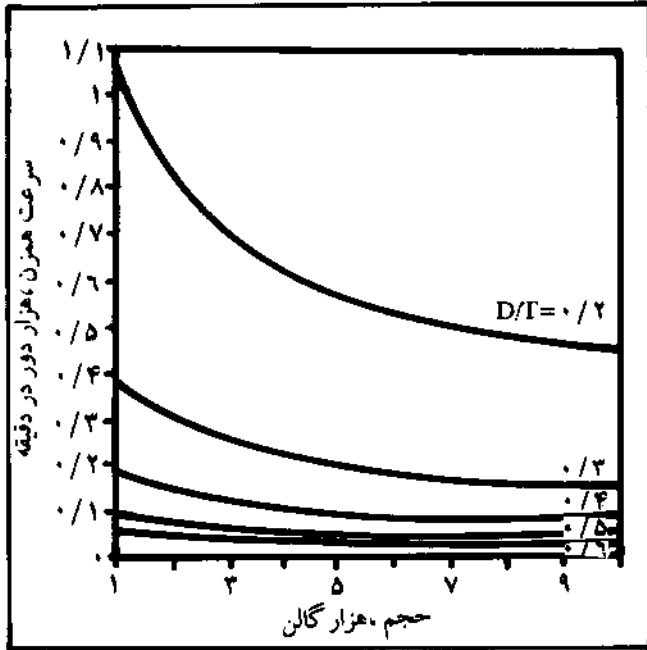
$$25 < N_{Re}^* < 300 \quad N_Q^* = \exp[-0/947 - 0/231 \ln N_{Re}^* - 0/179 (\ln N_{Re}^*)^2 + 0/467 (\ln N_{Re}^*)^3]$$

$$N_{Re}^* < 25 \quad N_Q^* = 0/3$$

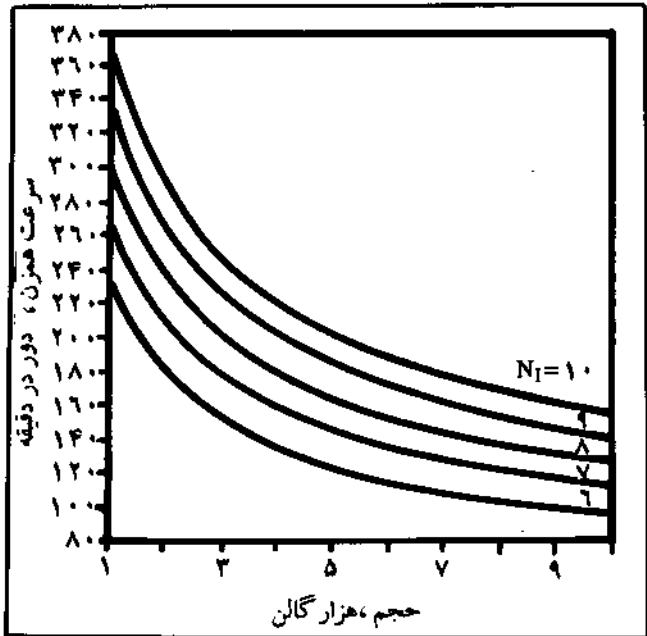
$$N_Q = N_Q^* \left( \frac{0/394}{D/T} \right)^{1/2}$$

حجمی، دور همزن مناسب را تعیین کرد.

شکلهای ۱۱ و ۱۲ به روشی مشابه نسبت P/V را برای این سیستم نشان می‌دهد. نسبت P/V با افزایش حجم مخزن (در  $N_I$  ثابت) کاهش می‌یابد. در  $N_I$  ثابت هرچه نسبت D/T بیشتر باشد، توان مصرفی در واحد حجم کمتر است. به همین دلیل است که در سیستمهای اختلاط حساس به جریان از همزنهایی با D/T بالا استفاده می‌کنند.



شکل ۹- منحنی تغییرات دور همزن با حجم مخزن در D/T ثابت و مقیاس اختلاط ۸ و گرانروی ۳۰۰۰ cp.



شکل ۱۰- منحنی تغییرات دور همزن با حجم مخزن در مقیاس اختلاط ثابت و D/T = 0.33 و گرانروی ۳۰۰۰ cp.

روشهای مختلف طراحی با هم مقایسه شوند. فرض کنید می‌خواهیم سیستم اختلاط مناسب و مشخصه‌های آن را برای یک راکتور پلیمر شدن همگن با حجم ۵۰۰۰ گالن و حداکثر گرانروی ۳۰۰۰ cp تعیین کنیم. سیال نیز نیوتنی فرض می‌شود.

سیستمهای پلیمر شدن همگن به جریان حساس‌اند، به همین دلیل انتخاب  $Z/T$  کوچک (بین ۱ تا ۲) و  $D/T$  بزرگ ( $۰/۴$  تا  $۰/۶$ ) که منجر به ایجاد جریان بیشتری می‌گردند، توصیه شده است [2]. در این مسئله  $Z/T$  برابر با یک در نظر گرفته می‌شود، ولی برای ارزیابی بهتر و امکان مقایسه عملی، نسبت  $D/T$  بین  $۰/۲$  تا  $۰/۶$  اختیار شده است. براساس اطلاعات ارائه شده در بخش اول این مجموعه مقالات [2]، برای سیستم اختلاطی با مشخصات حداکثر گرانروی ۳۰۰۰ cp و حجم راکتور ۵۰۰۰ گالن، ۴ موجگیر استاندارد با پهنای  $T/۱۲$  توصیه می‌شود. نوع همزن انتخاب شده با توجه به حساس بودن سیستم به جریان، توربینی محوری است که چون  $Z/T$  مخزن برابر با یک اختیار شده است، یک همزن کفایت می‌کند.

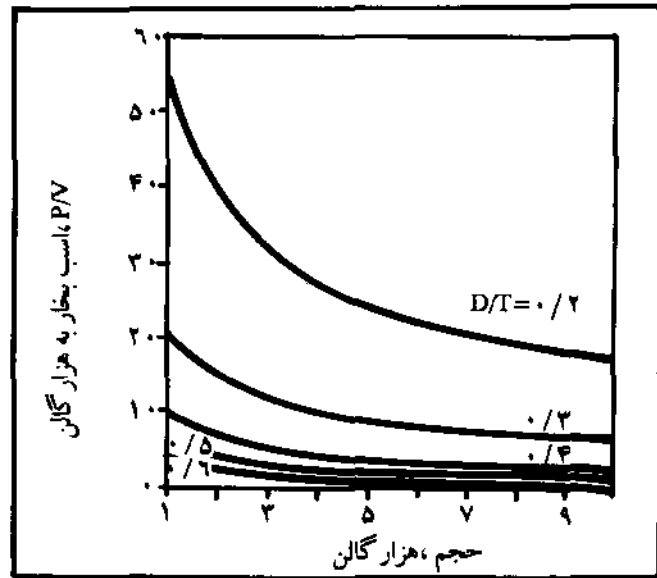
#### گرانروی شاخص سختی اختلاط

گرانروی مهمترین شاخص دشواری اختلاط در فرایندهای پلیمر شدن است. با افزایش گرانروی در طی پیشرفت واکنش پلیمر شدن، جریان به تدریج از ناحیه درهم به ناحیه انتقالی و آرام منتقل می‌شود. در نتیجه، جریان گردشی ایجاد شده به وسیله همزن کاهش یافته و در مقابل توان مصرفی آن افزایش می‌یابد. بنابراین، در فرایندهای پلیمر شدن حداکثر گرانروی که معمولاً در مرحله آخر واکنش به دست می‌آید، باید به عنوان مبنای طراحی انتخاب شود. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اثر افزایش گرانروی را در  $N_I$  ثابت و  $D/T$  های مختلف نشان می‌دهد. هرچه  $D/T$  کوچکتر باشد، اثر افزایش گرانروی بر دور و توان مصرفی همزن شدیدتر است. بنابراین، استفاده از  $D/T$  های بزرگ در پلیمر شدن همگن، دامنه تغییرات توان مصرفی با پیشرفت واکنش را محدود می‌کند.

#### تعیین دور همزن و توان مصرفی

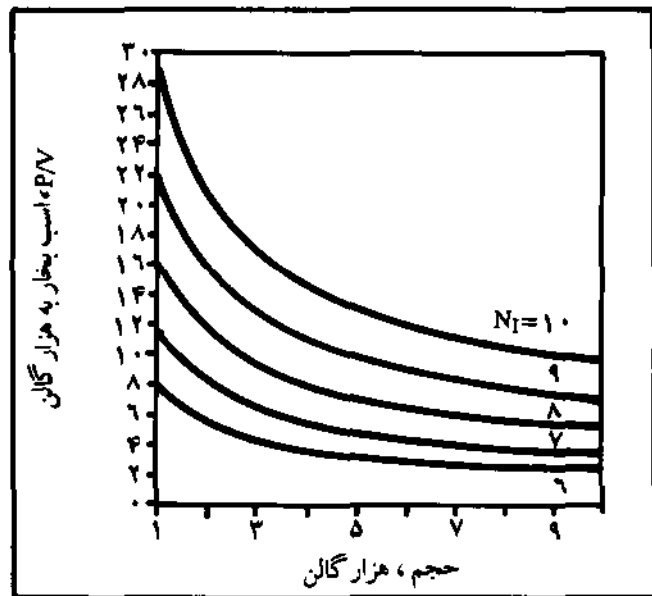
مقیاس اختلاط مناسب برای انواع پلیمر شدنهای جرمی، محلول و امولسیون در جدول ۱ آمده است. برطبق این جدول مقیاس ۸ تا ۱۰ برای فرایندهای پلیمر شدن جرمی و محلول و ۶ تا ۱۰ برای امولسیون توصیه شده است. در اینجا برای تحلیل بهتر نتایج به جای انتخاب یک مقیاس، دامنه مقیاس ۶ تا ۱۰ برگزیده می‌شود و سپس بر مبنای آن توان مصرفی محاسبه می‌گردد.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات  $N$  و  $P/V$  را برای این راکتور در  $D/T$  های مختلف نشان می‌دهد. به طریق مشابه در  $N_I$  ثابت، هرچقدر که  $D/T$  بزرگتر باشد دور لازم برای همزن و توان مصرفی کمتر است. دور همزن مناسب و توان مصرفی آن از این نمودارها قابل استخراج



شکل ۱۱ - منحنی تغییرات  $P/V$  با حجم مخزن در  $D/T$  ثابت و مقیاس اختلاط ۸ و گرانروی ۳۰۰۰ cp.

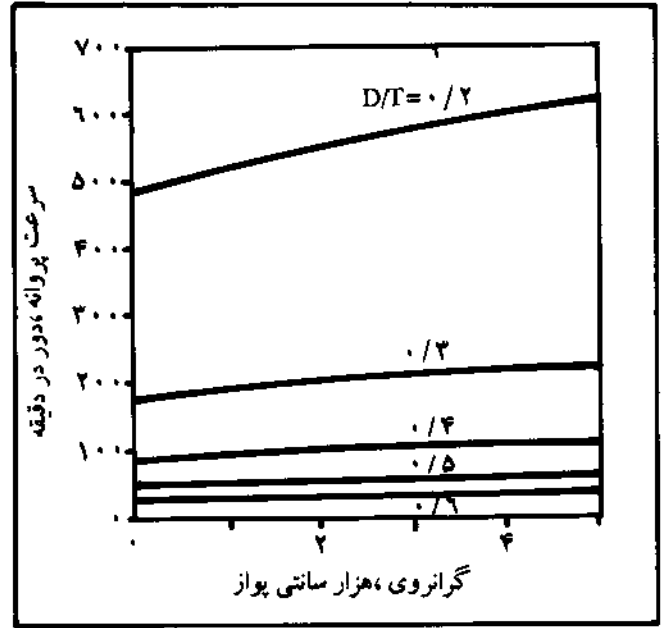
شکل ۱۲ نشان می‌دهد که نسبت  $P/V$  در  $D/T$  و  $N_I$  ثابت با افزایش حجم راکتور کاهش می‌یابد. بنابراین، برای سیستمهای همگن حساس به جریان نسبت  $P/V$  به علت وابستگی به حجم نمی‌تواند شاخص دقیقی برای طراحی این سیستمها باشد و نسبتهای  $P/V$  ارائه شده در جدول ۶ تنها به عنوان یک راهنما می‌تواند به کار رود.



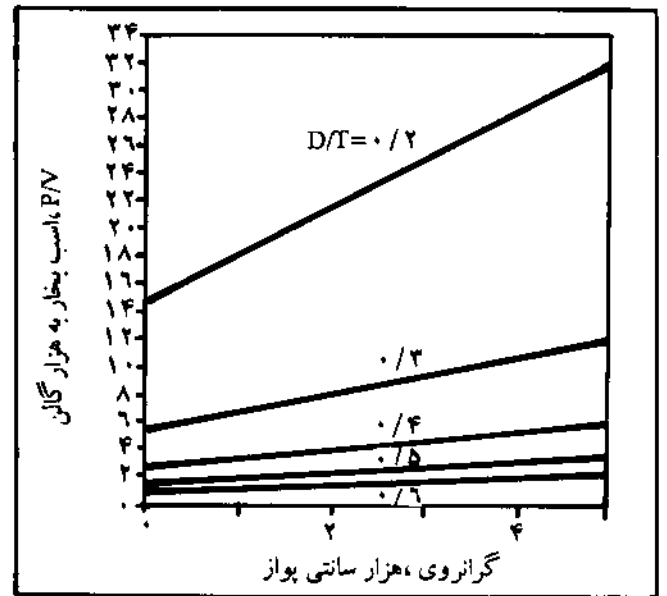
شکل ۱۲ - منحنی تغییرات  $P/V$  با حجم مخزن در مقیاس اختلاط ثابت و  $D/T=۰/۳۳$  و گرانروی ۳۰۰۰ cp.

از این قسمت به بعد، تلاش می‌شود تا از طریق حل یک مسئله

است. جدول ۷ توان مصرفی ۲۰ اسب بخار و دور همزن ۳۷ دور در دقیقه را برای یک سیستم پلیمر شدن امولسیون با شرایط یاد شده پیشنهاد می‌کند. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهند که در دامنه  $D/T=0/55-0/6$  و  $N_1=8-10$  این اعداد مستقیماً از منحنی‌ها قابل استخراج هستند. بنابراین می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد و به نتایج واحدی رسید.

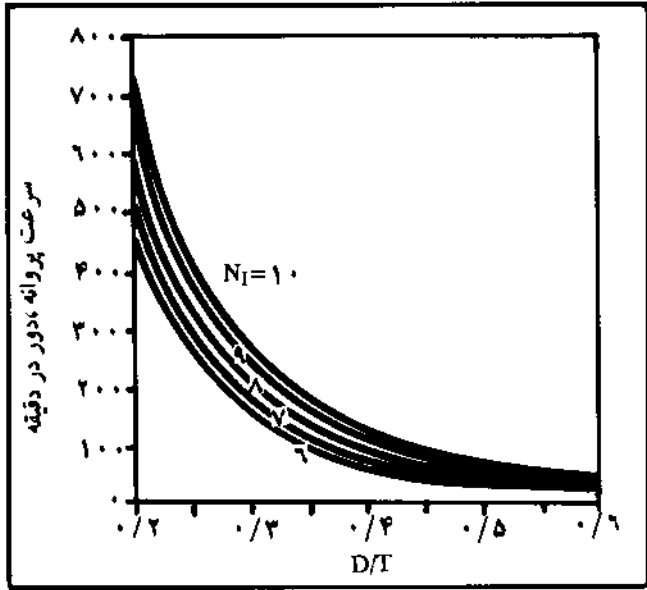


شکل ۱۳ - منحنی تغییرات دور همزن با گرانروی در  $D/T$  های ثابت و مقیاس اختلاط ۸ و حجم ۵۰۰۰ گالن.

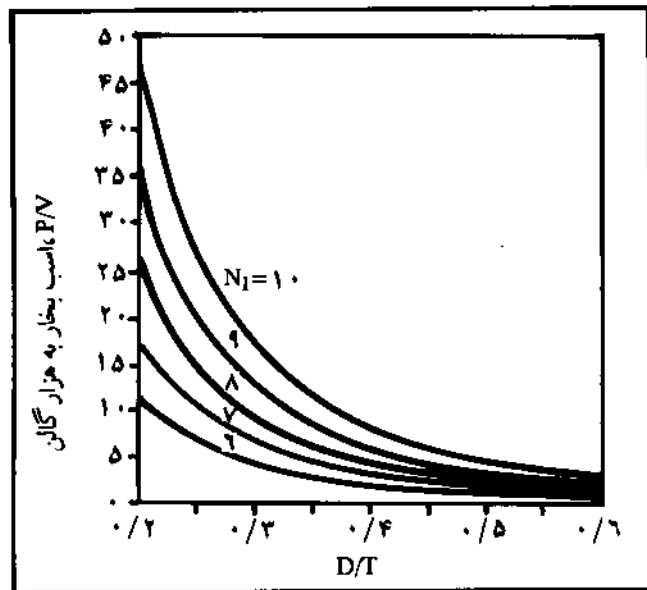


شکل ۱۴ - منحنی تغییرات  $P/V$  با گرانروی در  $D/T$  های ثابت و مقیاس اختلاط ۸ و حجم ۵۰۰۰ گالن.

باید توجه داشت در صورتی که فرایند پلیمر شدن همگن از نوع امولسیونی باشد، سرعت همزن باید به گونه‌ای تنظیم شود که شدت برش همزن باعث دلجه شدن و به هم چسبیدن ذرات ریز پلیمر نگردد. متأسفانه هیچ گونه روش طراحی خاصی برای جلوگیری از این امر ارائه نشده است. در یک منبع حداکثر سرعت مماسی مجاز برای پلیمر شدن امولسیونی برابر با ۸۰۰ فوت بر دقیقه گزارش شده



شکل ۱۵ - منحنی تغییرات دور همزن با  $D/T$  در مقیاس اختلاط ۶ تا ۱۰ و گرانروی ۳۰۰۰ cp در حجم ۵۰۰۰ گالن.

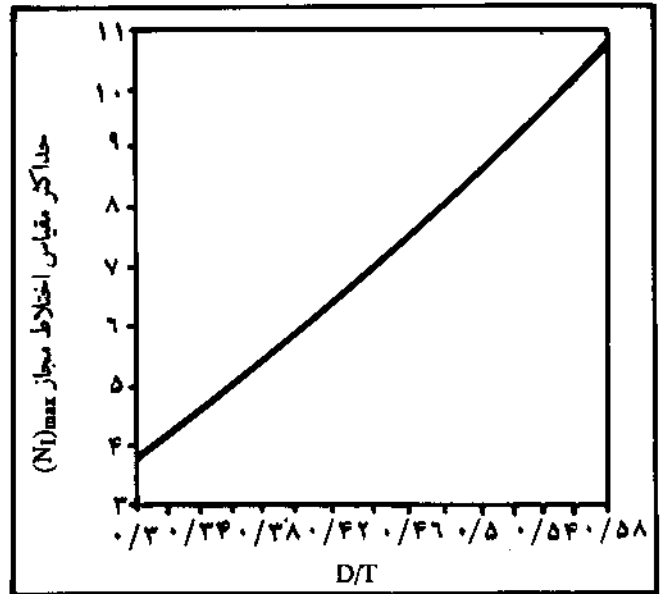


شکل ۱۶ - منحنی تغییرات  $P/V$  با  $D/T$  در مقیاس اختلاط ۶ تا ۱۰ و گرانروی ۳۰۰۰ cp در حجم ۵۰۰۰ گالن.

for Turbine Agitators" Chem. Eng. Dec [6], (1976).

- [4] Holland, F.A. "Scale-up of liquid-Mixing Systems" Chem. Eng. Sept. [17], (1962).
- [5] Bowen, R.L., "Mixing: Agitation Intensity and Scale-up of Flow Sensitive Fluid Systems" Chem. Eng. March [18], (1985).
- [6] Hicks, R.W., Morton J.R., Fenic J.G., "How to Design Agitators for Desired Process Response" Chem. Eng. April [11], (1976).
- [7] Bathija, P.R., "Jet Mixing Design and Application" Chem. Eng. Dec [13], (1982).
- [8] Gates, L.E., Henly T.L., "How to Select the Optimum Turbine" Chem. Eng. Dec. [8], (1975).
- [9] Weber, A.P., "Selecting Turbine Agitators" Chem. Eng. Dec. [7], (1964).
- [10] Casto, L.V., "Practical Tips on Designing Turbine-Mixer Systems" Chem. Eng. Jan. [10], (1972).
- [11] Hicks, R.W., Gates, L.E., "Fluid Agitation in Polymer Reactors" Chem. Eng. Progress Aug. (1975).
- [12] Kuboi, R., Nienow A.W., "Intervortex Mixing Rates in High Viscosity Liquids Agitated by High Speed Impellers" Chem. Eng. Science Vol.41, No.1, P.123-134, (1986).
- [13] Oldshue, Y., "Fluid Mixing Technology", (1983).
- [14] Rose, H.F. "Chemical Reactor Design for Process Plants" Vol.1, (1977).
- [15] Dickey, D.S. "Program Chooses Agitator" Chem. Eng. Jan. [9], (1984).
- [16] Bates, R.L., Fondy, P.L., Fenic, J. "Impeller Characteristic and Power" Chem. Eng. Feb. [2], (1976).
- [17] Holmes, D.B., Chem. Eng. Science, 19, 201, (1964).
- [18] Garrison, C.M., "How to Design and Scale Mixing Pilot-Plants" Chem. Eng. Feb. [1], (1983).
- [19] اختلاط در فرایندهای پلیمر شدن، شهریار سجادی، سپیده دره. [19]
- [20] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, (1988).
- [21] Oldshue, Y., "Mixing: Fundamental and Equipment" Chem. Eng. June [13], (1983).
- [22] McCabe, Smith, Harriot, "Unit Operation of Chemical Engineering" (1985).
- [23] Corpstein, R.R., Dove, R.A., Dickey, D.S., "Stirred Tank Reactor Design" Chem. Eng. Progress, Feb. (1979).

است. شکل ۱۷ که به وسیله مؤلفان براساس این سرعت حداکثر و همچنین معادله ۹ تهیه شده است، نشان می‌دهد که کاربرد مقیاس اختلاط ۶ تا ۱۰ تنها برای سیستمهایی با  $D/T$  بزرگتر از ۰/۴ امکان پذیر است. کاربرد مقیاس اختلاط بالا در  $D/T$  های کوچک منجر به ایجاد چسبندگی بین ذرات پلیمر می‌شود.



شکل ۱۷ - حداکثر مقیاس اختلاط مجاز بر حسب  $D/T$  برای سیستمهای پلیمر شدن امولسیون.

### نتیجه گیری

سیستمهای پلیمر شدن همگن (جرمی و محلول) از جمله سیستمهای حساس به جریان تلقی می‌شوند. پلیمر شدن امولسیون نیز، با وجود آنکه شکل فیزیکی آن ناهمگن است، از دیدگاه کاربردی در گروه سیالات همگن طبقه بندی می‌گردد. زیرا، با اینکه در ابتدا برای توزیع مناسب قطرات مونومر و میسلها برش زیادی مورد نیاز است، ولی بعد از تشکیل لانکس پایدار (در مرحله پلیمر شدن) می‌توان سیستم را مستقل از برش و تنها تابعی از جریان تعریف کرد.

سیستمهای پلیمر شدن همگن رابه رغم افزایش شدید گرانشی می‌توان با انجام یک رشته تصحیحات کلی و معرفی پارامترهای جدید، نظیر تفکیک گرانشی به دو بخش گرانشی پروانه و فرایند، مشابه سیستمهای غیر گرانشی استفاده از روابط عمومی علم اختلاط مورد ارزیابی قرار داد. تعیین نوع و مشخصات همزن، دور همزن و توان مصرفی با این مشابه سازی ممکن می‌شود.

### REFERENCES

- [1] مقدمه‌ای بر مهندسی فرایندهای پلیمر شدن، شهریار سجادی.
- [2] اختلاط در فرایندهای پلیمر شدن (I)، شهریار سجادی، سپیده دره.
- [3] Gates, L.E., Hicks R.W., Dickey D.S. "Application Guidelines