

# شبیه‌سازی، طراحی تجهیزات و برآورد اقتصادی فرایند تولید پلی وینیل کلرید

مجید پاکیزه\*، محمود عطاریان شانديز

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پيام نگار: pakizeh@um.ac.ir

## چکیده

پلی وینیل کلرید<sup>۱</sup> در اواخر قرن نوزدهم کشف شد، ولی تا دهه ۱۹۲۰ به طور تجاری تولید و به بازار عرضه وارد نشد. این بسپار دومین پلاستیک پر مصرف پس از پلی اتیلن است که محصولات آن می‌توانند صلب یا انعطاف پذیر، کدر یا شفاف، رنگی و عایق یا رسانا باشند. بسته به نوع بسپار مورد نیاز، پلی وینیل کلرید به وسیله روش‌های متنوع از جمله تعلیقی<sup>۲</sup>، امولسیون<sup>۳</sup>، در محلول، ریز تعلیقی<sup>۴</sup> و جرمی<sup>۵</sup> تولید می‌شود. در اغلب موارد از بسپارش تعلیقی استفاده می‌شود که شامل تعلیق ذرات مونومر در آب است. در این مقاله در ابتدا کلیاتی در رابطه با شیمی واکنش بسپارش و انواع روش‌های تولید پلی وینیل کلرید ارائه شده است، سپس برآورد اقتصادی یک واحد تولیدی انجام شده است. برای برآورد اقتصادی یک کارخانه به دست آوردن شدت جریان‌های ورودی و محصول نهایی و محاسبه ابعاد همه تجهیزات الزامی است. لذا برای به دست آوردن شدت جریان‌های جرمی، شبیه‌سازی فرایند صورت گرفته است که در این مطالعه شبیه‌سازی فرایند تولید با نرم‌افزار اسپن بسپار پلاس<sup>۶</sup> انجام شده است و در ادامه با استفاده از نتایج بخش شبیه‌سازی فرایند، طراحی تجهیزات انجام شده است. در مرحله بعدی با در اختیار داشتن ابعاد تجهیزات، قیمت تجهیزات محاسبه شده و برآورد اقتصادی کارخانه انجام شده است. نتایج نشان داد که از لحاظ اقتصادی برای واحد تولیدی پلی وینیل کلرید با ظرفیت ۴۵۰۰۰ تن در سال، سرمایه ثابتی معادل ۱۸۲۷۵۰۰۰ دلار و سرمایه عملیاتی معادل ۲۷۴۲۰۰۰ دلار مورد نیاز است.

**کلمات کلیدی:** تولید پلی وینیل کلرید، برآورد اقتصادی، شبیه‌سازی

## ۱- مقدمه

واکنش‌ناپذیر، دارای تنوع بسیار زیاد و ارزان قیمت است که در جامعه مدرن کاملاً فراگیر شده و یکی از ارزشمندترین محصولات صنایع شیمیایی و بسپاری است. در حالی که اکثر پلاستیک‌ها از نفت خام تشکیل می‌شوند، فقط ۴۰ درصد پلی وینیل کلرید از نفت خام است و ۶۰ درصد باقی مانده آن را کلر تشکیل می‌دهد که از نمک طعام حاصل می‌شود. این بسپار بر حسب حجم تولیدی آن در رده دوم بعد از پلی اتیلن جای دارد [۱]. پلی وینیل کلرید به مجموعه‌ای از افزودنی‌ها نیاز دارد تا آن را قابل استفاده کند. سرب،

پلی وینیل کلرید که بیشتر با عنوان پلی وینیل کلرید شناخته شده است، به طور اتفاقی در قرن نوزدهم توسط هنری ویکتور رینالت<sup>۷</sup> و ایگن بایومان<sup>۸</sup> کشف شد. این بسپار گرما نرمی سخت،

1. PVC
2. Suspension Polymerization
3. Emulsion Polymerization
4. Microsuspension Polymerization
5. Mass Polymerization
6. ASPEN POLYMER PLUS
7. Henri Victor Regnault
8. Eugen Baumann

واکنش بسپارش زمانی شروع می‌شود که آغازگر تخریب شده و به ازای هر مولکول آن، دو رادیکال آزاد تشکیل می‌شود. یک قطعه از آغازگر به یک مولکول مونومر کلرید اضافه شده و رادیکال مونومر واکنش پذیر را ایجاد می‌کند. سپس رادیکال‌های مونومر آزاد هستند تا با سایر مولکول‌های وینیل کلرید ترکیب شده و زنجیر بسپار را ایجاد کنند.

پایان واکنش زمانی به دست می‌آید که اختتام دهنده واکنش مانند بوتادی‌ان به راکتور اضافه شود. این عمل موجب کاهش میزان رادیکال‌های آزاد می‌شود. کاهش میزان رادیکال‌های آزاد به وسیله اتصال دوتایی به هم یا به مولکول‌های دیگر انجام می‌شود. اتصال به هم به اتصال دو زنجیر منجر می‌شود تا یک زنجیر را با جرم مولکولی مساوی با جمع جرم مولکولی هر کدام از آنها شکل بدهد [۱۵].

در اتصال به مولکول‌های دیگر، هر چند دو زنجیر به هم متصل نمی‌شوند، اما تبادل می‌کنند تا یک یون هیدروژن به حالت پایداری در یک زنجیر برسد، اما زنجیر دیگر دارای دو باند وینیل در دنباله خودش باشد.

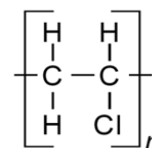
### ۳- روش‌های تولید پلی وینیل کلرید

#### ۳-۱ فرایند بسپارش تعلیقی

روش عمده برای بسپارش مونومر وینیل کلرید به پلی وینیل کلرید، بسپارش تعلیقی است. نمای کلی تولید پلی وینیل کلرید در شکل (۲) نشان داده شده است.

کادمیم یا ترکیبات آلی قلع به عنوان پایدارکننده، فتالات‌ها به عنوان نرم‌کننده و سایر مواد شیمیایی به عنوان رنگ‌دهنده‌ها، بازدارنده‌های آتش، پرکننده‌ها و ضد اکسنده‌ها در پلی وینیل کلرید استفاده می‌شوند [۲]. در حال حاضر مصرف جهانی این بسپار ۲۷/۴ میلیون تن در سال است که رقمی معادل ۱۶ درصد از مصرف بسپارهای اساسی را به خود اختصاص می‌دهد. پیش بینی می‌شود که تا سال ۲۰۱۳ مصرف این بسپار در جهان بالغ بر حدود ۳۸/۸ میلیون تن شود [۳].

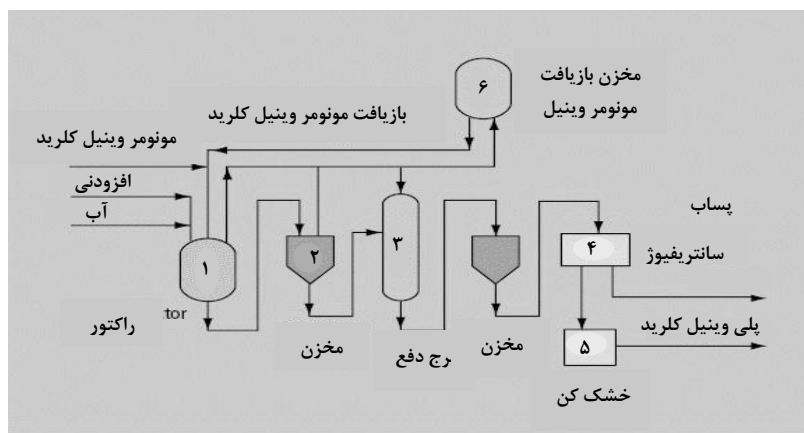
واحد پایه پلی وینیل کلرید شامل ۲ اتم کربن، ۳ اتم هیدروژن و ۱ اتم کلر می‌باشد. گروه سی ۱<sup>۱</sup> به زنجیر اصلی به صورت نامنظم متصل شده است (اتاکتیک) و یک ساختار بسپار بی‌شکل را تشکیل داده است. ساختار فرمولی پلی وینیل کلرید در شکل (۱) دیده می‌شود [۴].



شکل ۱- ساختار فرمولی پلی وینیل کلرید [۲]

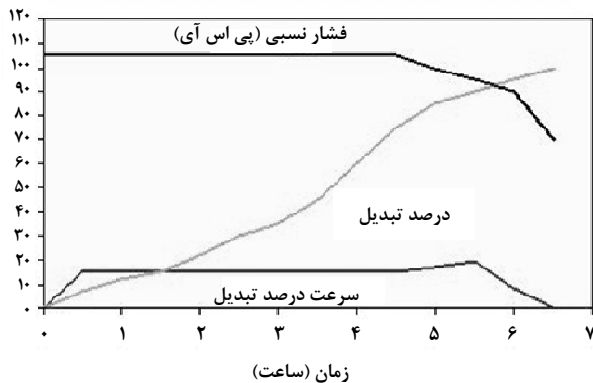
#### ۲- شیمی فرایند پلی وینیل کلرید

شیمی فرایند پلی وینیل کلرید از چهار مرحله اصلی تشکیل شده است که شامل مراحل آغاز، انتشار رادیکال مونومر واکنش‌پذیر، انتقال زنجیر و اختتام می‌باشد.



شکل ۲- فرایند بسپارش تعلیقی (۱) راکتور (۲) مخزن (۳) برج دفع (۴) سانتریفیوژ (۵) خشک کن (۶) مخزن باز یافت تکپار وینیل کلرید [۴]

مونومر مایع آزاد مصرف می‌شود، افت فشار سریع تر اتفاق می‌افتد. در ابتدا بسپارش به سرعت ادامه می‌یابد، چون عدم تحرک زنجیر رشد کننده از اختتام زنجیر جلوگیری می‌کند، اما وقتی که درصد تبدیل به بیش از ۸۵-۸۰ درصد افزایش یافت، کمبود مونومر سرعت واکنش را به شدت کاهش می‌دهد [۱۶]. نیمرخ تغییرات فشار و درصد تبدیل واکنش در شکل (۴) دیده می‌شود [۴].



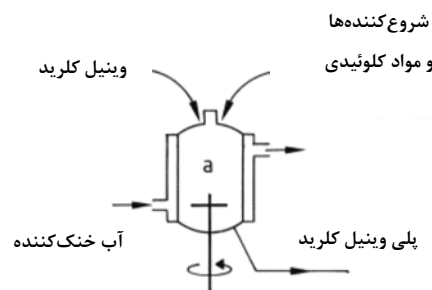
شکل ۴- پروفیل فشار و درصد تبدیل برای واکنش بسپارش تعلیقی [۴]

پایان واکنش در راکتور به دو صورت انجام می‌شود: افزودن اختتام‌دهنده واکنش، جدا کردن مونومر واکنش نکرده از راکتور [۱]. مونومر واکنش ن داده با عبور از برج دفع جدا می‌شود. آب موجود در جریان نیز، با عبور از سانتریفوژ و سپس خشک کن جدا می‌شود. در این روش تولید، نیمی از آب موجود در جریان در سانتریفوژ و نیمی دیگر در خشک کن جدا می‌شود [۲].

### ۳-۲ فرایند بسپارش ریز تعلیقی

روش تولید پلی وینیل کلرید ریز تعلیقی بدین شرح است که خوراک ورودی شامل مونومر وینیل کلرید، آب، آغازگر واکنش و امولسیون کننده<sup>۵</sup> در یک مخزن با هم مخلوط می‌گردند. این ترکیبها به وسیله پمپ اختلاط (همگن کننده) مخلوط شده تا خوراک ورودی به راکتور پیش از وارد شدن به راکتور اتوکلاو، به ذرات خیلی ریز پخش شود. واکنش‌های آغاز و بسپارش درون ذرات روی می‌دهد [۱]. همان طور که از نام فرایند مشخص است، قطر ذرات پلی وینیل کلرید از محدوده ۰/۲-۳  $\mu\text{m}$  کوچکتر است و

روش تولید پلی وینیل کلرید تعلیقی به این صورت است که خوراک ورودی شامل مونومر وینیل کلرید، به همراه آب، آغازگر واکنش (پروکسیدهای آلی)، کلونید محافظ<sup>۱</sup> و عامل تعلیق کننده<sup>۲</sup> (مانند پلی وینیل الکل) وارد راکتور ناپیوسته<sup>۳</sup> (اتوکلاو) شده و در راکتور، واکنش بسپارش انجام می‌شود. در حالت عادی اجازه داده می‌شود، واکنش تا حدود ۹۰ درصد بسپارش مونومر کلرید پیش برود. خوراک ورودی به راکتور می‌تواند به طور ساده شامل آب، مونومر وینیل کلرید، آغازگر و عامل تعلیق باشد که میزان ترکیب درصد آنها به صورت زیر است: ۱۰۰ قسمت مونومروینیل کلرید، ۹۰-۱۳۰ قسمت آب، ۰/۰۵-۰/۱۵ قسمت کلونید محافظ و ۰/۰۳-۰/۰۸ قسمت آغازگر. این مقادیر با توجه به نوع پلی وینیل کلرید، نوع دستگاه و اندازه راکتور متفاوتند [۴ و ۱]. نمای یک نوع راکتور اتوکلاو در شکل (۳) دیده می‌شود.



شکل ۳- راکتور اتوکلاو برای واکنش بسپارش تعلیقی [۴]

پس از پر کردن راکتور، محتویات آن در محدوده دمایی  $45-75^\circ\text{C}$  گرم می‌شوند. در این مرحله راکتورها در حدود ۸۰-۹۵ درصد پر هستند. گرما باعث تخریب مقداری از آغازگر به رادیکال آزاد شده و مونومر در قطره‌هایی شروع به بسپارش می‌کند. برای کنترل میزان پیشرفت واکنش بایستی دمای راکتور کنترل شود. برای این کار با توجه به گرمازا بودن واکنش ( $154.0 \text{ kJ/kg}$ ) بایستی گرما از راکتور حذف شود. حذف گرما از راکتور از راه ژاکت یا به وسیله خارج کردن بخار درون چگالنده انجام می‌شود. فشار در راکتور ابتدا به کندی شروع به افت می‌کند، اما پس از آن همان طور که آخرین

1. Protective Colloid
2. Suspending Agent
3. Batch Reactor
4. Autoclaves

5. Emulsifier  
6. Homogenizer

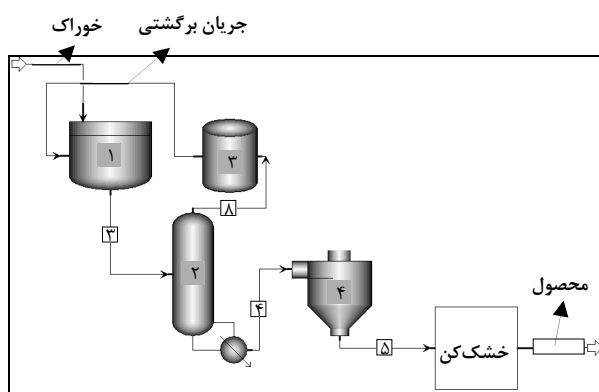
شبیه‌سازی واحدهای تولیدی بوسیله نرم افزارهای خاص است. استفاده از هر یک از نرم افزارهای شیمیایی علاوه بر صرفه جویی در وقت و کاهش هزینه ها، امکان بررسی سناریوهای مختلف بر بازدهی فرایند را نیز فراهم می‌آورد [۷]. شبیه‌سازی به معنی بدست آوردن اطلاعات خروجی (بطور مثال مشخصات محصول) از طریق حل مدل، براساس اطلاعات ورودی (به طور مثال مشخصات خوراک) می‌باشد. در این میان، اطلاعات مربوط به مشخصات دستگاه‌ها جزئی از مدل به شمار می‌روند و قسمتی از آنها توسط کاربر به نرم‌افزار داده می‌شود [۸]. در این بخش، برای شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار اسپن پلیمر پلاس استفاده شده است. پلیمر پلاس یک شاخه از نرم‌افزار اسپن<sup>۳</sup> محسوب می‌شود که قابلیت شبیه‌سازی فرایندهای تولید و محاسبه خواص بسپارها را دارد [۹]. در این مقاله، شبیه‌سازی فرایند تولید پلی وینیل کلرید به روش بسپارش تعلیقی صورت گرفته است [۱۰].

از آن جا که الگوی شبیه‌سازی بسپارها با یکای متریک<sup>۴</sup> انتخاب شده است، در صورت اجراء، اسپن پلاس برای گزارش نتایج پیش فرض‌های زیر را انجام می‌دهد:

۱- هیچ گونه جریان مولی را تعیین نمی‌کند.

۲- جریان جرمی را گزارش می‌دهد [۱۰].

در شکل (۵) طرح کلی فرایند تولید پلی وینیل کلرید به روش تعلیقی ارائه شده است. این طرح کلی توسط نرم‌افزار اسپن بسپار پلاس رسم شده و نتایج حاصل از آن در ادامه ارائه می‌شود.



شکل ۵- شبیه‌سازی فرایند بسپارش تعلیقی در نرم‌افزار اسپن پلیمر پلاس. (۱ راکتور (۲ برج دفع (۳ مخزن (۴ سانتریفوژ (۵ خشک‌کن [۴]

مقدار تخلخل آن‌ها نیز خیلی کم است. عملیات بعدی برای بدست آوردن محصول نهایی، مشابه با فرایند بسپارش امولسیون است [۳].

### ۳-۳ فرایند بسپارش امولسیونی

در روشی که در آن پلی وینیل کلرید به صورت امولسیونی تولید می‌شود خوراک اولیه که شامل مونومر وینیل کلرید می‌باشد در مجاورت آب، آغازگر محلول در آب (پروکسو سولفات<sup>۱</sup> و غیره) و امولسیون کننده (مواد فعال سطحی آنیونی) بسپارش می‌گردد. افزایش آهن یا مس نیز برای افزایش تخریب آغازگر (کاتالیزور اکسایش- کاهش<sup>۲</sup>) استفاده می‌شود [۱]. در مرحله بعد برای جدا کردن آب از امولسیون شیری (لاتکس) حاصل، از روش تبخیر به وسیله دستگاه خشک کن استفاده می‌شود. محصول حاصل در نهایت وارد فرایند آسیابی می‌شود تا اندازه کلوخه‌ها در این مرحله اصلاح شود و محصول نهایی بدست آید [۳].

### ۳-۴ فرایند بسپارش توده‌ای یا جرمی

در این فرایند، بسپارش در غیاب حامل از قبیل آب انجام می‌شود. فرایند بسپارش توده‌ای یا جرمی مونومر وینیل کلرید، به وسیله فرایندی دو مرحله‌ای انجام می‌شود. در مرحله اول (پیش بسپار) برای بدست آوردن توزیع مناسب اندازه ذرات هم‌زدن شدیدی صورت می‌گیرد. مونومر و آغازگر وارد سامانه شده و بسپارش تا ۱۰ درصد تبدیل پیش می‌رود که در این موقع ذرات تشکیل شده در توده مونومر وینیل کلرید پخش می‌شوند.

در مرحله دوم (بسپارش)، این مواد به آهستگی به هم خورده و مونومر و آغازگر اضافی افزوده می‌شوند. مزیت مربوط به مناسب بودن هزینه این فرایند (بدون مرحله خشک کردن)، مشکلات حذف جزئی مونومر وینیل کلرید از بسپار و تولید مقداری مواد با اندازه بیش از حد را جبران می‌کند. فقط تعداد اندکی از تولیدکنندگان، پلی وینیل کلرید را به روش توده تولید می‌کنند و این روش کمتر از ۱۰ درصد پلی وینیل کلرید جهان را در بر می‌گیرد [۱].

### ۴- شبیه‌سازی

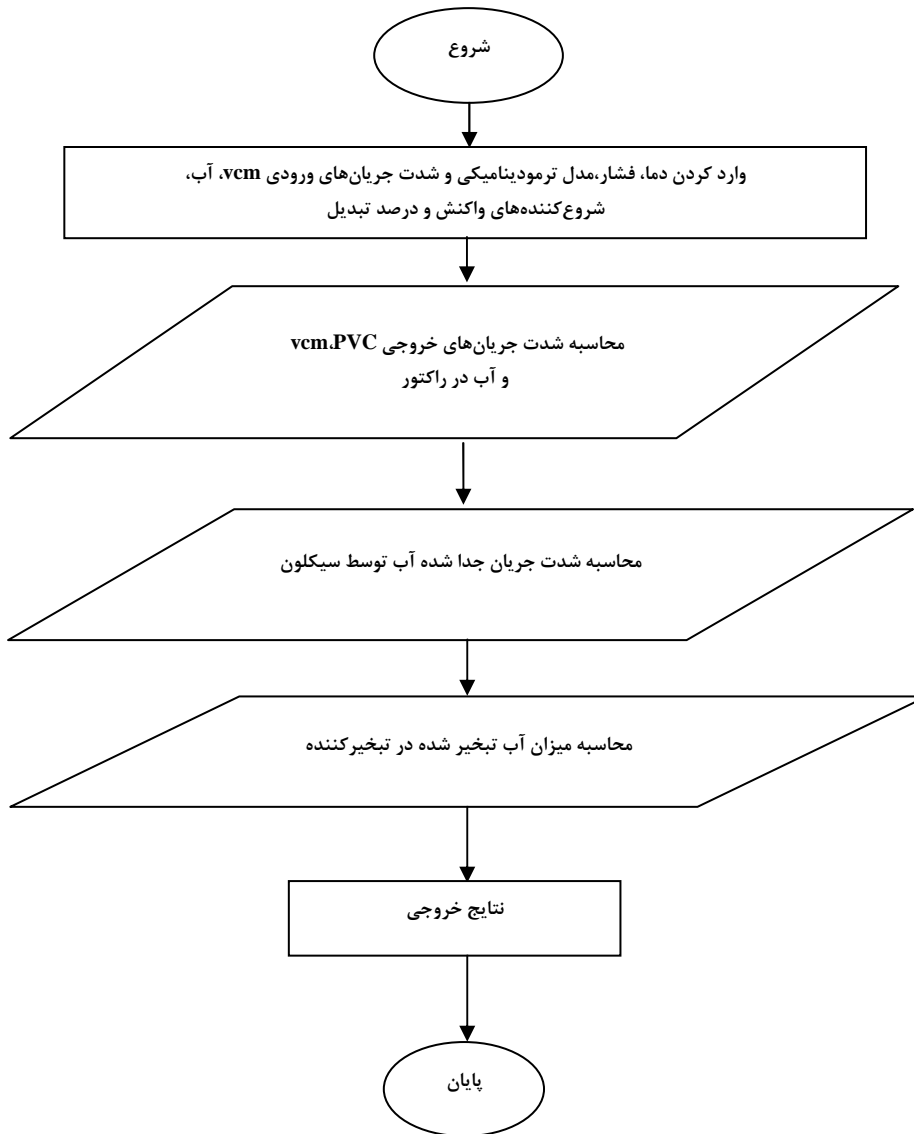
یکی از کاربردهای موثر کامپیوتر در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی،

3. ASPEN

4. Polymers with Metric Units

1. Peroxosulphate

2. Redox



شکل ۶- الگوریتم شبیه ساز [۴۰۹۱۰]

جریان‌های خروجی، درصد ترکیب‌ها، دما و فشار محاسبه می‌شود. با وارد کردن اطلاعات برج دفع از قبیل میزان جریان‌های برگشتی در بالا و پایین برج، دما، فشار و تعداد سینی‌های برج عملیات دفع صورت می‌گیرد و شدت جریان‌ها و ترکیب درصدهای خروجی محاسبه می‌شود. در مراحل بعدی آب موجود در محصول جدا می‌شود که ۵۰٪ آن با عبور از سیکلون و ۵۰٪ دیگر با عبور از تبخیرکننده حذف می‌گردد [۱۰ و ۹].

در جدول (۱) شرایط عملیاتی راکتور از قبیل دما، فشار و زمان بسپارش ارائه شده است.

در ابتدا مواد واکنش، سینیتیک واکنش بسپارش، نوع راکتور و نوع مدل ترمودینامیکی از منوی شبیه‌ساز انتخاب می‌شوند. پارامترهای سینیتیکی واکنش بسپارش با استفاده از بانک اطلاعاتی شبیه ساز و وارد کردن اطلاعات دما و فشار و انتخاب نوع واکنش بسپارش (رادیکال آزاد) بدست می‌آید. در شبیه ساز مدل‌های سینیتیکی، انتقال جرم و ترمودینامیکی با معادلات موازنه جرم و انرژی ترکیب می‌شوند و فرایند به صورت عددی حل می‌شود [۹].

با داشتن اطلاعات ارائه شده و وارد کردن میزان درصد تبدیل، واکنش صورت می‌گیرد و خروجی‌های راکتور از قبیل شدت

## ۵- طراحی تجهیزات

### ۵-۱ درام‌ها<sup>۱</sup>

مخازن مایع عموماً به صورت افقی بوده و جداکننده گاز- مایع به صورت عمودی می‌باشند ولی در درام جریان برگشتی، عموماً از مخازن افقی استفاده می‌شود. نسبت قطر به ارتفاع در درام‌ها بین ۲-۵ می‌باشد. کمترین قطر برای فشارهای بالا و جداسازی مایع- مایع می‌باشد. حجم مخزن به شدت جریان وابسته است اما در تعیین حجم به پارامترهای ایمنی فرایند از قبیل نوع کنترل، خشک کردن تجهیزات بعدی (تمام شدن خوراک تجهیزات) و غیره باید دقت شود. عموماً حجم بر اساس مدت زمان پر شدن نصف مخزن محاسبه می‌شود. برای بسیاری از سرویس‌ها این زمان بین ۵-۱۰ دقیقه می‌باشد. اکنون با داشتن زمان پر شدن و شدت جریان حجمی ورودی، حجم محاسبه می‌شود  $(\Gamma = \frac{V}{Q})$  و با داشتن نسبت طول به قطر، قطر و طول محاسبه می‌گردد [۱۱].

### ۵-۲ سیکلون‌ها

عموماً طراحی سیکلون‌ها به صورت تجربی بوده و بر اساس دو طرح استاندارد محاسبات طراحی انجام می‌شود:

۱- سیکلون با بازدهی بالا

۲- سیکلون با توان بالا

برای هر کدام از این سیکلون‌ها منحنی عملکرد وجود دارد که با توجه به منحنی عملکرد سیکلون طراحی انجام می‌شود. در طراحی سیکلون‌ها می‌توان به جای رسم منحنی عملکرد با در نظر گرفتن سرعت ورودی بین ۹-۲۷ m/s طراحی را انجام داد. سرعت بهینه حدود ۱۵ m/s می‌باشد. با داشتن سرعت بهینه و شدت جریان حجمی سطح مقطع و سپس قطر محاسبه می‌شود [۱۱].

### ۵-۳ خشک‌کن‌ها

برای طراحی خشک‌کن‌ها، مقدار انرژی عبوری از سطح مشترک گاز- جامد براساس شرایط ورودی و خروجی جامد محاسبه می‌شود. از آنجا که معمولاً در فرایندهای خشک کردن لازم است مایع که به طور فیزیکی پیوند برقرار کرده خارج شود، گرمای انحلال یا جذب

جدول ۱- شرایط عملیاتی راکتور [۳]

فشار بسپارش (bar)	۳-۱۰
دمای بسپارش (°C)	۲۵-۷۵
زمان بسپارش (h)	۵-۸
درصد تبدیل واکنش	تقریباً ۹۰٪

در جدول (۲) اطلاعات جریان خوراک ورودی آمده است.

جدول ۲- اطلاعات خوراک ورودی [۱۳]

اطلاعات	خوراک ورودی
۷۰	دما (°C)
۷	فشار (bar)
۵۶۹۱/۸۹۸	شدت جریان جرمی آب $(\frac{kg}{h})$
۵۱۴۷/۵۴۲	شدت جریان جرمی مونومر وینیل کلرید $(\frac{kg}{h})$
۱۰۸۶۶/۳۵	شدت جریان کل $(\frac{kg}{h})$

در جدول (۳) نتایج جریان محصول خروجی که شامل شدت جریان جرمی محصول می‌باشد ارائه شده است.

جدول ۳- اطلاعات محصول [نتایج شبه‌سازی]

اطلاعات	محصول خروجی
قابل صرف نظر	شدت جریان جرمی آب $(\frac{kg}{h})$
قابل صرف نظر	شدت جریان جرمی مونومر وینیل کلرید $(\frac{kg}{h})$
۵۱۷۴/۴۵۵	شدت جریان جرمی پلی وینیل کلرید $(\frac{kg}{h})$
۵۱۷۴/۴۵۵	شدت جریان کل $(\frac{kg}{h})$

1. Drums

برای محاسبه قیمت تجهیزات در سال ۲۰۱۲ از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$\text{قیمت سال } ۲۰۱۲ = \frac{\text{cost index } 2012}{\text{cost index } 2002} \times (\text{قیمت سال } ۲۰۰۲) \quad (۳)$$

قیمت به روز شده تجهیزات در شکل (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- لیست و قیمت تجهیزات سال ۲۰۱۲ [۱۲]

لیست تجهیزات	قیمت تجهیزات به دلار \$
راکتور	۲۱۴۶۵۶۲
برج دفع	۱۶۵۴۵۱۹
مخزن جریان برگشتی	۱۰۱۸۶
کوره دوار	۵۵۳۹۷
سیکلون	۱۱۸۱۹۷
قیمت کل تجهیزات	۴۰۰۰۰۰۰

اکنون با داشتن قیمت تجهیزات، هزینه‌های مستقیم که شامل دستگاه‌های خریداری شده، نصب به همراه عایق کاری و نقاشی، ابزار دقیق و کنترل و غیره می‌باشد محاسبه می‌شود. لیست و قیمت هر یک از موارد هزینه‌های مستقیم در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- لیست و قیمت هزینه‌های مستقیم [۱۲]

هزینه‌های مستقیم	قیمت به دلار \$
دستگاه خریداری شده	۴۰۰۰۰۰۰
نصب به همراه عایق کاری و نقاشی	۱۲۰۰۰۰۰
ابزار دقیق و کنترل، نصب شده	۶۰۰۰۰۰
لوله کشی، نصب شده	۱۲۰۰۰۰۰
برق، نصب شده	۸۰۰۰۰۰
ساختمان‌ها، فرایندها و خدمات جانبی	۱۲۰۰۰۰۰
خدمات رفاهی و محوطه سازی	۲۴۰۰۰۰۰
زمین	۲۰۰۰۰۰۰
جمع	۱۱۶۰۰۰۰۰

ناچیز بوده و فقط در محاسبات موازنه انرژی گرمای نهان در نظر گرفته می‌شود. اتلاف انرژی در تجهیزات مخصوص تماس جامد-گاز بین ۵ تا ۱۵ درصد انرژی مصرف شده در فرایند خشک کردن است. برای خشک کن دوار پارامتر ضریب کلی انتقال گرما (U) و پارامتر بار حرارتی (Q) از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$U=60 G^{0.67} \quad (۱)$$

$$Q=UA \Delta T^{log} \quad (۲)$$

که در معادلات آمده  $\Delta T^{log}$  بر اساس اختلاف دمای حباب خشک گاز و دمای حباب مرطوب گاز در ورودی و خروجی خشک کن محاسبه می‌شود. G شار جرمی است. با داشتن  $\Delta T$ ، U و Q، سطح انتقال گرما محاسبه می‌شود [۱۲].

#### ۶- برآورد اقتصادی

مرحله اول در برآورد اقتصادی محاسبه قیمت تجهیزات می‌باشد. برای محاسبه قیمت تجهیزات از مرجع ۱۳ استفاده شده است. جنس همه تجهیزات از فولاد ضد زنگ می‌باشد. قیمت تجهیزات برای سال ۲۰۰۲ است. لذا برای به روز کردن قیمت تجهیزات از شاخص‌های اقتصادی استفاده می‌شود [۴]. شاخص اقتصادی سال ۲۰۰۲ معادل ۳۹۵/۶ و شاخص اقتصادی سال ۲۰۱۲ معادل ۵۹۶/۲ می‌باشد [۱۳].

لیست و قیمت تجهیزات در سال ۲۰۰۲ در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴- لیست و قیمت تجهیزات سال ۲۰۰۲ [۱۲]

لیست تجهیزات	قیمت تجهیزات به دلار \$
راکتور	۱۴۲۴۳۲۱
برج دفع	۱۰۹۷۸۸۹
مخزن جریان برگشتی	۶۷۵۹
کوره دوار	۳۶۷۶۰
سیکلون	۷۸۴۳۲

جدول ۹- لیست و قیمت هزینه‌های تولید مستقیم [۱۲]

هزینه‌های مستقیم تولید	قیمت به دلار \$
مواد اولیه	۱۱۲۵۱۶۷۲/۶۵
نیروی کار عملیاتی	۳۷۵۰۵۵۷/۵۵
نظارت مستقیم	۵۶۲۵۸۳/۶۳
خدمات جانبی	۴۲۶۱۹۹۷/۱۷۵
تأمین منابع عملیاتی	۹۱۳۷۰
نگهداری و تعمیرات	۹۱۳۷۰۰
هزینه آزمایشگاهی	۵۶۲۵۸۳/۶۳

استهلاک با فرض عمر سرمایه گذاری ثابت (به غیر از زمین) ۱۵ سال و ارزش اسقاطی ۰/۳ ارزش اولیه محاسبه شده است. هزینه‌های ثابت که شامل موارد استهلاک، مالیات محلی، بیمه و غیره می‌باشد در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰- لیست و قیمت هزینه‌های ثابت [۱۲]

هزینه‌های ثابت	قیمت به دلار \$
استهلاک	۸۴۳۴۵۲
مالیات محلی	۳۶۵۴۷۹/۵
بیمه	۹۱۳۷۰
اجاره	۲۰۰۰۰
منابع مالی	۴۲۰۳۰۱

لیست و قیمت‌های هزینه‌های عمومی در جدول (۱۱) آمده است.

جدول ۱۱- لیست و قیمت هزینه‌های عمومی [۱۲]

هزینه‌های عمومی	قیمت به دلار \$
هزینه‌های اداری	۵۶۸۲۶۶/۲۹
هزینه‌های توزیع	۱۴۲۰۶۶۵/۷۲۵
هزینه‌های تحقیق و توسعه	۱۴۲۰۶۶۵/۷۲۵

هزینه‌های غیر مستقیم شامل مهندسی و نظارت، هزینه‌های حقوقی و غیره می‌باشد که موارد آن در جدول (۷) آمده است.

جدول ۷- لیست و قیمت هزینه‌های غیرمستقیم [۱۲]

هزینه‌های غیر مستقیم	قیمت به دلار \$
مهندسی و نظارت	۱۴۳۵۵۰۰
هزینه حقوقی	۳۰۱۵۲۰
هزینه ساخت و دستمزد پیمانکاران	۲۲۶۱۴۰۴
هزینه حوادث غیر مترقبه	۱۵۰۷۶۰۲
جمع	۶۶۷۳۹۷۳

سرمایه‌گذاری ثابت برابر با مجموع هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های غیرمستقیم می‌باشد. لذا با داشتن هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم، سرمایه گذاری ثابت محاسبه می‌شود. کل سرمایه گذاری نیز معادل مجموع سرمایه گذاری ثابت و سرمایه عملیاتی می‌باشد. لذا با در نظر گرفتن سرمایه عملیاتی معادل ۱۵٪ کل سرمایه گذاری، کل سرمایه گذاری نیز محاسبه می‌شود [۱۲]. نتایج در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸- سرمایه‌گذاری ثابت، سرمایه عملیاتی، کل سرمایه‌گذاری [۱۲]

سرمایه گذاری ثابت	۱۸۲۷۳۹۷۳
سرمایه عملیاتی	۲۷۴۱۰۹۶
کل سرمایه گذاری	۲۱۰۱۵۰۶۹

مرحله بعدی برای محاسبه سودآوری، محاسبه هزینه‌ها می‌باشد. به طور کلی هزینه‌ها به سه بخش هزینه‌های مستقیم تولید، هزینه‌های ثابت و هزینه‌های عمومی تقسیم می‌شوند. مجموع هزینه‌های تولید مستقیم و هزینه‌های ثابت کل هزینه‌های تولید را تشکیل می‌دهد و مجموع کل هزینه‌های تولید و هزینه‌های عمومی کل هزینه‌های محصول را تشکیل می‌دهند [۱۲]. هزینه‌های مستقیم تولید شامل موارد مواد اولیه، نیروی کار عملیاتی، نظارت مستقیم و غیره می‌باشد که مقادیر آنها در جدول (۹) آمده است.



مقادیر محاسبه شده کل هزینه‌های تولید و کل هزینه‌های محصول به شرح جدول (۱۲) می‌باشد.

جدول ۱۲- کل هزینه تولید و کل هزینه محصول [۱۲]

کل هزینه‌های تولید	\$ ۲۵۰۰۳۷۱۷
کل هزینه‌های محصول	\$ ۲۸۴۱۳۳۱۴/۵

با توجه به این که قیمت پلی وینیل کلرید در بازارهای جهانی حدود ۸۰۰ دلار به ازای هر تن است [۱۴] درآمد کل فروش و سودآوری به شرح زیر می‌باشد [۱۲].

کل درآمد فروش در سال

$$\frac{\text{تن}}{\text{سال}} = \frac{۵۱۷۴/۴۶ \times ۲۴ \times ۳۶۵ \times ۱/۱۰۰۰}{۴۵۳۲۸/۲۷} = ۴۵۳۲۸/۲۷$$

$$\text{ریال} = \frac{۴۵۳۲۸/۲۷}{\text{سال}} \times \frac{S}{\text{سال}} \times ۸۰۰ = ۳۶۲۶۲۶۱۶$$

= سود ناخالص با در نظر گرفتن استهلاک

کل درآمد فروش - کل هزینه‌های محصول

= سود ناخالص با در نظر گرفتن استهلاک

$$۲۸۴۱۳۳۱۴/۵ - ۳۶۲۶۲۶۱۶ = ۷۸۴۹۳۰۱/۵ S$$

#### ۷- نتیجه‌گیری

پلی وینیل کلرید در مقایسه با سایر پلاستیک‌ها با تنوع بسیار زیاد در کاربرد نهایی و امکان فرایندپذیری، از لحاظ قیمت بسیار مناسب است. این بسیار با دوام بوده و به سهولت نگهداری می‌شود و در گستره وسیعی از رنگ‌ها تولید می‌گردد. بیشترین مقدار پلی وینیل کلرید برای ساخت لوله، روکش، پروفیل درب و پنجره‌ها، عایق کاری سیم و کابل و ورقه‌ها یا فیلم‌های صلب به وسیله اکستروژن فرایند می‌شود.

مزیت مهم پلی وینیل کلرید، سازگاری آن با انواع مختلفی از افزودنی‌هاست که باعث تنوع بسیار و خواص معینی در این بسیار می‌شود. پلی وینیل کلرید، مقاوم به آب، اسیدها، بازها، بعضی از حلال‌ها، چربی‌ها، روغن‌ها و گریس‌هاست و مقاومت شیمیایی بسیار خوبی در برابر همه حلال‌های کلردار با جرم مولکولی کم دارد. پلی وینیل کلرید به دلیل پایداری در برابر آتش و آب (دو عنصر مخالف) حائز اهمیت است. این بسیار به دلیل وجود کلر در

ساختارش در برابر آتش مقاومت نشان می‌دهد. در اثر سوزاندن پلی وینیل کلرید، کلر آزاد شده که مانع از احتراق می‌شود [۱۲].

در مقایسه با سایر گرما نرم‌ها، چگالی ویژه<sup>۱</sup> پلی وینیل کلرید زیاد است و گرمای واپیچش گرمایی<sup>۲</sup> و نرم‌شدگی نسبتاً کمی دارد [۱]. از لحاظ اقتصادی نیز کارخانه تولید پلی وینیل کلرید با ظرفیت ۴۵۰۰۰ تن در سال سودی معادل ۷۸۵۰۰۰۰ دلار در هر سال دارد، میزان سرمایه‌گذاری معادل ۲۱۰۰۰۰۰۰ دلار می‌باشد و دوره بازگشت سرمایه آن (حداکثر) ۴ سال می‌باشد [۱۲].

#### مراجع

- [۱] ملک‌پور، ش؛ «پلی وینیل کلرید»، ویرایش اول، صفحات ۱۳ و ۵-۶، نشر انجمن پلیمر ایران، (۱۳۸۸).
- [2] Michael, W., Allsopp, Vianello, G., "Encyclopedia Of Polymer Science and Technology", Third edition, pp. 437-448, (2007).
- [3] Franklin Associates, "Vinyl (Poly Vinyl Chloride) in Construction", (2001).
- [4] Katami, T., Yasuhara, A., Okuda, T., Shibamoto, T., «Formation of PCDDs, PCDFs, and Coplanar PCBs from Polyvinyl Chloride during Combustion in an Incinerator», 1st Edition, pp. 36, 1320-1324, (1993).
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl\\_chloride](http://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride)
- [6] Burgess, R. H., (ed.), «Manufacturing and Processing of PVC», 1st Edition, pp. 87-105, Applied Science Publishers, London, (1982).
- [7] Shahraki, F., Niknam Shahrak, M., Dad Mohammadi, Y., "Iranian Chemical Engineering Journal", Vol. 9, No. 49, pp. 17 (2010).
- [8] [www.nioc.ir](http://www.nioc.ir)
- [9] ولی‌زاده، م؛ "شبیه‌سازی فرایندهای پلیمری با ASPEN Polymer Plus"، ویرایش اول، صفحات ۶۵-۹۵، انتشارات اندیشه سرا، (۱۳۹۰).
- [۱۰] فتحی، س؛ فتوره چی، ن؛ صادق‌پور، س؛ کتاب "طراحی و شبیه‌سازی تجهیزات فرایندهای ASPEN Plus شیمیایی"، ویرایش اول، صفحات ۸۰-۱۲۰، انتشارات کتاب پدیده، (۱۳۹۰).
- [۱۱] مولوی، ح؛ سنجی، ف؛ "طراحی و بهره‌برداری از تجهیزات نفت، گاز و پتروشیمی به همراه با نرم‌افزار سایزینگ"، ویرایش اول، فصل بیستم و فصل بیست سوم، انتشارات اندیشه‌سرا، (۱۳۸۵).
- [۱۲] پیترز، تیمر هاوس، وست، "طراحی کارخانه و برآورد اقتصادی برای مهندسان شیمی"، ترجمه شایگان، ج؛ ثنابی‌زاده، م؛ ویرایش پنجم، صفحات ۱۰۷۵-۱۰۸۲، انتشارات نوپردازان، (۱۳۸۷).

[13] [www.polymerinfo.net](http://www.polymerinfo.net)

[14] [www.che.com](http://www.che.com)

1. Specific Gravity  
2. Heat Distortion Temperature