

فهرست مطالب

۱..... چکیده

۲..... فصل اول: مقدمه

۳-۱- تقسیم بندی عملیات جداسازی

۴-۱-۱- گاز - گاز

۵-۱-۲- گاز- جامد

۶-۱-۳- مایع- مایع

۷-۱-۴- مایع - جامد

۸-۱-۵- جامد - جامد

۸-۲- جداسازی فازها با استفاده از غشاء

۸-۱-۲- گاز - گاز

۹-۲-۲- گاز - مایع

۹-۳-۲- مایع - مایع

۱۰-۳- جداسازی فازها با استفاده از سانتریفیوژها

۱۰-۴- تماس مستقیم فازهای محلول

۱۰-۵- استفاده از کشش سطحی

۱۱-۷- عملیات مستقیم و غیر مستقیم

۱۲-۸- انتخاب روش جداسازی

۱۳-۹- روش های مختلف انجام جداسازی توام با انتقال جرم

۱۳-۹-۱- بازیابی جزء حل شده و تفکیک جزء به جزء

۱۴-۹-۲- اعمال ناپایا

۱۵-۹-۳- اعمال پایا

۱۵-۹-۴- عملیات مرحله ای (Stagewise)

۱۶-۹-۵- اعمال تماس پیوسته (تماس دیفرانسیلی)

۱۷-۱۰- اصول طراحی

۱۷-۱۰-۱- تعداد مراحل ایده آل

۱۷-۱۰-۲- زمان لازم

۱۷-۱۰-۳- شدت جریان های مجاز

۱۸..... ۴-۱۰-۱- انرژی مورد نیاز

فصل دوم: جداسازی مواد به وسیله سانتریفیوژها ۱۹.....

۱۹..... ۲-۲- تجهیزات جداسازی با نیروی گریز از مرکز(سانتریفیوژ)

۲۰..... ۲-۲- جداکننده های سیکلونی و هیدروکلونی

۲۳..... ۳-۲- سانتریفیوژهای ته نشینی

فصل سوم: جداسازهای ایزوتوپ ۲۸.....

۲۹..... ۱-۳- طیف نگار جرمی

۳۰..... ۲-۳- جداساز پخش گازی

۳۲..... ۳-۳- جداسازی لیزری ایزوتوپ

۳۴..... ۴-۳- سانتریفیوژ گازی

۳۶..... ۱-۴-۳- جداسازی به وسیله نفوذ فشاری

۳۸..... ۲-۴-۳- طرح کلی سانتریفیوژهای گازی

۴۰..... ۳-۴-۳- گردادیان فشار

۴۰..... ۴-۴-۳- جداسازی شعاعی اولیه

۴۱..... ۵-۴-۳- جداسازی محوری در یک سانتریفیوژ با جریان متقابل

۴۲..... ۶-۴-۳- ایجاد جریان متقابل

۴۳..... ۷-۴-۳- اجزای داخلی روتور

۴۵..... ۸-۴-۳- شرایط عملیاتی

فصل چهارم: شبیه سازی سانتریفیوژهای گازی ۴۷.....

۴۸..... ۱-۴- مدل سازی سانتریفیوژ گازی

۵۲..... ۲-۴- شبیه سازی به کمک شبکه های عصبی

۵۳..... ۱-۲-۴- شبکه های عصبی

۵۶..... ۲-۲-۴- آزمایشات غنی سازی اورانیوم توسط زیپ

۵۷..... ۳-۲-۴- داده های آزمایشگاهی

۵۸..... ۴-۲-۴- یادگیری و آزمایش توسط شبکه عصبی

۵۹..... ۵-۲-۴- مقایسه داده های آزمایشگاهی با داده های محاسبه شده

۶۱..... ۶-۲-۴- بهینه سازی سانتریفیوژ گازی

نتیجه گیری ۶۳.....

منابع ۶۴.....

چکیده

فرآیند های جداسازی مواد در صنعت به صورت های مختلفی انجام می پذیرد که از جمله روشهای نسبتا به صرفه و متداول جداسازی فیزیکی، جداسازی به وسیله نیروی گریز از مرکز است. که معمولا این نیرو در دستگاه هایی به نام سانتریفیوژ ایجاد شده و بر اساس اختلاف جرم مواد باعث جداسازی آنها از یکدیگر می شود. این دستگاه ها برای جداسازی انواع مخلوط های جامد-مایع، مایع-مایع و گاز-گاز با طراحی های متفاوت مورد استفاده قرار می گیرند. در این پروژه سعی شده، تمام این انواع از نظر مشخصات و طراحی به تفصیل مورد بررسی قرار گیرد. در فصل اول مقدمه ای در مورد تقسیم بندی انواع و همچنین اصول جداسازی مواد بیان شده و در فصل دوم اصول کلی جداسازی مواد به وسیله سانتریفیوژها به خصوص سانتریفیوژهای مایع-مایع و جامد-مایع (سانتریفیوژهای ته نشینی) مورد بررسی قرار گرفته اند. در فصل سوم انواع روشهای جداسازی ایزوتوپ ها و به خصوص جداسازی ایزوتوپ ها به وسیله سانتریفیوژ گازی به تفصیل بررسی شده و در فصل آخر روشهای مدل سازی و شبیه سازی این سانتریفیوژها به همراه ارائه نتایج شبیه سازی ها آورده شده است.

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه

بسیاری از عملیات مهندسی شیمی با مسئله تغییر غلظت در محلول ها و مخلوط ها سر و کار دارند که این تغییرات الزاما توسط واکنش های شیمیایی صورت می پذیرند. این عملیات بیشتر به جداسازی مخلوط ها به سازنده های آنها مربوط می شوند. در مورد مخلوط ها این اعمال ممکن است به روشهای کاملا مکانیکی مانند صاف کردن^۱ یک مخلوط معلق و جدا نمودن جزء جامد از مایع و یا جداسازی اجزاء مختلف و خرد شده یک مخلوط با اندازه های مختلف از طریق غربال نمودن، و یا جداسازی ذرات جامد آسیاب شده با استفاده از اختلاف جرم ویژه آنها صورت گیرد. از طرف دیگر، در صورتی که عملیات مورد نظر سبب بوجود آمدن تغییراتی در ترکیب مخلوط ها شود، در زمره عملیات انتقال جرم قرار می گیرد.

اهمیت این عملیات کاملا واضح بوده و ندرتا می توان یک فرآیند شیمیایی را یافت که نیاز به خالص سازی اولیه مواد خام و یا جداسازی نهایی محصولات از محصولات جانبی حاصله از واکنش نداشته

^۱ Filtration

باشد، و به دلایل مذکور عملیات انتقال جرم عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرند. غالباً قسمت اعظم هزینه‌های مربوط به یک فرآیند صرف انجام جداسازی‌های مربوط به آن می‌گردد. مخارج مربوط به این جداسازی‌ها و یا خالص‌سازی‌ها، بستگی مستقیم به نسبت غلظت نهایی و غلظت ابتدایی مواد جدا شده خواهد داشت. اگر این نسبت بزرگ باشد، قیمت تمام شده محصول بالاتر خواهد رفت. به عنوان مثال، اسیدسولفوریک یک محصول نسبتاً ارزان قیمت است، زیرا که گوگرد در طبیعت بصورت تقریباً خالص یافت می‌شود، در صورتی که اورانیوم خالص به جهت آنکه عیار سنگ معدن آن در طبیعت بسیار کم است، ماده گرانبهایی می‌باشد.

در عملیات جداسازی، انتقال جرم بوسیله انتقال یک ماده به داخل ماده دیگر در مقیاس مولکولی مشخص می‌شود. مثلاً، وقتی آب از درون یک استخر به درون جریان هوایی که بر روی سطح آب در حرکت است، تبخیر می‌گردد، مولکول‌های بخار آب از میان مولکول‌های هوای روی سطح به درون توده هوا نفوذ کرده و از آنجا به بیرون برده می‌شوند. این عمل جا به جا شدن مولکول‌ها، یک جا به جایی کلی نیست، مثلاً نمی‌توان آن را با تلمبه کردن یک مایع که در آن به دلیل اختلاف فشار موجود، تمام مایع منتقل می‌شود، مقایسه نمود. در این قبیل مسائل، انتقال جرم در نتیجه اختلاف غلظت انجام گرفته و ماده نفوذ کننده از محلی با غلظت بیشتر به محلی که دارای غلظت کمتری است، منتقل می‌شود.

۱-۱- تقسیم بندی عملیات جداسازی

در این قسمت تقسیم بندی انواع عملیات جداسازی را مورد بررسی قرار داده و مثالی برای هر یک از آنها ذکر می‌گردد. در برخی موارد، عمل جداسازی منجر به حصول یک فاز خالص خواهد گردید، زیرا یکی از فازهای در حالت تعادل با فاز دیگر فقط حاوی یک جسم خواهد بود. بطور مثال، بخار آب در حال تعادل با محلول آب نمک به هیچ وجه حاوی نمک نخواهد بود. به همین ترتیب فاز جامد در حال تعادل با چنین مایعی، بسته به اینکه محلول در کدام طرف غلظت همگداز^۱ واقع شده باشد، فقط آب خالص و

^۱ Eutectic

نمک خالص خواهد بود. اگر محلول آب نمک را بجوشانند، جداسازی کامل آب و نمک حاصل خواهد شد. همچنین می توان به جای جوشاندن محلول، آن را بطور جزئی سرد نموده و نمک یا آب خالص را بدست آورد؛ یا اینکه پس از انجماد کامل و جداسازی مکانیکی بلورهای مخلوط همگداز، نمک و آب خالص را تهیه نمود.

در چنین مواردی که دو فاز بوجود می آید، بلافاصله در حال تعادل با یکدیگر قرار می گیرند. به عبارت دیگر تعادل دو فاز تابع زمان نیست. این نوع جداسازی ها بجز یک مورد استثناء، جزء عملیات انتقال جرم محسوب نمی شوند. در عملیات انتقال جرم، هیچ یک از دو فاز در حال تعادل، حاوی تنها یک جزء نخواهد بود. همچنین وقتی دو فاز با یکدیگر تماس پیدا می کنند، بلافاصله به تعادل نمی رسند (مگر بصورت اتفاقی). سیستم به مرور زمان در اثر نفوذ کند سازنده ها از یک فاز به فاز دیگر به تعادل نزدیک می شود؛ لذا جداسازی هرگز کامل نخواهد بود. البته می توان با تکرار عملیات به جداسازی کاملتر (و نه صد درصد) دست یافت.

وجود سه فاز مختلف، یعنی گاز، مایع و جامد، امکان مجاورشدن دو فاز را با یکدیگر به شش صورت فراهم می نماید:

۱-۱-۱- گاز - گاز

به جز در موارد بسیار خاص، تمام گازها بطور کامل با یکدیگر مخلوط می شوند لذا در این گروه فرآیندهای متداول در صنعت انجام پذیر نیست. اگر کلیه سازنده های یک سیستم در حال تعادل، بین دو فاز توزیع شوند، عمل را تقطیر جزء به جزء (و یا فقط تقطیر) نامند. در عمل اخیر، فاز گاز در اثر حرارت دادن فاز مایع تولید می شود. بالعکس می توان در اثر سرد کردن فاز گاز، فاز مایعی را از آن تولید نمود. مثلا، اگر محلول مایعی از اسید استیک و آب را در اثر حرارت دادن بطور جزء به جزء تبخیر کنیم، بخار حاصله و مایع باقیمانده هریک شامل آب و اسید استیک خواهند بود، ولی در حالت تعادل غلظت سازنده ها در دو فاز مایع و بخار با یکدیگر و البته با مایع اولیه متفاوت است. اگر بخار و مایع بصورت مکانیکی از

یکدیگر جدا شده و بخار میعان یابد، دو محلول، یکی غنی تر از اسید استیک و دیگری غنی تر از آب حاصل خواهد شد. در این روش جداسازی دو سازنده بطور نسبی از یکدیگر امکان پذیر شده است.

ممکن است هر دو فاز بصورت محلول بوده و یک سازنده (یا گروهی از سازنده ها) بین دو فاز توزیع گردند. مثلا، اگر مخلوطی از هوا و آمونیاک با آب مجاور گردد، قسمت مهمی از آمونیاک در آب حل می شود در حالی که هوا تقریبا وارد فاز آب نخواهد گردید. با استفاده از این روش آمونیاک و هوا از یکدیگر جدا خواهند شد. این عمل جذب گاز^۱ نامیده می شود. حال اگر هوا در تماس با محلول آمونیاک-آب قرار گیرد، قسمتی از آمونیاک از فاز مایع خارج شده و وارد فاز گاز می گردد این عمل را دفع گاز^۲ نامند. تفاوت بین این دو عمل فقط مربوط به جهت انتقال نفوذ کننده می باشد.

اگر فاز مایع فقط از یک جزء تشکیل شده باشد ولی فاز گاز دو یا چند سازنده ای باشد، عمل را رطوبت دادن^۳ یا رطوبت گیری^۴ بسته به جهت انتقال نامند (این مورد قبلا به عنوان یک حالت استثنایی ذکر شده است). از تماس هوای خشک با آب، بخشی از آب به درون هوا تبخیر خواهد شد (رطوبت دادن هوا)؛ همچنین در اثر تماس هوای بسیار مرطوب با آب خالص قسمتی از رطوبت هوا میعان خواهد یافت (رطوبت گیری).

۱-۱-۲- گاز- جامد

تقسیم بندی عملیات این گروه براساس تعداد سازنده هایی که در هریک از دو فاز ظاهر می شود، انجام می گیرد. اگر یک مخلوط جامد متشکل از چند سازنده بطور نسبی تبخیر شود، بدون آنکه فاز مایعی پدید آید، بخارات حاصله و جامد باقیمانده هر یک حاوی کلیه سازنده ها، اما با غلظت های متفاوتی خواهد گردید. این عمل را تصعید جزء به جزء نامند؛ همانند فرآیند تقطیر، غلظت های نهایی پس از نفوذ سازنده ها بین دو فاز تثبیت می گردند. با وجود آنکه از نظر تئوری امکان چنین عملی وجود دارد، ولی به جهت مشکلات عملیاتی، انجام آن متداول نیست.

¹ Gas Absorption

² Stripping

³ Humidification

⁴ Dehumidification

در برخی از عملیات این گروه، ممکن است، کلیه سازنده ها در دو فاز موجود نباشند، مثلا اگر جامدی که با یک مایع فرار مرطوب شده باشد، در مجاورت با یک گاز خشک قرار گیرد، رطوبت موجود در آن خارج شده و به درون گاز نفوذ می نماید. این عمل، خشک کردن و گاهی دفع نامیده می شود. یک مثال معمولی، خشک کردن لباس مرطوب در اثر تماس آن با هواست؛ در صنعت نیز نمونه هایی از این روش مشاهده می شود مانند خشک کردن الوار و یا خارج کردن رطوبت از لایه گل صافی ها در اثر مجاور کردن آنها با گازهای خشک. در این قبیل موارد نفوذ از فاز جامد به فاز گاز صورت می گیرد. اگر نفوذ در خلاف جهت فوق انجام پذیرد، عمل را جذب سطحی^۱ نامند. مثلا، اگر مخلوطی از هوای مرطوب در معرض سیلیکاژل فعال شده قرار گیرد، بخار آب به درون فاز جامد نفوذ نموده، هوا خشک می شود. در شرایط دیگری، یک مخلوط گازی ممکن است سازنده های مختلفی داشته باشد که هر یک از آنها با مقادیر متفاوتی بر روی جامد جذب شود. این قبیل اعمال جذب سطحی جزئی نامیده می شوند. مثالی برای این نوع جذب مخلوط پروپان و پروپیلن بر روی کربن فعال شده می باشد که در آن هر دو هیدروکربن جذب می شوند ولی میزان جذب آنها متفاوت است و لذا جداسازی نسبی آنها امکان پذیر می گردد.

هنگامی که فاز گاز یک بخارخالص است، مانند تصعید یک جامد فرار از یک مخلوط حاوی یک جسم غیرفرار، عمل بیشتر به شدت حرارت دادن به مخلوط بستگی پیدا می کند تا به اختلاف غلظت و اساسا از نوع غیر نفوذی خواهد بود. همین مطلب در مورد سرد کردن بخار تا تبدیل آن به جامد خالص صحیح است، که در این پدیده، شدت، تابع خروج حرارت می باشد.

۱-۱-۳- مایع - مایع

عملیات جداسازی که در آنها دو فاز نامحلول با یکدیگر تماس داده می شوند، عملیات استخراج مایع نامیده می شوند. یک نمونه ساده آن روش آزمایشگاهی استخراج استن از آب است: اگر محلول استن - آب را در یک قیف جدا کننده با تتراکلریدکربن تکان داده و اجازه دهند تا فازها از یکدیگر جدا

¹ Adsorption

شوند، قسمت عمده استن وارد فاز تتراکلریدکربن گردیده و از آب جدا می شود. البته مقدار کمی آب نیز در فاز تتراکلریدکربن وارد خواهد شد. همچنین مقدار کمی از تتراکلریدکربن متقابلاً وارد فاز آب خواهد گردید، ولی مقادیر این دو و اثرات آنها در استخراج نسبتاً ناچیز است. در آزمایش دیگر، می توان محلولی از اسیداستیک و استن را به مخلوط ناهمگون آب و تتراکلریدکربن افزود و پس از تکان دادن و جداسازی دو فاز دیده می شود که استن و اسیداستیک در هر دو فاز، ولی با نسبت های مختلفی وارد می شوند. این عمل را استخراج جزء به جزء^۱ نامند. صورت دیگری از عملیات استخراج جزء به جزء می تواند تولید دو فاز مایع از یک محلول تک فاز در اثر سرد کردن و رساندن آن، به زیر نقطه بحرانی باشد. دو فازی که بدین ترتیب حاصل می گردند، غلظت های متفاوتی خواهند داشت.

۱-۱-۴- مایع - جامد

وقتی کلیه سازنده ها در دو فاز در وضعیت متعادل قرار گیرند، عمل را تبلور جزء به جزء^۲ نامند. شاید جالب ترین مثال برای این مورد جداسازی روش های خاص تصفیه منطقه ای^۳ بمنظور بدست آوردن فلزات بسیار خالص و یا نیمه هادی باشد. مثال دیگر، تبلور همراه با مواد اضافی^۴ است که در آن، جسمی نظیر اوره، به جهت شکل خاص شبکه بلوری خود قادر به جذب و درگیر ساختن مولکول هایی با زنجیره های طویل مستقیم مانند هیدروکربن های پارافینی می باشد، ولی این بر هم کنش شامل مولکولهای شاخه دار نخواهد بود. مواردی که فازها به شکل مایع (یا مخلوط) بوده و فقط دارای یک سازنده مشترک باشند، به کرات مشاهده می شود. جداسازی انتخابی یک سازنده از یک مخلوط جامد توسط یک حلال مایع گاهی استخراج با حلال^۵ نامیده می شود. جداسازی طلا از سنگ های معدن آن توسط محلول های سیانید و جداسازی روغن از پنبه دانه به وسیله هگزان در این گروه قرار می گیرند. بدیهی است که در این قبیل موارد نفوذ از جامد به فاز مایع صورت می پذیرد. اگر نفوذ در خلاف جهت فوق باشد، عمل را جذب سطحی (adsorption) نامند؛ بنابراین اگر ناخالصی رنگی موجود در محلول

¹ Fractional Extractin

² Fractional Crystallization

³ Zone Refining

⁴ Adductive Crystallization

⁵ Leaching

های شربت قند نیشکر را با تماس دادن محلول آن با کربن فعال جدا سازند، مواد رنگی بر روی سطح کربن جامد جمع خواهد شد.

۱-۱-۵- جامد - جامد

چون شدت انتقال جرم درون فازهای جامد فوق العاده کند است، در این گروه، هیچ نوع عملیات صنعتی صورت نمی گیرد.

۱-۲- جداسازی فازها با استفاده از غشاء

این قبیل عملیات به ندرت مورد استفاده قرار می گیرند، ولی شواهد موجود از دیاد کاربرد آن ها را نشان می دهد. غشاهای مختلف بسته به نوع عمل جداسازی به روشهای گوناگون مورد استفاده قرار می گیرند. به طور کلی، نقش مهم آن ها جلوگیری از مخلوط شدن دو فاز محلول در یکدیگر است. همچنین وجود آن ها باعث جلوگیری از جریان عادی هیدرودینامیکی و جابجایی اجسام در درون یکدیگر از طریق نفوذ می شود. وجود غشاء باعث جداسازی مواد از یکدیگر در اثر کنترل راه عبور سازنده ها از یک سو به سوی دیگر غشاء می گردد.

۱-۲-۱- گاز - گاز

غشاء مورد استفاده در نفوذ گازی دارای تخلخل بسیار ریز^۱ است. اگر یک مخلوط گاز که دارای سازنده های مختلفی با جرم مولکولی متفاوت است، با چنین غشایی تماس داشته باشد، سازنده های مخلوط با شدت های گوناگونی که بستگی به جرم مولکولی آن ها دارد، از درون غشاء عبور خواهند نمود. بدین جهت غلظت سازنده ها در دو طرف غشاء متفاوت خواهد . جداسازی ایزوتروپ های اورانیوم در مقیاس بزرگ نیز می تواند به همین ترتیب انجام پذیرد. در این عمل هگزا فلوراید اورانیوم به صورت گاز خارج می شود. در فرآیند تراوش^۲، غشاء دارای تخلخل نیست؛ گاز هنگام عبور از غشاء ابتدا درون آن حل

^۱ Microporous

^۲ Permeation

شده و سپس نفوذ می نماید. جداسازی در این حالت در اثر اختلاف حلالیت سازنده ها انجام خواهد شد. با استفاده از همین فرآیند، می توان هلیوم را از گاز طبیعی جدا نمود. این عمل با استفاده از غشاهایی از نوع پلیمر های فلورو کربن صورت می گیرد.

۱-۲-۲- گاز - مایع

در عملیات جداسازی گاز-مایع از خاصیت تراوایی اجسام غشاء در استفاده می شود، مثلاً اگر محلولی از آب و الکل در مجاورت با یک غشاء غیر متخلخل مناسب که قدرت حل کردن الکل را داشته باشد قرار گیرد، الکل پس از عبور از غشاء در سمت دیگر آن تبخیر خواهد شد.

۱-۲-۳- مایع - مایع

جداسازی یک جسم بلوری از یک محلول کلوئیدی با استفاده از یک حلال مایع و غشائی که بتواند فقط بلورهای حل شده در حلال را از خود عبور دهد، انجام می پذیرد. این عملیات دیالیز نامیده می شود؛ مثلاً اگر محلول شربت قند چغندر حاوی ناخالصی های کلوئیدی باشد، می توان ناخالصی های موجود را با استفاده از حلال آب و یک غشاء نیمه تراوا جدا ساخت. آب و قند از غشاء عبور می نمایند، در حالی که ذرات درشت کلوئیدی قادر به عبور نخواهند بود. دیالیز جزء به جزء برای جداسازی دو جسم بلوری از یک مخلوط مایع مورد استفاده قرار می گیرد که در آن اختلاف خاصیت تراوایی اجسام از درون غشاء، جداسازی را امکان پذیر می سازد. اگر نیرو محرکه الکتریکی که سبب نفوذ ذرات باردار از غشاء می گردد، اعمال شود، فرآیند را الکترودیالیز می نامند. همچنین فرآیند جداسازی حلال از محلول آن با استفاده از غشائی که فقط بتواند حلال را از خود عبور دهد، جدا کنند، فرآیند اسمز نامیده می شود. بدیهی است که با استفاده از فشارهای مختلف و غالب بر فشار اسمزی می توان جریان حلال را معکوس نمود. بدین ترتیب حلال و حل شونده با فرآیند اسمز معکوس از یکدیگر جدا خواهند شد. این فرآیند یکی از فرآیندهای متداول در شیرین سازی آب دریا است.

۱-۳- جداسازی فازها با استفاده از سانتریفیوژها

در صورتی که یک مخلوط (جامد- مایع، مایع- مایع و یا گاز-گاز) تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز شدید قرار گیرند، به جهت اختلاف جرم مولکولی اجزاء مخلوط، نیروهای وارده بر آن ها کمی متفاوت می باشد. لذا مولکول های سنگین و سبک از یکدیگر جدا می شوند. در جداسازی ایزوتروپ های اورانیوم از این طریق نیز استفاده می شود. در فصل های آینده، به طور مفصل در مورد این روش جداسازی بحث خواهد شد.

۱-۴- تماس مستقیم فازهای محلول

به علت مشکلاتی که در حفظ گردایان غلظت در صورت مخلوط نشدن سیالات وجود دارد، عملیات در شمار عملیات صنعتی قرار نمی گیرند؛ مگر در موارد بسیار نادر. نمونه هایی از این نوع عملیات به طور مختصر در ذیل شرح داده می شود:

نفوذ حرارتی^۱: در این فرآیند، گردایان غلظت در یکی از فازهای گاز یا مایع در اثر بوجود آمدن اختلاف درجه حرارت در سیستم حاصل می شود و بدین ترتیب جداسازی نسبی سازنده ها امکان پذیر می گردد. ^3He با استفاده از این روش از ^4He جدا می شود.

اگر یک بخار قابل میعان مانند بخار آب را از درون یک مخلوط گاز بگذرانند، می تواند ترجیحاً یکی از سازنده های مخلوط گاز را با خود خارج سازد. این عمل، نفوذ جاروبی^۲ نامیده می شود. اگر دو منطقه از یک فاز گاز که دارای غلظتهای متفاوت هستند با استفاده از غربالی که منافذ نسبتاً درشت داشته باشد، جدا شوند، فرآیند *Atmolysis* نامیده می شود.

۱-۵- استفاده از کشش سطحی

مواردی که در اثر حل شدن در یک مایع ایجاد محلولی با کشش سطحی کمتری نمایند (در تماس با یک گاز) غلظتشان در سطح مایع افزایش می یابد. در اثر تولید کف در یک سطح وسیع، مثلاً در اثر

¹ Termal Diffusion

² Sweep Diffusion

دمیدن هوا به درون محلول و جمع آوری کف می توان جسم حل شده را تغلیظ نمود. مواد شوینده را از آب به این ترتیب جدا می کنند. این فرآیند را جداسازی با ایجاد کف نامند و البته نباید آن را با فرآیند شناورسازی^۱ که در عملیات معدنی به منظور جداسازی مواد جامد نامحلول از دوغاب^۲ به کار می رود اشتباه نمود.

این تقسیم بندی ها جامع نبوده ولی غالب عملیاتهای مهم را شامل می شود. البته فرآیندهای جدیدی در حال توسعه هستند که بعضی ها در تقسیم بندی در بیش از یک گروه قرار می گیرند.

۱-۷- عملیات مستقیم و غیر مستقیم

بسته به نوع مجاور نمودن دو فاز عملیاتها را به دو نوع مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می نمایند. در اعمال مستقیم، در اثر افزایش یا کاهش حرارت دو فاز از یک فاز اولیه بدست می آیند. تقطیر جزئی، تبلور جزئی و نوعی از استخراج جزئی از این گونه هستند. در اعمال غیر مستقیم، یک جسم خارجی به سیستم افزوده می شود مانند جذب گاز، دفع گاز، خشک کردن، استخراج از جامدات، استخراج از مایعات و انواع خاص تبلور جزئی.

ویژگی خاص عملیات مستقیم آن است که محصولات به طور مستقیم و عاری از مواد افزوده شده به دست می آیند؛ لذا در شرایطی که بتوان از آن ها استفاده نمود ارجح هستند. اگر محصولات به صورت خالص مورد نیاز باشند معایب اعمال غیر مستقیم بسیار بوده و استفاده از آن ها چندان توصیه نمی شود، زیرا که هزینه های بازیابی مجدد جسم افزوده شده به سیستم مطرح است و نیز جداسازی ماده اضافه شده به سیستم ندرتاً به طور کامل انجام می گیرد. افزایش یک ماده خارجی به سیستم، همچنین ممکن است مسائل مربوط به خوردگی دستگاه ها را هم تشدید نمایند. بدیهی است که عملیات غیر مستقیم زمانی بر عملیات مستقیم ترجیح داده می شوند که با جداسازی مستقیم امکان پذیر نباشند و یا هزینه جداسازی های غیر مستقیم کمتر باشد.

¹ Flotation

² Slurry

اگر ماده جدا شده به صورت خالص مورد نیاز نباشد، بسیاری از معایب عملیات غیر مستقیم از بین می روند، مثلاً در خشک کردن عادی، مخلوط هوا- بخار آب وارد محیط می شوند زیرا که لازم نیست آب یا هوا بازیابی شوند. در تولید اسیدکلریدریک، گاز هیدروژن کلرید با آب شستشو داده شده و محلول آب- اسید بدون جداسازی مستقیماً به فروش می رسد.

۱-۸- انتخاب روش جداسازی

یک مهندس شیمی اغلب با مسئله انتخاب یک عمل جداسازی مناسب از میان چندین روش ممکن مواجه می شود. به دلیل دارا بودن خصوصیات فیزیکی مواد مورد نظر، می توان از میان روش های گوناگون موجود، یک یا چند روش مناسب را مقدماتاً انتخاب نمود. بدیهی است که بدون وجود اطلاعات دقیق در مورد عملیات مختلف مورد نظر تصمیم نهایی امکان پذیر نخواهد بود. می توان بین عمل انتقال جرم و یک عمل جداسازی مکانیکی، یکی از آن دو را انتخاب نمود. مثلاً، در جداسازی یک ماده معدنی از کانی آن، می توان عمل استخراج از جامد را با یک حلال اختیار کرد و یا از روش شناورسازی که یک روش مکانیکی است، استفاده نمود. روغن های نباتی را از دانه آن ها می توان از طریق فشردن دانه و یا استخراج به کمک حلال بدست آورد. یک بخار را از مخلوط گاز حاوی آن می توان با عمل فشردن^۱ مکانیکی و یا یکی از دو فرآیند انتقال جرم جذب گاز و یا جذب سطحی، جدا ساخت. در برخی موارد، اعمال جداسازی مکانیکی و اعمال جداسازی همراه با انتقال جرم هر دو مورد استفاده قرار می گیرند. بخصوص وقتی جداسازی مکانیکی غیر کامل باشد، مانند فرآیند روغن کشی، که پس فشردن دانه، با استفاده از عمل استخراج باقیمانده ی روغن موجود در دانه بدست می آید. بدیهی است که استفاده از اعمال مکانیکی سبب بوجود آمدن مواد خالص می گردند، در صورتی که اگر از عملیات انتقال جرم استفاده شود، محصول اغلب با جسم دیگری همراه خواهد گردید.

^۱ Compression

ممکن است به جای عمل انتقال جرم، از واکنش شیمیایی استفاده شود و یا اینکه ترکیبی از این دو به کار رود، مثلاً آب موجود در مخلوط آب - اتانل در اثر ترکیب با آهک زنده می تواند از مخلوط جدا شود. البته می توان مخلوط آب - اتانل را تقطیر نموده و آب آن را جدا کرد. هیدروژن سولفاید را از گازهای دیگر می توان از طریق جذب گاز به درون حلال مناسبی جدا کرد. همچنین می توان با اسید فریک ترکیب نمود در صورتی که از روش های شیمیایی استفاده شود، ماده جدا شده از بین خواهد رفت در حالی که در روش های انتقال جرم نیز مسئله انتخاب مناسب ترین روش مطرح می گردد. مثلاً؛ مخلوطی از اکسیژن و ازت را می توان به طریقه جذب سطحی توسط کربن فعال از یکدیگر جدا نمود و یا مخلوط آن ها را تقطیر کرد و نیز ممکن است از روش جداسازی از نوع نفوذ گاز از درون غشاء استفاده نمود. همچنین مخلوط مایعی از اسید استیک و آب را با استفاده از تقطیر، استخراج با یک حلال مناسب و یا جذب سطحی توسط مواد جاذب می توان تفکیک نمود.

بدیهی است که معیار اصلی انتخاب هزینه است، عموماً روشی که هزینه ی کمتری داشته باشد مورد استفاده قرار خواهد گرفت. ندرتاً عوامل دیگری ممکن است در تصمیم گیری دخالت کنند. مثلاً ساده ترین روش، با وجودی که ممکن است کم هزینه ترین روش نباشد، به دلیل سادگی مطلوب ترین است. در برخی از موارد به لحاظ عدم وجود اطلاعات کافی برای طراحی، یک روش ارزان را کنار می گذارند. تجربیات کاری گذشته نیز می تواند در تصمیم گیری نهایی نقش بسیار مهمی را ایفا کند.

۱-۹- روش های مختلف انجام جداسازی توام با انتقال جرم

روش بررسی عملیات انتقال جرم تابع برخی ویژگی های آن ها است که بایستی در شروع کار مشخص و تعریف شوند.

۱-۹-۱- بازیابی جزء حل شده و تفکیک جزء به جزء

اگر بتوان سازنده های یک محلول را به لحاظ ویژگی های کاملاً متفاوت آن ها، به دو گروه تقسیم نمود، در آن صورت ممکن است یک گروه شامل حلال و گروه دیگری شامل جزء حل شده گردد.

جداسازی بر طبق این گروه بندی ها عموماً آسان بوده و به بازیابی جزء حل شده^۱ یا جداسازی جزء حل شده^۲ موسوم است. مثلاً می توان تصور نمود که مخلوط گازهای متان، پنتان و هگزان تشکیل شده است از متان به عنوان حلال و مخلوط پنتان و هگزان به عنوان مواد حل شده. در این حالت مخلوط حلال و حل شده حداقل دارای یک اختلاف عمده (دارا بودن فشار بخارهای متفاوت) می باشند. حال با استفاده از یک فرآیند ساده جذب گاز یعنی شستشوی این مخلوط گاز با یک روغن هیدروکربن غیر فرار می توان به سادگی مخلوط پنتان و هگزان را از متان جدا کرد. البته اینجا متان از پنتان و هگزان جدا می شود ولی برای جداسازی پنتان و هگزان از یکدیگر بایستی از روش جداسازی مناسب تری بهره جست، مثلاً در این حالت می توان از عملیات تفکیک جزء به جزء استفاده کرد.

انتخاب روش مناسب از بین بازیابی جزء حل شده و یا تفکیک جزء به جزء بستگی به خواص فیزیکی سازندگان مخلوط خواهد داشت. مثلاً در جداسازی مخلوطی از پروپانل و بوتانل از آب در یک روش تماس گاز- مایع، چون فشار بخار سازنده ها اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند باید از روش تفکیک جزء به جزء مانند تقطیر استفاده کرد. در صورتی که تقریباً جداسازی کامل الکل ها از آب با استفاده از فرآیند استخراج با حلال به کمک یک هیدروکربن میسر خواهد گردید، زیرا که حلالیت الکل ها (به صورت یک گروه) و آب در هیدروکربن کاملاً با یکدیگر متفاوت است. بدیهی است که جداسازی پروپانل از بوتانل به علت نزدیک بودن خواص فیزیکی آن ها با استفاده از یک تفکیک جزء به جزء (استخراج و یا تقطیر جزء به جزء) امکان پذیر خواهد بود.

۱-۹-۲- اعمال ناپایا

از جمله خصوصیات اعمال ناپایا آن است که در هر نقطه ای از دستگاه، غلظت ها با زمان تغییر می کنند. این حالت ناپایا ممکن است در اثر تغییرات مواد حاصله در خوراک، شدت جریان ها و یا تغییرات دما و فشار سبب شود. در هر حالت، اعمال ناپیوسته همیشه جزء این گروه به شمار می آیند. در اعمال کاملاً ناپیوسته، از خارج دستگاه، کلیه فازها ساکن به نظر می رسند، زیرا که نه جریانی به درون دستگاه

¹ Solute Recovery

² Solute Removed

وجود دارد و نه جریانی از دستگاه خارج می گردد، گو اینکه یک حرکت نسبی در درون سیستم موجود است. به هم زدن دو مایع نامحلول در یک قیف جداکننده آزمایشگاهی برای استخراج یک جزء مثال مناسبی برای این حالت است. در عملیات نیمه پیوسته^۱، یک فاز ساکن بوده، در حالی که فاز دیگر به طور مداوم وارد سیستم شده و آن را ترک می کند. مثلاً در یک خشک کن نیمه پیوسته مقدار مشخصی از جامد مرطوب درون محفظه خشک کن قرار گرفته و با هوایی که به صورت مداوم از محفظه عبور می کند تماس حاصل می نماید و رطوبت حاصله به همراه هوا سیستم را ترک می کند تا این که جسم جامد خشک شود.

۱-۹-۳- اعمال پایا

از ویژگی های اعمال پایا آن است که در هر نقطه ای از دستگاه غلظت ها با گذشت زمان ثابت باقی می مانند، لذا ضرورت داشتن شدت جریان های مداوم و ثابتی به درون سیستم و بالعکس احساس می شود. همچنین باید رژیم جریان، غلظت اجزا در جریان های خوراک و فشار و درجه حرارت ثابت باشند.

۱-۹-۴- عملیات مرحله ای (Stagewise)

چنانچه دو فاز نامحلول را در تماس با یکدیگر قرار دهیم، مواد مختلف در دو فاز توزیع متفاوتی خواهند داشت و اگر در انتها فازها را به طریقه مکانیکی از یکدیگر جدا کنیم، این عمل را انتقال جرم در یک مرحله نامند، و دستگاه به کار رفته در عمل، یک مرحله (واحد) نامیده می شود. مثلاً قیف جداکننده ی آزمایشگاهی که برای استخراج به کار می رود یک مرحله انتقال جرم است. عملیات مرحله ای را می توان به صورت مداوم (پایا) و یا به صورت ناپیوسته انجام داد. اگر نیاز به تغییرات نسبتاً زیادی در غلظت اولیه خوراک داشته باشیم لازم است که یک سری از مراحل را به صورت پشت سر هم انجام دهیم. در عملیات با جریان های همسو^۲، مجموعه به نام آبشار^۳ معروف است. معیار ارزیابی هر مرحله نزدیکی آن

¹ Semibatch

² CoCurrent

³ Cascade

به تعادل است. بدین معنی که اگر جریان های خروجی از هر مرحله در حالت تعادل با یکدیگر باشند، آن مرحله را یک مرحله تعادلی یا ایده آل و یا تئوری گویند. بدیهی است که در یک مرحله تعادلی، زمان تماس بیشتر، سبب تغییر بیشتر غلظت نخواهد گردید. میزان نزدیکی به تعادل در هر مرحله، بازده^۱ آن مرحله نامیده می شود.

۱-۹-۵- اعمال تماس پیوسته (تماس دیفرانسیلی)

در این عملیات، فازها به صورت مداوم در دستگاه با یکدیگر تماس پیدا می کنند و این برخلاف عملیات مرحله ای است که در آن، در هر مرحله جداسازی فازها از یکدیگر انجام می شود. طبیعت این طریقه سبب می شود که عمل نیمه پیوسته و یا پایا باشد و لذا جداسازی در این قبیل عملیات ممکن است معادل کسری از یک واحد ایده آل شود. بدیهی است که امکان رسیدن دو فاز به حالت تعادل در هیچ محلی از دستگاه وجود ندارد. در واقع اگر تعادل در هر محلی از سیستم برقرار گردد، بدین معنی است که سیستم معادل با بی نهایت مرحله تعادلی عمل می کند.

تفاوت اساسی بین اعمال مرحله ای و تماس مداوم را می توان به صورت زیر خلاصه نمود. در اعمال مرحله ای، انتقال جرم بین دو فاز سبب می شود که اختلاف غلظت بین آن ها کاهش یابد و اگر زمان تماس افزایش یابد، تعادل بین دو فاز برقرار خواهد شد و پس از برقراری تعادل، نفوذ بین دو فاز متوقف خواهد گردید. در این حالت شدت نفوذ و زمان، تعیین کننده ی بازده هر مرحله خواهد بود. در عملیات تماس پیوسته، دو فاز همواره دور از حالت تعادل بوده و نفوذ بین فازها به طور مرتب و در سرتاسر دستگاه انجام می گیرد. انتخاب یکی از دو روش، تا حدودی بستگی به بازده مرحله ای خواهد داشت. در صورتیکه بازده مرحله ای زیاد باشد، واحد نسبتاً ارزان و قابل اطمینان تر ضروری بوده و استفاده از عملیات مرحله ای مطلوب تر است. از طرف دیگر، در صورت کم بودن بازده مرحله ای طریقه تماس پیوسته از لحاظ اقتصادی و اطمینان کاری مورد توجه خواهد بود.

¹ Efficiency

۱-۱۰-۱- اصول طراحی

در طراحی هر واحد مربوط به انتقال جرم، چهار عامل اصلی می بایستی تعیین گردد که عبارتند از: تعداد مراحل ایده آل یا معادل آن ها، زمان لازم برای تماس فازها، شدت جریان های مجاز و انرژی های مورد لزوم.

۱-۱۰-۱-۱- تعداد مراحل ایده آل

برای تعیین مراحل ایده آل لازم جهت جداسازی مشخصی به صورت عملیات مرحله ای و یا معادل آن ها در یک عمل تماس پیوسته، دانستن مشخصات تعادلی سیستم و موازنه های جرم ضروری خواهد بود.

۱-۱۰-۱-۲- زمان لازم

در عملیات مرحله ای، زمان تماس دو فاز به بازده مرحله ای مربوط می شود؛ در حالی که در عملیات تماس پیوسته، زمان تعیین کننده حجم و یا طول دستگاه خواهد بود. به طور کلی زمان تماس را با در نظر گرفتن عوامل مختلف می توان تعیین نمود. موازنه مواد، نسبت شدت جریان ها را تعیین می کند؛ ویژگی های تعادل سیستم می تواند غلظت های نهایی در دو فاز را مشخص نماید. همچنین شدت انتقال جرم بین فازها بستگی به دور بودن سیستم از وضعیت تعادلی خواهد داشت. به علاوه، شدت انتقال جرم بستگی به خواص فیزیکی فازها و رژیم جریان در دستگاه دارد.

باید توجه نمود که، برای حصول شدت تماس مشخص، زمان مجاور شدن لازم مستقل از مقدار کل فازها خواهد بود.

۱-۱۰-۱-۳- شدت جریان های مجاز

تعیین شدت جریان های مجاز در اعمال نیمه پیوسته و پایا پیش می آید، که به کمک آن ها سطح مقطع دستگاه محاسبه می شود. با استفاده از مکانیک سیالات شدت جریان های مجاز و به کمک موازنه های جرم مقادیر هر یک از جریان ها تعیین می شوند.

۱-۱۰-۴- انرژی مورد نیاز

انرژی های حرارتی و مکانیکی در عملیات انتقال جرم مورد استفاده قرار می گیرند. انرژی حرارتی جهت ایجاد هر نوع اختلاف درجه حرارت، تولید فازهای جدید (مثلاً تبخیر یک مایع) و همچنین برای تأمین اثرات گرمای انحلال به کار می رود. انرژی مکانیکی برای انتقال سیالات و جامدات، پخش کردن مایعات و گازها و همچنین به کار انداختن قسمت های متحرک ماشین آلات مصرف می شود.

بنابراین نتیجه می شود که در طراحی یک دستگاه مربوط به اعمال انتقال جرم باید ویژگی های تعادلی سیستم، موازنه ی مواد، شدت های نفوذ، مکانیک سیالات و انرژی های لازم را در نظر گرفت. در ابتدا اصول مربوط به نفوذ مورد بحث قرار گرفته و سپس در طراحی دستگاه های مربوط به عملیات مختلف انتقال جرم به کار خواهد رفت [۷].

فصل دوم

جداسازی مواد به وسیله سانتریفیوژها

فصل دوم

جداسازی مواد به وسیله سانتریفیوژها

۱-۲- تجهیزات جداسازی با نیروی گریز از مرکز (سانتریفیوژ)

نیروی گریز از مرکز برای جداسازی فازها، یکی از مهمترین تکنیک های جداسازی است که با تکیه بر نیروهای مکانیکی در این زمینه به کار می رود. تاثیر این زمینه روی ذرات در حال تعلیق یا روی دو مایع با اختلاف دانسته بسیار بالا با دستاوردهای جدا سازی در حضور میدان جاذبه قابل مقایسه می باشد.

اگرچه بر خلاف نیروی جاذبه که ذاتاً ثابت است، نیروی میدان گریز از مرکز می تواند بواسطه تغییر در سرعت دورانی یا ابعاد دستگاه متغیر باشد.

نخستین وسایلی که برای انجام این عملیات استفاده می شوند شامل جدا کننده های سیکلونی برای تعلیق گازها، هیدروکلون ها برای سوسپانسیون جامد مایع و سانتریفیوژها برای جداسازی جامد-مایع، مایع-مایع و گاز-گاز می باشند.

در جدا کننده های سیکلونی و هیدروکلونی، سوسپانسیون نا همگن که در معرض نیروی گزیر از مرکز قرار گرفته است، با وارد کردن مواد اولیه به صورت مماسی به دستگاه، البته با توجه به محدودیت های ایستایی دستگاه، موجب دوران خودش خواهد شد. در سانتریفیوژها سوسپانسیون تحت دوران، با توجه به محدودیتهای دورانی دستگاه انجام می گیرد.

۲-۲- جداکننده های سیکلونی و هیدروکلونی

در این صنعت بخصوص، سیکلون و هیدروکلون ها به جای یکدیگر استفاده می شوند. در مواقع حساس اگرچه سیکلون ها به جداسازی ذرات گاز محدود می شوند، هیدروکلون ها به طور سنتی برای جداسازی جامد-مایع یا دوغابها به کار می روند. با این وجود، پیکربندی طراحی، اصول عملیاتی و معیار های اندازه و انتخاب هر دو تقریباً یکسان است. هر دوی این وسایل از جمله ساده ترین و اقتصادی ترین جداکننده ها هستند (همچنین به عنوان جمع کننده جامدات و جمع کننده های ساده نیز نامیده می شوند).

نحوه ی کارکرد آنها یکسان است، در هر دوی آنها نیروهای اینرسی و جاذبه به کار گرفته شده است و اولین امتیاز آنها بازدهی بالا در جمع آوری، در کاربرد مشخص و همین طور سازگاری و مقرون به صرفه بودن آنها در توان مصرفی می باشد.

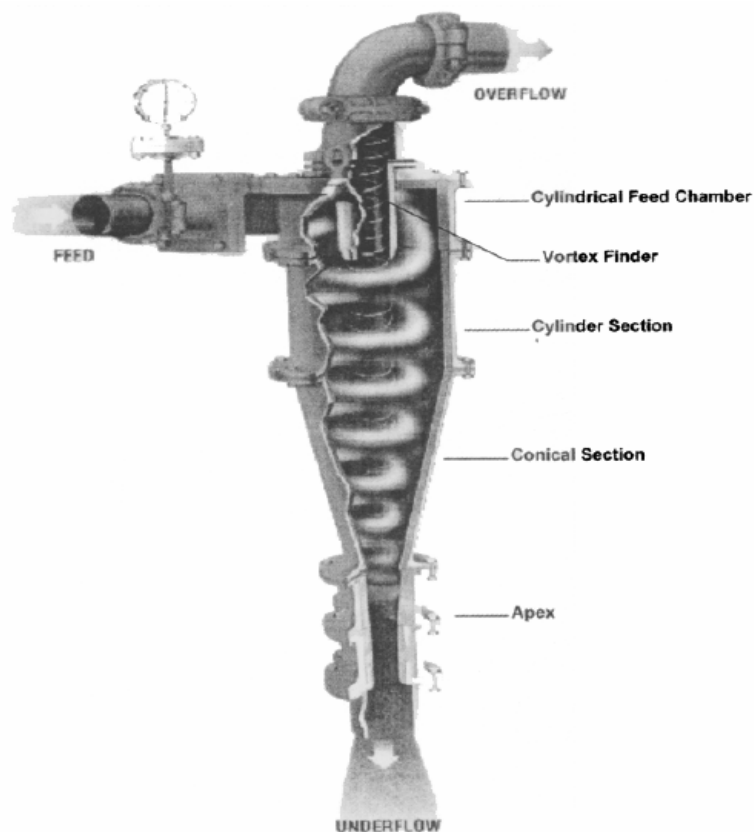
اشکال اصلی آنها این است که فقط برای ذرات با اندازه های بزرگ، بازدهی بالایی دارند. در حالت کلی سیکلون ها وقتی برای کار با جریان گازی که شامل غلظت های بالاتر از ذرات با اندازه کمتر از p ۱۰ باشد مناسب نبوده و بازدهی بالایی ندارند. سیکلون ها عموماً در عملیات با دستگاه هایی که اندازه ذرات در آنها در محدوده ی وسیع تری قرار دارند، موثرند. آن ها می توانند ذرات در محدوده اندازه بین ۱۰ تا بالای p ۲۰۰۰ را با درجات متفاوت از جداسازی، با بار ورودی در محدوده ی کمتر از 1 gr/scfm تا بیشتر از 100 gr/scfm جمع آوری کنند. متغیرهای طراحی زیادی برای طراحی یک سیکلون ساده

وجود دارد. به دلیل ساده بودن سیکلون ها و هیدروکلون ها و عدم وجود اجزای متحرک در آنها، می توان از آنها در محدوده وسیعی از مواد سازنده، در عملیات های حرارتی تا دمای 2000°F استفاده کرد.

سیکلون ها در کاربردهای عمومی زیر به کار می روند:

- جمع آوری ذرات درشت غبار.
- کنترل جریان های گاز با غلظت زیاد جامد میان راکتورها مثل Flexicoker ها (عموماً بالاتر از 3gr /scf).
- برای طبقه بندی اندازه ذرات.
- برای استفاده در عملیات هایی که بازدهی بالا در آن ها دارای اهمیت نیست.
- به عنوان تمیز کننده های اولیه در خطوطی با کالکتورهای (جمع کننده ها) با بازدهی بالا برای جداسازی ذرات ریز.

شکل شماره ۱-۲ نمونه ای از یک سیکلون صنعتی را نشان می دهد.

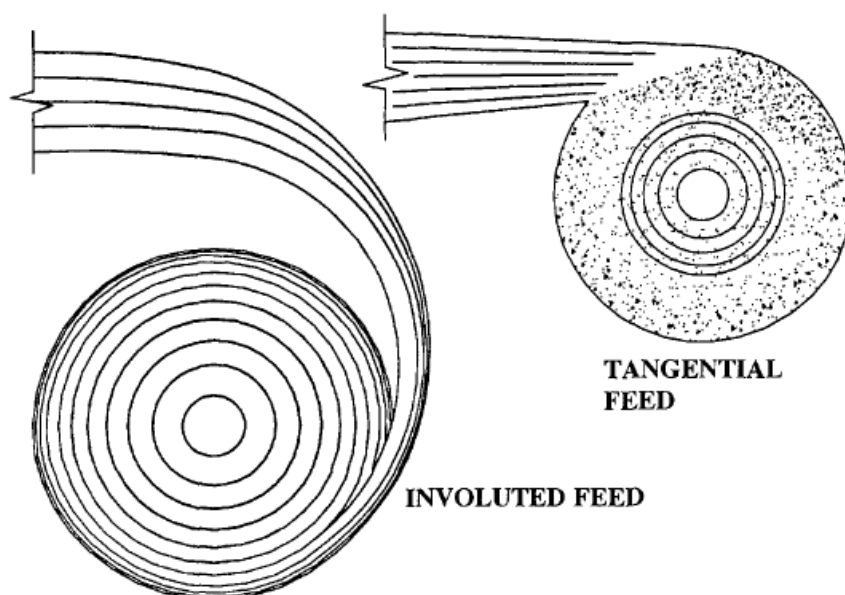


شکل شماره ۱-۲: شمای کلی یک سیکلون صنعتی [۲]

سالهای زیادی است که سیکلون ها برای طبقه بندی ذرات در سیکل خردایش بطور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. محدوده های عملی برای طبقه بندی در سیکلون ها از ۴۰ تا ۴۰۰ میکرون و برای موارد معدودی تا کوچکی ۵ میکرون و بزرگی ۱۰۰۰ میکرون می باشد. سیکلون ها در هر دو مرحله ی اولیه و ثانویه در سیکل آسیاب کردن مواد، به خوبی بخش آسیاب مجدد نیز مورد استفاده قرار می گیرد.

مبحث زیر به منظور انتخاب تعداد دقیق و اندازه سیکلون ها و تعیین دقیق سطح متغیرهای عملیاتی می باشد. عموماً توصیه می شود که سیکلون ها به عنوان وسیله ای برای تعیین و تصدیق اندازه ذرات به کار روند. تعدادی از سیکلون های مجهز به کامپیوترهای دیجیتال برای کمک در اندازه انتخاب ذرات به کار گرفته شده اند.

مطابق شکل ۲-۱ در طول عملیات، خوراک به صورت دوغاب یا سوسپانسیون وارد سیکلون یا هیدروسیکلون شده و تحت فشار از لوله خوراک به محفظه ی استوانه ای خوراک در بالا فرستاده می شود. این نحوه ی وارد کردن به صورت مماسی توسط دو نوع طراحی مطابق شکل ۲-۲ انجام می شود.



شکل ۲-۲: انواع ورود خوراک (پیچشی و مماسی) [۲]

بسیاری از تحقیقات انجام شده بر روی مدل پیشی نشان می دهد که این مدل برای طراحی موارد دیگر کاربرد ندارد. با ورود خوراک به محفظه، دوران دوغاب در داخل سیلکون آغاز می شود. بخاطر نیروی سانتریفیوژی (گزیر از مرکز) ذرات با شتاب به سمت دیواره بیرونی حرکت می کنند. ذرات با الگوی مارپیچی به سمت پایین، به قسمت استوانه ای و مخروطی مهاجرت می کنند. در این هنگام ذرات سبکتر به سمت مرکز رفته و با الگوی مارپیچی به سمت بالا و خارج از محل تشکیل گرداب حرکت می کنند. تخلیه توسط لوله ی بالایی انجام می شود این محصولات شامل ذرات نرم تر و بیشتر آب هستند (البته به هنگام استفاده از هیدروکلون ها) که باید نزدیک به اتمسفر تخلیه شوند ذرات سنگین تر در قسمت پایین در مسیرهای مارپیچی در امتداد دیوار قسمت مخروطی باقی مانده و به تدریج از روزنه مخروطی شکل در پایین خارج می شوند.

این محصولات به عنوان جریان پایین دست^۱ شناخته شده که باید نزدیک به فشار اتمسفر تخلیه شوند.

۲-۳- سانتریفیوژهای ته نشینی

یکی دیگر از راههای جداسازی جامدات از محلولهای سوسپانسیون در زمینه استفاده از نیروی گزیر از مرکز، سانتریفیوژهای ته نشینی می باشد. مثل هیدروکلون ها ذرات سنگین تر از میان ذرات سبکتر که در مرکز دوران دستگاه قرار دارند به سمت پایین حرکت می کنند. در سانتریفیوژها مایعات، گازها یا جامدات تحت تاثیر دو نیرو قرار می گیرند: نیروی جاذبه به سمت پایین و نیروی گزیر از مرکز در جهت افقی عمل می کند. اگرچه، در جداسازی صنعتی معمولاً نیروی گزیر از مرکز آنقدر زیاد هست که نیروی جاذبه قابل نظر باشد. شدت نیروی گزیر از مرکز توسط رابطه $R_c/G = \omega^2 r/g$ که به عنوان "نیروی گزیر از مرکز نسبی" (RFC) یا عدد گزیر از مرکز (N_c) نامیده می شود.

¹ Under Flow

RFC معمولا از ۲۰۰ برابر نیروی جاذبه برای سانتریفیوژهای با ظرف بزرگ تا ۳۶۰۰۰۰ برابر برای سانتریفیوژهای گازی فوق بحرانی با سرعت بالا تغییر می کند. برای جداسازی مایع-جامد نیروی گریز از مرکز ممکن است در سانتریفیوژهای ته نشینی یا فیلترهای گریز از مرکز استفاده بشود. سانتریفیوژهای نوع ته نشینی همچنین برای دانه بندی جامدات استفاده می شوند. برای جداسازی مایعات امتزاج ناپذیر از اختلاف دانسیته و برای تغلیظ گازها از اختلاف وزن مولکولی استفاده می شود. اصول عملکرد نیروی گریز از مرکز در زیر می آید:

در ظرف ساکن استوانه ای شامل یک سوسپانسیون از ذرات جامد که وزن مخصوص آنها بیشتر از مایع است، به دلیل سکون ظرف، سطح آزاد مایع افقی، و ذرات به علت تاثیر نیروی جاذبه ته نشین می شوند. وقتی ظرف در حال چرخش حول محور خود باشد، اجزای مایع و جامد تحت تاثیر نیروی جاذبه و همچنین نیروی گریز از مرکز هستند. در نتیجه فرض می شود که مایع موقعیتی با سطح داخلی (سطح آزاد) تقریبا عمودی به خود می گیرد. اگر سوسپانسیون از مواد مختلفی با دانسیته های متفاوت تشکیل شده باشد، ذرات به صورتی طبقه بندی می شوند که اجزای سبک تر در نزدیکی محور چرخش و اجزای سنگینتر در مجاورت دیواره جامد جمع می شوند. دیواره ظرف شامل سوراخ هایی می باشد که توسط یک غشاء تراوا پوشیده شده اند و مانند یک فیلتر پارچه ای یا یک توری سیمی ذرات جامد را عبور داده ولی اجازه عبور به ذرات مایع را نمی دهند. قطعات اصلی این سانتریفیوژها عبارتند از: یک روتور یا ظرف چرخان که در آن نیروی گریز از مرکز برای جداسازی سیستم غیر همگن به کار گرفته می شود، یک وسیله برای ورود خوراک به روتور، یک شفت گرداننده، محور و یاتاقان طولی، یک مکانسیم چرخاندن شفت و ظرف، یک کاور برای در بر گرفتن اجزا و یک قاب برای تنظیم و نگه داری قطعات.

سه نوع سانتریفیوژ وجود دارد که ممکن است برای طبقه بندی مواد بر اساس عدد گریز از مرکز

و یا محدوده ی عملکرد و یا غلظت جامدات در سوسپانسیون آن ها به کار گرفته شود.

اولین آنها سانتریفیوژ Tubular-Bowl می باشد. این نوع سانتریفیوژها دارای عدد گریز از مرکز در محدوده ۳۰۰۰ که برای ظرفیت کم (۵۰-۵۰۰ gph) طراحی شده است و می توانند فقط برای غلظت های پایین ذرات جامد به کار روند.

سانتریفیوژ بعدی Solid-Bowl می باشد که حداکثر قطر ظرف آن در محدوده بین ۴ تا ۵۴ اینچ می باشد. سانتریفیوژهای با قطر بزرگ تر می توانند ۵۰ton/hr جامد را با دور بالاتر از ۳۰۰۰ تولید کنند. سانتریفیوژهای مشابه به این با دیوارهای مشبک ساخته می شوند. این ماشین ها دقیقاً مثل فیلترها عمل می کنند.

سومین نوع، سانتریفیوژ Disk-Bowl می باشد که بزرگتر از سانتریفیوژ Tubular-Bowl بوده و با سرعتی کمتر و با عدد گریز از مرکز بیشتر از ۱۴۰۰۰ دوران می کند. این ماشین ها می توانند بیشتر از ۳۰۰۰۰ gph خوراک شامل ذرات جامد با کیفیت مناسب را بکار گیرند.

حرکت ذرات در سانتریفیوژهای ته نشینی بصورت شعاعی است (که با نزدیک یا دور شدن آن از محور دوران می باشد)، به بزرگ یا کوچک بودن دانستیه ذرات پراکنده نسبت به فاز پیوسته بستگی دارد. بین دانستیه فاز پراکنده و فاز پیوسته باید یک تفاوت قابل ملاحظه ای وجود داشته باشد تا جداسازی به صورت موثر انجام پذیرد. در دستگاههای صنعتی مایع خروجی یا فاز مایع جدا شده معمولاً بصورت پیوسته در می آید و فاز سنگین جامد رسوب کرده و به صورت متناوب از دیواره های دستگاه به صورت دستی یا با استفاده از کفه گیر خارج می شود.

سانتریفیوژهای Tubular-Bowl در تصفیه نفت به وسیله جداسازی جامدات معلق و رطوبت آزاد، به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد و همین طور برای حذف ذرات بسیار بزرگ از خمیرهای خشک، رنگدانه ها و پوشش ها (لعاب ها) ، جلا دادن مرکبات و دیگر آروماتیک ها و جداسازی در مقیاس کوچک کاربرد دارند.

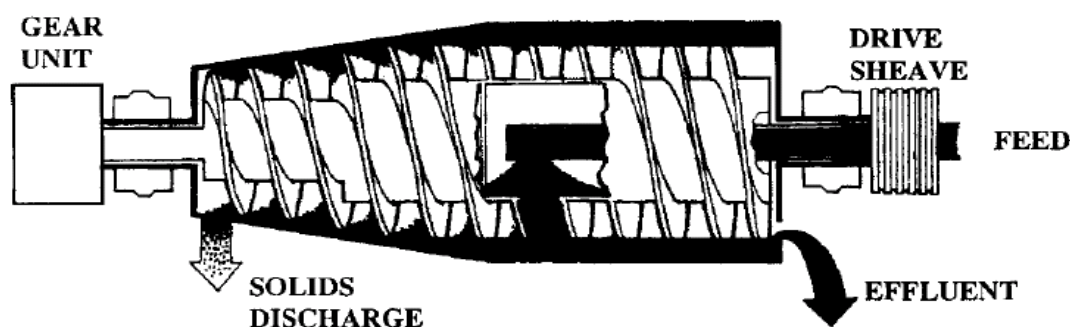
روتور سانتریفیوژهای Tubular-Bowl بر روی یک محور با امکان حرکت های مختلف با انعطاف پذیری بالا قرار دارد. همچنین در قسمت انتهایی آن قطعه ای برای تعدیل حرکت و نوسانات آن قرار داده

شده است. در بعضی طراحی های مشابه، این قطعه هم در بالا و هم در پایین تعبیه شده که این قطعه اجازه می دهد که وقتی روتور از سرعت بحرانی تجاوز کرد، بتواند محور ثقل خودش را ثابت کند. خوراک مایع از قسمت پایین روتور در طول یک یک نازل ثابت وارد روتور می شود. خوراک ورودی پایین تر از فشار کافی برای ایجاد یک جت دائم که یک ورود کامل را به داخل روتور تضمین می کند وارد می شود. غالباً یک قطعه شتاب دهنده در پایین روتور تعبیه می شود تا سرعت چرخش خوراک به سمت بالا را به سرعت چرخش ظرف برساند. خوراک به سمت بالا در طول ظرف به صورت حلقوی حرکت کرده و از بالا تخلیه می شود و برای ایجاد این اثر، شعاع محل تخلیه در بالا باید از ورودی خوراک بیشتر باشد. مواد جامد به سمت بالا با سرعت چرخش خوراک حرکت می کنند و همزمان به یک سرعت شعاعی می رسند که تابعی از قطر دستگاه، چگالی نسبی و نیروی گریز از مرکز به کار گرفته شده می باشد. اگر خط سیر یک ذره دیواره ظرف را قطع کند، آن ذره از مایع جدا می شود و گرنه به همراه سیال خروجی خارج می شود.

سانتریفیوژهای چند محفظه ای (چند گذری) ترکیبی از اصول عملکرد یک جدا کننده لوله ای با گرداننده مکانیکی و شبیه یک سانتریفیوژ دیسکی می باشد. جریان سوسپانسیون در طول یک سری از سیلندرهای تو در تو که در طول جلو رفتن قطرشان اضافه می شود حرکت می کند. حرکت جریان از کوچکترین سیلندر تا بزرگترین آنها موازی محور گردش است. روتور معمولاً شامل شش رینگ می باشد. به طوری که طول موثر حرکت محلول سوسپانسیون در طول ظرف شش بار تکرار می شود. به همین دلیل این سانتریفیوژها را می توان به عنوان یک جدا کننده چند مرحله ای در نظر بگیرند. به دلیل اینکه نیروی گریز از مرکز در هر کدام از حلقه های داخلی بیشتر می شود، ذرات بزرگتر و سنگین تر در حلقه اول (منطقه با کمترین نیروی گریز از مرکز) و ذرات کوچکتر و سبکتر در حلقه آخر (منطقه با بیشترین نیروی گریز از مرکز) ته نشین می شوند. روتورهای چند گذری نوعاً دارای حجم بالای ۶۵ لیتر هستند. این جدا کننده ها میتوانند مواد جامد جدا شده را خود به خود خارج کنند درحالی که در نوع لوله ای

ذرات جمع شده باید به صورت دستی خارج می شدند. این ماشین ها برای تصفیه عصاره و شهد میوه ها و سبزیجات و همچنین در مراحل جداسازی کیک زرد از محلول آن به کار می روند.

از این نوع سانتریفیوژ، مدل Solid-Bowl می باشد که متشکل از یک روتور دیواره جامد بشکل یک ظرف استوانه ای یا مخروطی یا ترکیبی از هر دو می باشد. روتور ممکن است حول محور افقی یا عمودی بچرخد. نمونه ای از این دستگاه در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. این دستگاه متشکل از یک روتور استوانه ای با انتهایی به شکل مخروط ناقص و یک نقاله مارپیچ که با هم می چرخند، می باشد.



شکل ۲-۳: شمای یک سانتریفیوژ Solid-Bowl پیوسته [۲]

نقاله چرخان معمولاً با نرخ ۱ یا ۲ rpm، کمتر از نرخ چرخش روتور می چرخد. محلول سوسپانسیون به صورت محوری داخل سانتریفیوژ می شود و سپس تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز قرار می گیرد و ذرات جامد جدا می شوند. سوسپانسیون تصفیه شده به سوی قسمت پهن ظرف حرکت می کند تا از دریچه خروجی تخلیه شود.

ذرات جامد باقی مانده بر روی نقاله چرخان به سمت مخالف برده می شوند (به سمت قسمت

انتهای کوچک ظرف) و از قسمت دهانه تخلیه به صورت پیوسته با نیروی گریز از مرکز خارج می شوند.

در هر کدام از سانتریفیوژهای ته نشینی، جداسازی در دو مرحله انجام می گیرد: ته نشینی و غلیظ

سازی. به دلیل اینکه معمولاً شعاع دهانه تخلیه جامد کوچکتر از شعاع خروجی جریان مایع بالا دست

است، در انتهای عریض ظرف قسمتی از جامد ته نشین شده در مخزن غوطه ور می شود. باقی مانده

نزدیکتر به مرکز داخل سطح آزاد مایع است که آنها می توانند قبل از اینکه تخلیه اصلی شروع شود از زیر

آب تخلیه شوند [۲].

فصل سوم

جداسازهای ایزوتوپ

فصل سوم

جداسازهای ایزوتوپ^۱

تمام فن آوری ما در زمینه های مختلف بر پایه مواد، در اشکال مختلف عناصر، ترکیبات، آلیاژها و مخلوط ها استوار است. فرآیندهای معمولی مکانیکی و شیمیایی می توانند برای تقسیم بسیاری از مواد به مؤلفه ها به کار روند. با این حال، در هر عرصه ای، ایزوتوپ های مجزا مثلاً اورانیوم - ۲۳۵ و هیدروژن - ۲ (دوتریم) مورد نیاز است. چون ایزوتوپ های یک عنصر معین دارای عدد اتمی Z یکسان هستند، آن ها اساساً از نظر شیمیایی یکسان هستند، از این رو یک روش فیزیکی باید یافت شود که ذرات را بر اساس عدد جرمی تشخیص دهد. در این فصل ما روش های متعددی را که از طریق آن ها ایزوتوپ های اورانیوم و سایر عناصر جداسازی می شوند توصیف خواهیم کرد. چهار روش مبتنی بر اختلاف در عدد جرمی، A ، عبارت اند از:

(الف) حرکت یون در یک میدان مغناطیسی

(ب) پخش ذرات از طریق یک غشاء

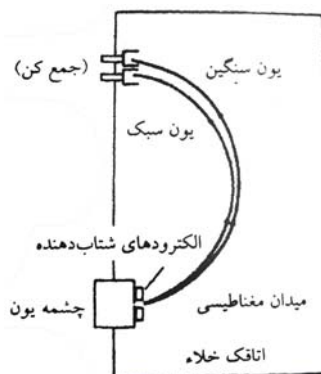
(ج) حرکت تحت نیروی گریز از مرکز

(د) واکنش اتمی به یک باریکه لیزری

¹ Isotop Separators

۳-۱- طیف نگار جرمی^۲

می دانیم که اگر ذره ای به جرم m ، بار q ، و سرعت v عمود بر یک میدان مغناطیسی با بزرگی B وارد آن شود، مطابق رابطه $r = \frac{mv}{qB}$ در یک مسیر دایره ای به شعاع r حرکت می کند. در طیف نگار جرمی، (شکل ۳-۱) یون های عنصری که ایزوتوپ های آن قرار است جدا شوند در یک تخلیه الکتریکی تولید و توسط اختلاف پتانسیل V برای تأمین انرژی جنبشی $Vq = \frac{1}{2}mv^2$ شتاب داده می شوند. بارها آزادانه در یک اتاقک نگه داشته شده و در فشار بسیار پایین گاز حرکت می کنند، و توسط میدان مغناطیسی در مسیرهای نیم دایره ای هدایت می شوند. یون های سنگین تر دارای شعاع حرکت بزرگ تر از یون های سبک هستند، و هر دو می توانند به طور جداگانه گردآوری شوند. تشخیص داده شده است که فاصله بین نقاطی که در آن ها یون ها گردآوری می شوند با اختلاف ریشه دوم جرم ها متناسب است. طیف نگار می تواند برای اندازه گیری جرم ها با دقت چشم گیر، یا برای تعیین فراوانی نسبی ایزوتوپ ها در یک نمونه، یا غنی سازی یک عنصر در یک ایزوتوپ مورد نظر به کار رود.



شکل ۳-۱: طیف سنج جرمی

فرآیند الکترومغناطیسی در طول جنگ جهانی دوم برای بدست آوردن مواد جنگ افزار، با استفاده از «کالوترون»^۳ (به یادبود دانشگاه کالیفرنیا در برکلی، جایی که در آن توسعه یافت) مورد استفاده قرار گرفت. بالغ بر ۱۱۵۲ واحد در فرآیندهای «آلفا» و «بتا» در کارخانه Y-۱۲ در اوک ریج که در سال

^۲ Mass Spectrograph^۳ Colutron

۱۹۴۵ اورانیوم غنی شده برای یک بمب اتمی را تولید کرد، به کار رفته بودند. چون هزینه انرژی الکتریکی برای فرآیند بالا است، فرآیندهای جایگزینی مانند پخش گازی برای تولید سوخت هسته ای به کار گرفته می شوند. با این حال، برای مدت ۵۰ سال تعدادی کالوترون در اوک ریج نگه داشته شدند. این ها ایزوتوپ های پایدار سبک را در مقادیر کوچک مورد نیاز برای تحقیقات، با شتاب دهنده جداسازی کردند. این سیستم در سال ۱۹۹۸، احتمالاً به طور دائم، متوقف شد.

۳-۲- جداساز پخش گازی^۴

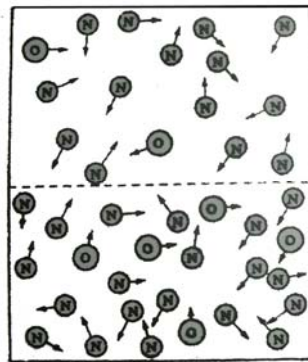
قاعده کلی این فرآیند می تواند به وسیله یک آزمایش ساده، شکل ۳-۲ توضیح داده شود. محفظه ای به وسیله یک غشاء متخلخل به دو بخش تقسیم شده، و هوا در هر دو طرف وارد می شود. به یاد داشته باشید که هوا مخلوطی از ۸۰٪ نیتروژن، $A=14$ و ۲۰٪ اکسیژن، $A=16$ است. چنانچه فشار در یک طرف بالا رود، اندازه نسبی نیتروژن در طرف دیگر افزایش می یابد. پدیده جداسازی می تواند بر اساس سرعت ذرات توضیح داده شود. انرژی های جنبشی متوسط مولکول های سنگین (H) و سبک (L) در مخلوط گاز یکسان است، ($E_H = E_L$) ولی چون جرم ها متفاوتند، سرعت مشخصه ذره طبق نسبت زیر می باشد:

$$\frac{v_L}{v_H} = \sqrt{\frac{m_H}{m_L}}$$

اکنون تعداد مولکول های یک نوع که در هر ثانیه به غشاء برخورد می کند در مقایسه با حرکت نوترون بحث شده در فصل ۴ با nV متناسب است. لذا مولکول های با سرعت بالاتر از شانس بالاتری برای عبور از سوراخ های غشاء متخلخل، موسوم به «مانع»^۵ برخوردارند.

⁴ Gaseous Diffusion Separator

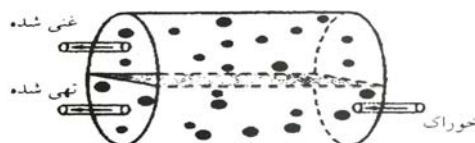
⁵ Barrier



شکل ۲-۳: جداسازی پخش گازی نیتروژن و اکسیژن

آرایش فیزیکی یک واحد فرآیندی (عملیاتی) کارخانه پخش گازی برای جداسازی ایزوتوپ های

اورانیوم - ۲۳۵ و اورانیوم - ۲۳۸ در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: مرحله پخش گازی

آلیاژ نازکی از نیکل به عنوان ماده مانع به کار می رود. در این «مرحله» گاز به شکل ترکیب

هگزا فلورید اورانیوم (UF_6) به عنوان خوراک به داخل پمپ می شود و به صورت دو جریان خارج می

گردد: یکی غنی شده از $^{235}UF_6$ و دیگری تهی شده از $^{235}UF_6$ همراه با تغییرات متناظر در $^{238}UF_6$. به

خاطر اختلاف جرم بسیار اندک ذرات با وزن های مولکولی ۳۴۹ و ۳۵۲ میزان جداسازی بسیار پایین

است و مراحل زیادی به طور سری، که به عنوان اتصال سری آبشاری^۷ نامیده می شود، مورد نیاز می

باشد.

اورانیوم طبیعی جزء کوچکی اورانیوم - ۲۳۴ دارد که کسر آن ۰/۰۰۰۰۵۵ می باشد. هر فرآیند

جداسازی ایزوتوپ تغییری را در تعداد نسبی مولکول های دو نمونه موجب می شود. اگر n_L و n_H تعداد

مولکول ها در یک نمونه گازی باشند، نسبت فراوانی آن ها به صورت زیر تعریف می شود.

$$R = \frac{n_L}{n_H}$$

⁶ Stage

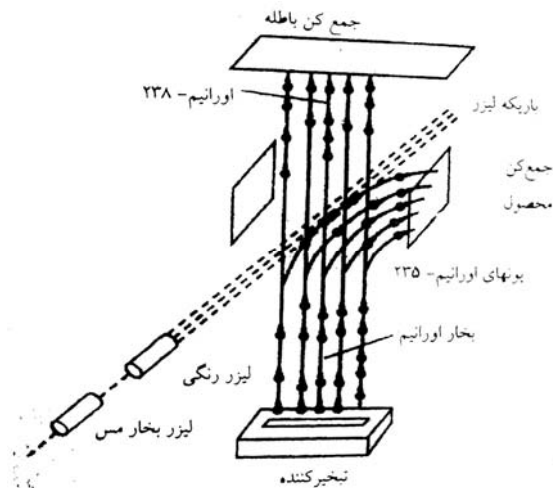
⁷ Cascade

۳-۳- جداسازی لیزری ایزوتوپ^۸

یک روش جدید و کاملاً متفاوت برای جداسازی ایزوتوپ های اورانیوم، از نور لیزر برای یونیزاسیون انتخابی اتم های اورانیوم - ۲۳۵، که می توانند از اتم های اورانیوم - ۲۳۸ جدا شوند، استفاده می کند. تحقیق و توسعه بر روی فرآیند موسوم به جداسازی لیزری ایزوتوپ های بخار اتمی (AVLIS)، در یک برنامه مشترک بین آزمایشگاه ملی لاورنش لیورمور و آزمایشگاه ملی اوک ریج انجام پذیرفته است. عنصری مانند اورانیوم دارای مجموعه مدارهای الکترونی کاملاً مشخص، شبیه ولی به دلیل وجود ۱۹۲ الکترون، بسیار پیچیده می باشد. اختلاف در جرم های هسته ای اورانیوم - ۲۳۵ و اورانیوم - ۲۳۸ به اختلاف کوچکی در ساختار مدارهای الکتریکی و انرژی های متناظر مورد نیاز برای برانگیزش یا یونیزاسیون دو ایزوتوپ منجر می گردد.

لیزر می تواند نور شدید با بسامدهای دقیق فراهم سازد، و یک باریکه لیزری بسیار دقیق می تواند فوتون هایی را ایجاد کند که به طور انتخابی اورانیوم - ۲۳۵ را یونیزه می کنند و اورانیوم - ۲۳۸ را بدون تغییر باقی می گذارند. پتانسیل یونیزاسیون برای اورانیوم - ۲۳۵ برابر ۶/۱ ولت است. این روش از نظر شدت و مشخصه تک بسامدی باریکه های لیزر، برای انجام برانگیختگی مرحله به مرحله تشدید یک اتم مزیت دارد. در روش AVLIS، سه فوتون حدود ۲eV یونیزاسیون را به انجام می رسانند. برتری روش فوق عبارت است از انتخاب تقریباً کامل ایزوتوپ مورد نظر. از هر ۱۰۰/۰۰۰ اتم یونیزه شده همه به استثنای یکی اورانیوم - ۲۳۵ هستند. این غنی سازی از ۰/۷٪ تا ۳٪ را در یک مرحله در مقایسه با هزاران مرحله پخش گازی امکان پذیر می سازد. یک کیلوگرم محصول طبیعی از ۶ کیلوگرم اورانیوم غنی شده حاصل می شود. سیستم نشان داده شده در شکل ۳-۴ حاوی چندین بخش است.

⁸ Laser Isotope Separation

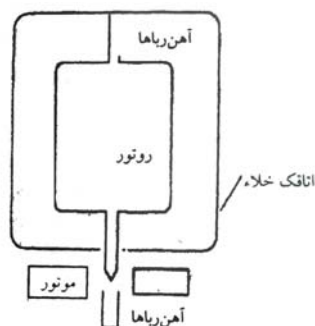


شکل ۳-۴: جداسازی لیزری ایزوتوپهای بخار اتمی

اولین بخش تبخیر کننده، به عنوان چشمه ای از اتم هاست، که یونیزاسیون مؤثر آن ها بسیار آسان تر از یونیزاسیون مولکول های پیچیده است. در یک اتاقک تخلیه شده، جریانی از الکترون ها با برخورد به بوته ای از اورانیوم، فلز را ذوب و تبخیر می کند. با وجود اینکه نقطه ذوب اورانیوم 4000K است، میزان بالایی از تبخیر رخ می دهد. بخش دوم، منبع نور لیزر است که متضمن دو نوع لیزر می باشد. یک جریان الکتریکی پالسی، همراه با تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی نوری مانند لامپ های مهتابی، از میان یک لیزر بخار مس عبور می کند. سپس نور سبز متمایل به زرد آن به لیزر دوم، که در آن یک رنگ در الکل حل شده است، انرژی می دهد. لیزر رنگی، یک نور قرمز متمایل به نارنجی گسیل می کند که تقویت شده، و بسامد آن تنظیم می گردد. نور این لیزر بخار اورانیوم را پرتو دهی می کند و به وسیله ی اتم های اورانیوم - ۲۳۵، که در یک فرآیند ارتعاشی سه مرحله ای یونیزه می شوند، جذب می گردد. لازم است بلافاصله یون های اورانیوم - ۲۳۵ را برای جلوگیری از تبادل بار با اتم های اورانیوم - ۲۳۸ ناخواسته، جداسازی نمود. یک میدان الکتریکی برای کشیدن یون های به سوی یک جمع کننده محصول تعبیه شده است که آن جا، یون ها بار خود را از دست داده، به اتم تبدیل شده، و به صورت مایع روی ورقه هایی متراکم می شوند. مایع اورانیوم غنی شده در جایی جمع شده، یا به صورت جامد انبار می شود و یا به عنوان سوخت رآکتور به دی اکسید اورانیوم تبدیل می گردد. اتم های اورانیوم - ۲۳۸ از میان باریکه لیزری عبور نموده و در روی دیواره های محفظه متراکم می شوند که به عنوان پسماندهای با غلظت پایین خارج می شوند.

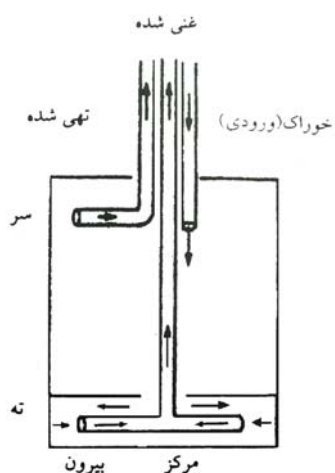
۳-۴- سانتریفیوژ گازی^۹

این دستگاه برای جداسازی ایزوتوپ ها، که، به دلیل سرعت بسیار بالا، فوق - سانتریفیوژ نیز نامیده شده است، از سال های ۱۹۴۰ شناخته شده است. این دستگاه در طول جنگ جهانی دوم آزمایش شد و به دلیل استرس پذیر نبودن مواد مقاوم در سرعت های چرخشی بسیار بالا و اتلاف انرژی زیاد رها شد. از آن به بعد پیشرفت ها، ساخت سانتریفیوژ را عملی تر و اقتصادی تر ساختند. سانتریفیوژ تشکیل شده است از یک اتاقک استوانه ای - روتور - که مطابق شکل ۳-۵ با سرعت بسیار بالا می چرخد.



شکل ۳-۵: سانتریفیوژ گازی

روتور به طور مغناطیسی حرکت و نگه داشته می شود. نیروی گریز از مرکز تمایل دارد گاز را در ناحیه بیرونی متمرکز سازد، ولی اغتشاشات حرارتی تمایل دارد گاز را در تمام حجم مجدداً توزیع نماید.



شکل ۳-۶: جریانهای گاز در سانتریفیوژ

در این پدیده مولکول های سبک دارای امتیازات بیشتری هستند و غلظت آن ها نزدیک محور مرکزی زیادتر است. به طرق مختلف یک جریان ناهمسوی UF₆ برقرار می شود که تمایل دارد ایزوتوپ های سنگین و سبک را به دو انتهای مخالف روتور ببرد. همان طور که به طور شماتیک در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، جریان های تهی شده و غنی شده گاز بیرون برده می شوند.

⁹ Gas Centrifuge

تئوری جداسازی توسط نیروی گریز از مرکز با فرمول توزیع چگالی گاز در یک میدان گرانشی شروع می شود:

$$N = N_0 e^{-mgh}$$

که در آن، انرژی پتانسیل mgh است. عبارت را برای یک گاز چرخشی، با انرژی جنبشی $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\omega^2 r^2$ در شعاع r ، که در آن ω سرعت زاویه ای، v/r است، تعدیل می کنیم. برای به دست آوردن نسبت فراوانی به عنوان تابعی از فاصله، آن را برای گاز با جرم های m_H و m_L به کار می گیریم.

$$R = R_0 e^{(m_H - m_L)\omega^2 r^2 / (2kT)}$$

توجه داشته باشید که جداسازی بستگی به اختلاف جرم ها دارد و نه مانند مورد پخش گازی به ریشه دوم آن ها.

ضرایب جداسازی ۱/۱ یا بهتر، با سانتریفیوژهای به طول حدود ۳۰ سانتی متر، و سرعت سطح روتور 350 ms^{-1} ، به دست آمده است. میزان جریان هر مرحله از یک سانتریفیوژ بسیار کمتر از مورد پخش گازی است، که این مستلزم تعداد واحدهای بیشتری به صورت موازی است.

با این حال مصرف انرژی الکتریکی برای یک ظرفیت معین، با ضریب ۶ تا ۱۰ پایین تر است که در نتیجه هزینه عملیاتی کمتری را در بر دارد. علاوه بر این، هزینه کل یک کارخانه سانتریفیوژ کم تر از آن کارخانه پخش گازی است. کشورهای اروپایی برای به چالش کشیدن انحصار پیشین ایالات متحده در کارهای غنی سازی، از هزینه های پایین تر غنی سازی به روش سانتریفیوژ بهره گرفته اند. در حقیقت، بسیاری از شرکت های برق آمریکایی سوخت را از آمریکا می خرند [۳].

۳-۴-۱- جداسازی به وسیله نفوذ فشاری^{۱۰}

در یک مخلوط که از اجزای متفاوتی تشکیل شده که با سرعت متفاوتی حرکت می کنند، سرعت متفاوت حرکت، سبب نفوذ جریان ها می شود که برای هرکدام از اجزای جریان نسبت به اجزای دیگر و همچنین فلاکس متوسط اجزاء متفاوت است. بر طبق ترمودینامیک فرآیندهای برگشت ناپذیر فلاکس نفوذ جرم در نتیجه چهار گرادیان متفاوت است:

۱- گرادیان غلظت (نفوذ معمولی)

۲- گرادیان فشار (نفوذ فشاری)

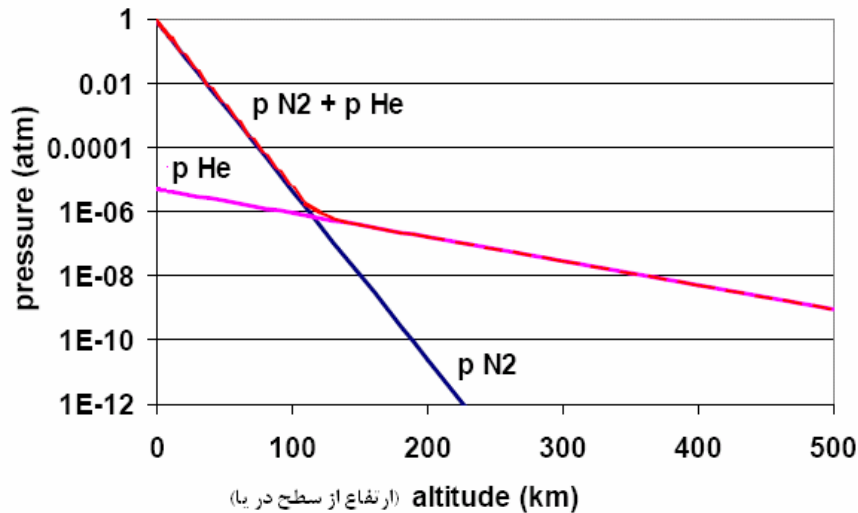
۳- نیروهای خارجی که به صورت غیر مساوی بر اجزای متفاوت عمل می کنند (نفوذ نیرویی)

۴- گرادیان دمایی (نفوذ دمایی)

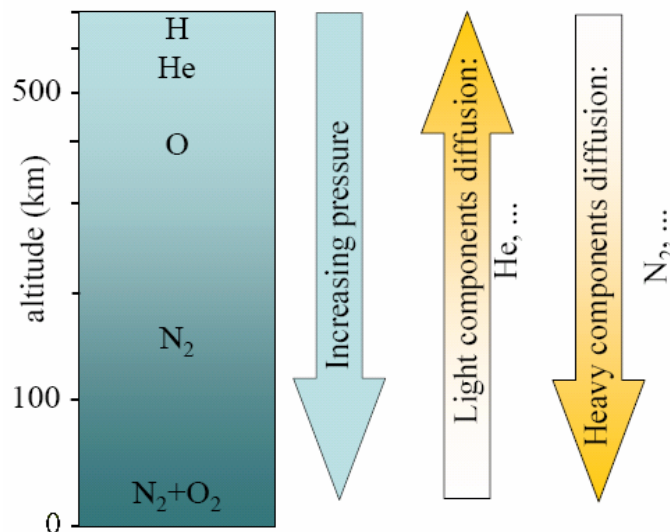
تا آن جا که فرآیند سانتریفیوژهای گازی مورد مطالعه قرار گرفته هیچ نفوذ نیرویی در آن وجود ندارد و نیروی گریز از مرکز هم به صورت مساوی بر روی تمام اجزا عمل می کند. علاوه بر این نفوذ دمایی هم قابل نظر می باشد. اهم جداسازی به دلیل نفوذ فشاری است که از گرادیان فشار و آن هم از نیروهای گریز از مرکز که بر مخلوط وارد می شوند، ناشی می شود. این تأثیرات جداسازی منجر به گرادیان غلظت می شوند که آن هم منجر به تعادل بین تأثیرات جداسازی می شود. به عنوان یک مثال ساده از یک پدیده جداسازی می توان به تغییرات ترکیب نسبی سازنده های جو اطراف زمین اشاره کرد. به طور اساسی این جداسازی به علت نیروی ثقل می باشد نه یک نیروی نفوذی خارجی که بر اجزای هوا عمل می کند. در حقیقت نیروی ثقل باعث ایجاد افت فشار در ارتفاعات می شود (شکل ۳-۷) و این گرادیان فشار منجر به نفوذ جریان جرم شده و اجزای سنگین تر به سمت منطقه فشار بالاتر متمایل شده (به سمت پایین) و اجزای سبک تر به منطقه ی با فشار کم تر حرکت می کنند (بالای جو)، به طوری که نفوذ معمولی میل به تعادل این اثرات جداسازی دارد. ترکیب نسبی تعادلی اجزای سازنده ی جو نسبت

¹⁰ Pressure Diffusion

به ارتفاع متصلاً تغییر می کند و همان طور که می دانیم مولکول های نیتروژن و اکسیژن نزدیک زمین هستند و اتم های هلیم و هیدروژن در حدود بالای ۵۰۰ کیلومتری زمین قرار دارند (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۷: نمودار توزیع فشار عناصر موجود در جو [۴]



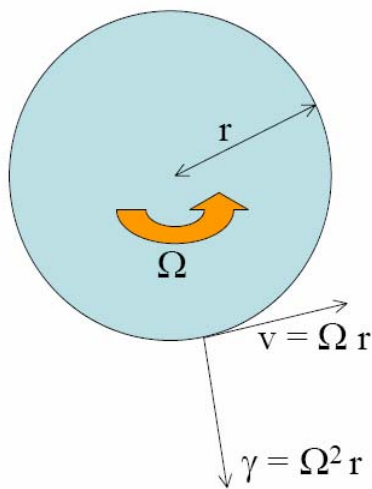
شکل ۳-۸: توزیع عناصر موجود در جو [۴]

جداسازی اجزای هوا که توسط شتاب ثقل انجام می شود و در یک فضای بزرگی به ارتفاع ۱۰۰ کیلومتر انجام می شود. پس برای اینکه جداسازی مشابهی را در صنعت داشته باشیم باید شتاب ثقل ایجاد شده بسیار بیشتر باشد تا یک جداکننده کوچکتر داشته باشیم. با توجه به جداسازی هایی که نوعاً قطرشان از ۱۰ cm تا ۱ m است، مقیاس جداسازی ما در حدود ۱۰^۶ برابر کمتر از جو می باشد (۱۰ cm)

در مقابل 100 km (۱۰۰). بنابراین شتاب جداسازی هم باید 10^6 برابر قوی تر از نیروی ثقل زمین باشد تا به یک جداسازی مساوی برسیم.

۳-۴-۲- طرح کلی سانتریفیوژهای گازی

r_w را به عنوان شعاع سانتریفیوژ و Ω را به عنوان سرعت زاویه ای آن تعریف کنیم. شتاب گریز از



شکل ۳-۹

مرکز هم $\gamma = \Omega^2 r_w$ می باشد. که r_w در حدود 1 m ، γ در

حدود $10^6 g$ ، Ω در حدود $3 \times 10^4 \text{ rad/s}$ یا $3 \times 10^5 \text{ rpm}$

3×10^5 و سرعت محیطی $V = \Omega r_w$ حدود 3000 m/s می باشد

(شکل ۳-۹).

عملاً سرعت چرخش پایین تر از این مقدار است چون هیچ

ماده ای نمی تواند با این سرعت بچرخد و متلاشی نشود. ماکزیمم

سرعت مجاز چرخش سانتریفیوژ 700 m/s می باشد.

به دلیل اینکه روتور باید با سرعت بسیار بالایی بچرخد، سانتریفیوژ طوری طراحی می شود که

اصطکاک در آن به حداقل برسد.

قطعات اصلی سانتریفیوژ در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است که شامل:

- روتور با شکل استوانه ای متقارن

- موتور الکتریکی برای چرخاندن روتور

- محور^{۱۱} کوتاه در پایین روتور که به صورت یک سوزن در یک کلاهک سخت در حال

چرخش است و وزن روتوری که با کمترین اصطکاک می چرخد را تحمل می کند.

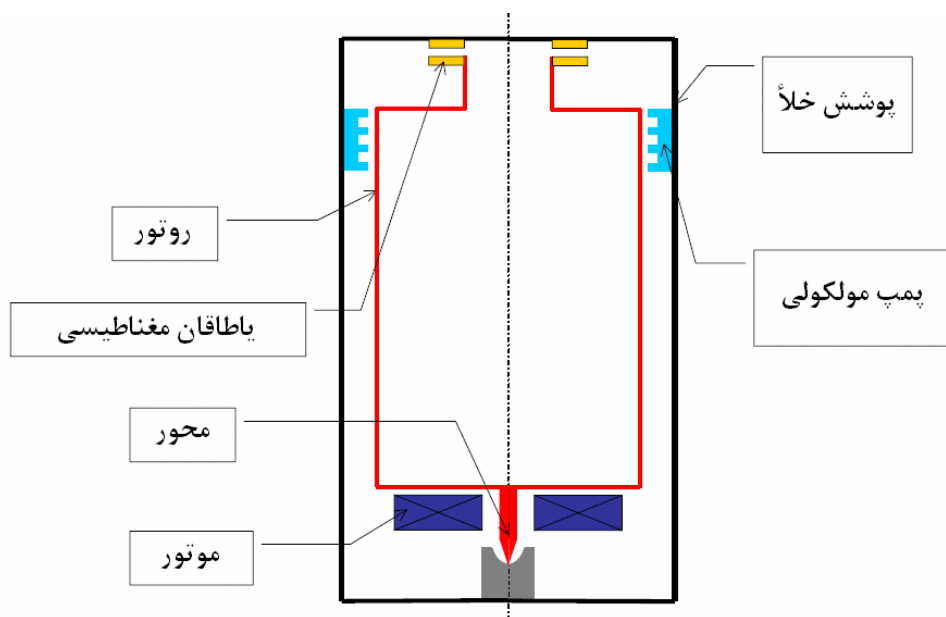
^{۱۱} Pivot

- یک یاطاقان مغناطیسی^{۱۲} در بالای روتور قرار دارد که محور چرخش را به همراه آن محور کوتاهی که در بالا اشاره شد نگه می دارد و همچنین از نوسانات دستگاه جلوگیری می کند.

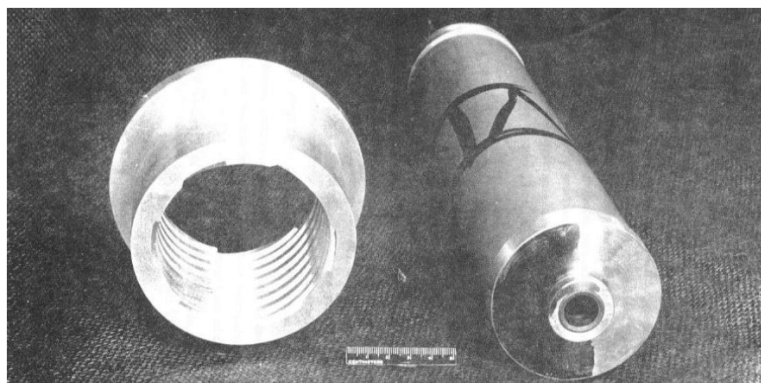
- یک پوشش خلاء برای مینیمم کردن کشیدگی گاز مجاور اجزای چرخان دستگاه

- یک پمپ مولکولی، با دستگاههای مارپیچ که از تراوش گاز به درون پوشش خلاء

جلوگیری می کند (شکل ۳-۱۰-ب).

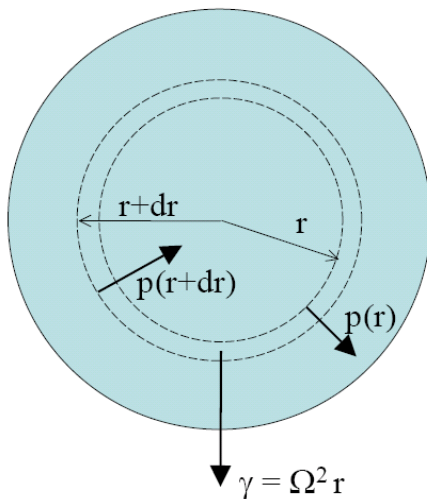


شکل ۳-۱۰-الف : قطعات اصلی یک سانتریفیوژ گازی



شکل ۳-۱۰-الف : پمپ مولکولی و روتور [۵]

۳-۴-۳- گردایان فشار^{۱۳}



شکل ۳-۱۱

اجازه بدهید یک مورد از استوانه چرخان که با مقدار مشخصی از گاز ایده آل پر شده است را مورد بررسی قرار دهیم. رابطه $P = \rho RT/M$ بین خصوصیات گاز درون سیلندر برقرار است. در شرایط پایدار گاز با یک سرعت زاویه ای یکسان در روتور می چرخد و در تعادل دمایی با روتور قرار دارد. علاوه بر این، تعادل گاز از دو نیرویی که بر آن اثر می کند نتیجه می شود: نیروی

گریز از مرکز و نیروی فشار. به کار گرفتن این تعادل بر روی یک حجم اولیه گاز منجر به معادله $\rho \Omega^2 r - dp/dr = 0$ می شود. سپس با استفاده از انتگرال گیری و قانون گازهای ایده آل با توجه به شکل ۳-۱۱ به معادله ی زیر می رسیم.

$$P = P_w e^{\frac{M\Omega^2(r^2 - r_w^2)}{2RT}}$$

که P_w فشار گاز در دیواره ی خارجی روتور و r_w شعاع روتور می باشد. بنابراین فشار گاز به صورت نمایشی با شعاع تغییر می کند و چون سرعت زاویه ای Ω هم بسیار بالاست این تغییرات بسیار شدید است.

۳-۴-۴- جداسازی شعاعی اولیه

گرادیان فشار زیاد، منجر به نفوذ فشاری جریان ها در جهت شعاعی می شود. اجزای سبک تر به سمت اطراف حرکت می کنند که فشار در آن جا بیشتر است و اجزای سبک تر به سمت محور که فشار در آن جا کمتر است می روند. در حالت تعادل مخلوط از اورانیوم-۲۳۵ در دیواره تهی شده و در قسمت محور غنی می شود.

نسبت جرمی اورانیوم-۲۳۵ در دیواره N ، از دیواره تا محور افزایش می یابد.

ضریب جداسازی تعادلی برابر است با :

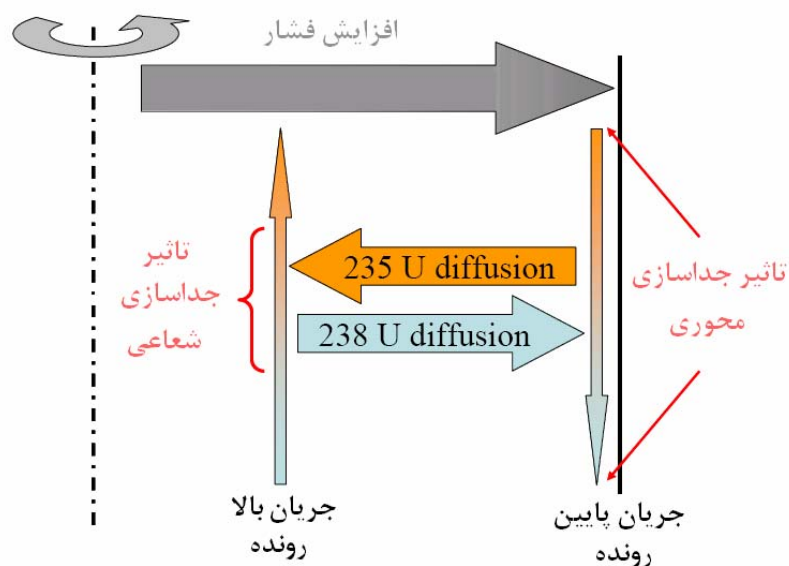
$$\alpha = \frac{N}{1-N} / \left(\frac{N}{1-N} \right)_{wall}$$

این تأثیر جداسازی اولیه می باشد که در جهت شعاعی واقع می شود.

ماکزیمم غنی سازی وقتی اتفاق می افتد که قسمت تهی شده از اطراف روتور و قسمت غنی شده از اطراف محور خارج شود. ولی هیچ ماده ای نمی تواند با این ماکزیمم غنی سازی تولید شود. چون در حقیقت هیچ گازی در نزدیکی محور وجود ندارد. محصول غنی شده تنها جایی می تواند خارج شود که گاز در رژیم پیوسته باشد.

۳-۴-۵- جداسازی محوری در یک سانتریفیوژ با جریان متقابل

چنان که برای زیاد کردن تأثیر جداسازی شعاعی اولیه یک هدایت گرمایی مازاد بر نیاز، در گاز چرخان وجود دارد (شکل ۳-۱۲)، گاز در طول دیواره ی جانبی روتور به سمت پایین و در داخل روتور در منطقه پیوسته به سمت بالا می رود. این دو جریان متقابل محوری به وسیله ی دو جریان شعاعی به هم متصل می شوند تا حلقه ی جریان بسته شود. یکی در پایین روتور و دیگری در بالای آن. به دلیل



شکل ۳-۱۲: جریان متقابل محوری

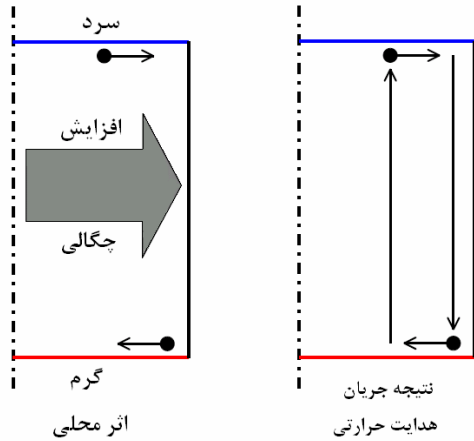
تأثیر جداسازی شعاعی اجزای سبکتر به سمت اطراف مرکز حرکت می کنند و اجزای سنگین تر به سمت مخالف حرکت می کنند.

بنابراین جریان محوری خارجی مقدار کمی از اجزا سبک را وقتی به سمت پایین می آید از دست می دهد و مقداری از اجزا سنگین را می گیرد. این جریان، اجزای سبک را ($U^{۲۳۵}$) از بالا به سمت پایین روتور تهی می کند.

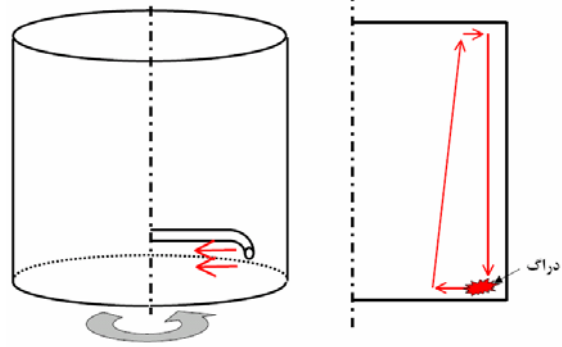
بنابراین قسمت بالا غنی تر از قسمت پایین می باشد. بر عکس، جریان محوری داخلی مقدار کمی از اجزای سبک را در حرکت به سمت بالا به دست می آورد و مقدار کمی از اجزای سنگین را از دست می دهد. که این قسمت پایین را از بالای روتور از اجزای سبک غنی تر می کند. در نتیجه هر دو جریان محوری اجزای سبک را در قسمت بالا غنی و در پایین تهی می کنند. بنابراین جریان متقابل محوری از تأثیر جداسازی شعاعی برای تولید جداسازی محوری استفاده می کند. وقتی که نرخ جریان مقابل بسیار ناچیز باشد غنی سازی محوری و جداسازی شعاعی انجام نخواهد شد. از طرف دیگر وقتی نرخ جریان متقابل بسیار زیاد باشد، سیکل هدایت حرارتی جریان گاز غنی شده داخلی را با جریان گاز تهی شده خارجی را مخلوط می کند. سپس مخلوط گاز در تمام روتور همگن می شود و هیچ جداسازی اتفاق نمی افتد. بنابراین شدت نرخ جریان متقابل باید بهینه شود تا ماکزیمم جداسازی کلی را در سانتریفیوژ داشته باشیم.

۳-۴-۶- ایجاد جریان متقابل

در یک سانتریفیوژ دو روش متفاوت برای ایجاد یک جریان متقابل وجود دارد: روش گرمایی و روش مکانیکی. به علاوه گردابه ها نیز به وسیله جریان های داخل شونده و خارج شونده ایجاد می شوند. جریان متقابل گرمایی به وسیله تفاوت دمایی ایجاد شده به وسیله بالا و انتهای پایین روتور ایجاد می شود. (شکل ۳-۱۳-الف) در نزدیکی انتهای گرم، گاز گرم شده و دانسیته آن کاهش یافته و به سمت منطقه با دانسیته پایین انتقال می یابد (مانند هوای گرم که سمت بالا حرکت می کند). در یک



شکل ۳-۱۳-الف: جریان متقابل حرارتی

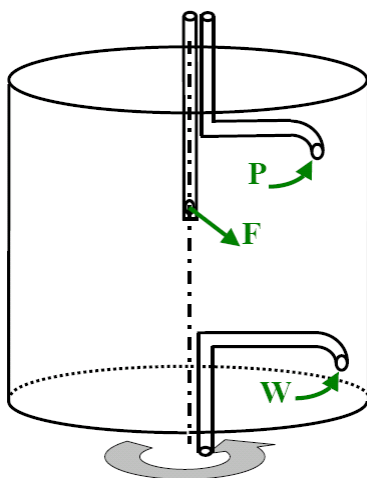


شکل ۳-۱۳-ب: جریان متقابل مکانیکی

سانتریفیوژ، جریان شعاعی خارجی به سمت انتهای سرد حرکت کرده و هر دوی آن ها یک سیکل هدایت گرمایی را در تمام سانتریفیوژ (در حقیقت در اطراف دیواره خارجی) تشکیل می دهند.

جریان متقابل مکانیکی به وسیله یک دراگ به علت سکون شیء و اثر متقابل آن در مقابل گاز در حال چرخش می باشد. شکل (شکل ۳-۱۳-ب). به طور موضعی دراگ سرعت چرخش گاز را کم می کند و این کاهش نیروی گریز از مرکز را به دنبال دارد، که این تعادل بین نیروی گریز از مرکز و نیروی فشار را به هم می زند و نیروی فشار گاز را به سمت مرکز روتور حرکت می دهد، این نتیجه در یک جریان داخلی ایجاد می شود که چرخش را در سانتریفیوژ موجب می شود.

۳-۴-۷- اجزای داخلی روتور

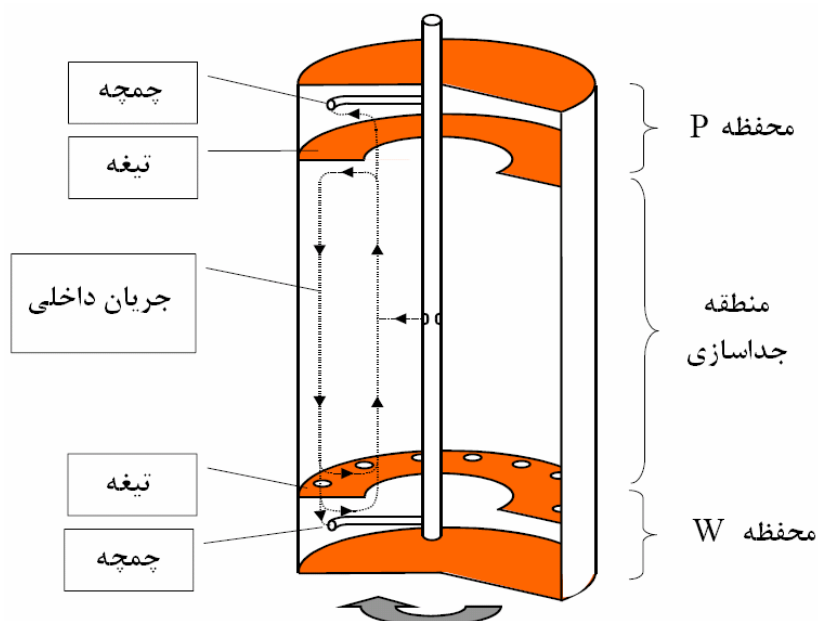


شکل ۳-۱۴

سانتریفیوژ در یک رژیم پایدار عمل می کند. گاز به صورت پیوسته به سانتریفیوژ داخل و از آن خارج می شود. خوراک، F ، به وسیله ی یک لوله محوری و در داخل هسته خلاء روتور از میان سوراخ های لوله به ماشین تزریق می شود. (شکل ۳-۱۴). محصول غنی شده، P ، و محصول تهی شده، W ، در نزدیکی دو انتهای روتور به وسیله لوله هایی که به چمچه^{۱۴} ها منتهی شده

اند، استخراج می شوند، که این لوله ها به صورت لوله های پیتوت کوچک که جریان گاز چرخان را هدایت کنند می باشند. اگر فشار استاتیک گاز در جلوی چمچه بسیار پایین باشد، به دلیل زیاد بودن پروفایل فشار شعاعی و فشار ایستایی بسیار بیشتر باشد، به دلیل اینکه سرعت چرخش گاز فوق صوت می باشد. گاز استخراج شده با یک شک شدید روبرو شده و قبل از اینکه به چمچه وارد شود تا این فشار ایستایی فشرده می شود، که این به گاز اجازه ورود به چمچه را داده و آن را از ماشین خارج می کند. چمچه ی پایینی که برای خارج کردن محصول تهی شده مورد استفاده قرار می گیرد، همچنین باعث ایجاد جریان متقابل مکانیکی نیز، به طوری که یک دراگ بر روی گاز چرخان ایجاد می کند، می شود.

برای جلوگیری از اینکه چمچه بالایی یک جریان متقابل در جهت مخالف تولید کند و باعث خرابی غنی سازی محوری شود، این چمچه داخل یک دالان به وسیله یک صفحه یا تیغه که با روتور می چرخد محصور می شود. تیغه ی پایینی هم برای جلوگیری از ایجاد اختلال چمچه پایینی در چرخه گاز استفاده می شود. این تیغه سوراخ هایی در روی خود دارد به طوری که گازی که به سمت پایین در حرکت بود می تواند از آن ها وارد دالان شود. دو تیغه^{۱۵} روتور را به سه بخش تقسیم کردند: محفظه های چمچه در

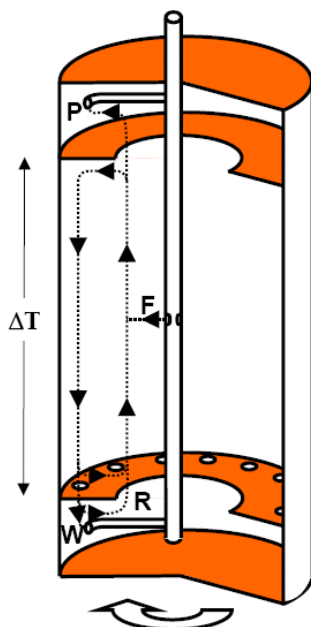


شکل ۳-۱۵: اجزای داخلی روتور

هر انتها، که برای استخراج محصولات گازی و همچنین ایجاد جریان متقابل مکانیکی استفاده می شود و قسمت میانی که قسمت اعظم طول روتور را شامل می شود و به عنوان محفظه جداکننده عمل می کند. قسمت های توصیف شده از اجزای داخلی در شکل ۳-۱۵ به خوبی نشان داده شده است.

۳-۴-۸- شرایط عملیاتی

برای افزایش ظرفیت جداسازی سانتریفیوژ، جریان های متقابل باید با انتخاب شرایط مناسب عملیاتی تنظیم شوند.



شکل ۳-۱۶

ابتدا اجازه دهید که موضوع را معطوف به منطقه جداسازی میانی کنیم و در حال حاضر محفظه چمچه ها را در نظر بگیریم. می بینیم که سانتریفیوژ به وسیله اطلاعات هندسی آن (شعاع روتور، ارتفاع بین دو تیغه، شعاع داخلی تیغه ها، موقعیت و سایز سوراخ های جانبی تیغه پایینی، ارتفاع و سایز ورودی خوراک) و سرعت زاویه ای و خصوصیات گاز (فشار دیواره p_w یا هولد آپ روتور و دمای عملیاتی T) مشخص می شود.

شرایط عملیاتی به قرار زیر می باشد (شکل ۳-۱۶):

نرخ جریان خوراک، F ، نرخ جریان محصول غنی شده، P ، نرخ

جریان محصول تهی شده، W ، و جریان متقابل مربوط به آن ها که تفاوت دما، ΔT ، بین دو تیغه (که باعث ایجاد جریان متقابل دمایی می شوند)، چرخه جریان داخلی، R ، (که از خارج منطقه جداسازی وارد محفظه نزدیک دیوار خارجی می شود و وارد منطقه جداسازی از محفظه داخلی روتور می شود، که این جریان متقابل مکانیکی را موجب می شود). این شرایط عملیاتی پارامترهای بهینه شده ای هستند که اجازه می دهند یک ماکزیمم ظرفیت جداسازی برای سانتریفیوژ داشته باشیم.

در یک بررسی کامل تر محفظه چمچه ها را هم باید به همراه منطقه جداسازی مد نظر قرار دهیم. به همین دلیل توصیف شرایط عملیاتی بسیار پیچیده تر می شود. به طوری که جریان متقابل مکانیکی وابسته به هندسه چمچه پایینی و محفظه آن می شود و نرخ جریان محصولات B و W هم وابسته به هندسه هر کدام از چمچه ها و محفظه و لوله هایی که چمچه ها را به سطح خارجی ماشین متصل می کنند می شود [۴].

فصل چهارم

شبه سازی سانتریفیوژهای گازی

فصل چهارم

شبه سازی سانتریفیوژهای گازی

در طول دهه گذشته تعداد کثیری از کشورها تکنولوژی سانتریفیوژ گازی را برای غنی سازی اورانیوم-۲۳۵ و استفاده آن به عنوان سوخت راکتورهای هسته ای گسترش دادند. با تمام شدن جنگ سرد و کاهش مراکز راکتورهای اتمی در جهان، عرضه ی بیش از حد اورانیوم غنی شده در بازارهای جهانی به وجود آمده است. به علاوه افزایش تقاضا برای ایزوتوپ های پایدار برای تحقیقات فیزیکی و شیمیایی و استفاده در علوم پزشکی منجر به جست و جو و کشف راه استفاده دیگری از تکنولوژی سانتریفیوژهای گازی شد و به علاوه این کاربردها، علاقه برای جداسازی ایزوتوپ ها برای راکتورهای اورانیوم وجود دارد. بنابراین برای رسیدن به این جداسازی سانتریفیوژهای موجود باید بهینه شوند و یا سانتریفیوژهای جدیدی طراحی شوند [۶].

برای ساخت یک سانتریفیوژ جدید یا بهینه سازی آن مسئله مهم داشتن یک مدل محاسبه شده برای پیش بینی کارهای سانتریفیوژ گازی است. طبیعت جریان در طول سانتریفیوژ تا درجه ی زیادی تعیین کننده بازده جداسازی ایزوتوپ های متفاوت در سانتریفیوژها می باشد [۷]. بنابراین این پیش بینی

ها نیازمند این است که معادلات حاکم بر جریان داخلی درون استوانه ی چرخان سانتریفیوژ حل شوند، که این راه حل ها می توانند به عنوان راهنمای طراحی و بهینه سازی عملیات سانتریفیوژها مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۱- مدل سازی سانتریفیوژ گازی

مدلی که اغلب برای جریان داخلی مورد استفاده قرار می گیرد، مدل منسوب به لارس آنجر^۱ است که با استفاده از روش های لایه های مرزی (ارائه شده توسط وود^۲ و مورتون^۳) و استفاده از مینیمم اصول (توسط بارباراسکای^۴ و وود) به دست آمده است. در این مدل راه حل معادلات حرکت برای سیال ویسکوز تراکم پذیر ایده آل همراه با هدایت حرارتی به عنوان یک انحراف درجه ۱ از جریان ایزوترمال جسم صلب درون یک سیلندر چرخان ارائه شده است. این مدل می تواند توسط یک سیستم معادلات دیفرانسیلی جزئی خطی توصیف شود. در واقع مدل پنکیک^۵ آنسجر یک تقریب خطی پایدار از جریان تراکم پذیر ویسکوز درون سانتریفیوژ گازی است. [۶]

علاوه بر این فرمول بندی برای مدل آنسجر یک فرمول بندی دیگر به عنوان معادله ی پتانسیل دمایی نیز تعریف شده است که پس از حل و مقایسه، مشاهده شده است که جواب های یکسانی با فرمول بندی معادله پنکیک دارد. این فرمول بندی در مرجع شماره [۶] به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

معادله آنسجر به صورت زیر تعریف می شود [۸]:

$$(e^x (e^x u_{xx})_{xx})_{xx} + B^2 u_{yy} = F(x, y) \quad (1-4)$$

¹ Lars Onsager

² Wood

³ Morton

⁴ Babarsky

⁵ Pancake Model

برای محاسبه جریان داخل سانتریفیوژها توسط این معادله، در گذشته یک تکنیک نیمه عددی بر پایه ی حل به وسیله روش بسط توابع مشخصه مورد استفاده قرار می گرفت که در واقع این روش برای مواردی مناسب است که برای حرکت جریان داخل سانتریفیوژ منبعی (مانند منابع جرم، مومنتوم، انرژی و ...) در نظر گرفته نشود ($F(x,y)=0$) و یا حداکثر یک منبع برای جریان در نظر گرفته شود. در حالی که نیاز برای روش های محاسبه با انعطاف پذیری بیشتر منجر به نیاز به توسعه یک تکنیک تمام عددی مانند روش المان محدود شد. این روش برای هنگامی که جریان به وسیله ی منابع جرم، مومنتوم یا انرژی یا پدیده های مرزی مانند گرادیان دما یا جرم تولید شده در مرزها حرکت داده شده کارایی بیشتری دارد.

روش حل شده به وسیله بسط توابع ویژه در منبع شماره [۶] و روش حل به وسیله ی روش المان محدود در منابع شماره [۷ و ۶] به تفصیل آورده شده. در اینجا ما تنها به بررسی چگونگی بدست آوردن معادله پنیک آنسجر می پردازیم.

اجازه دهید (r, θ, z) را به عنوان مختصات استوانه یی که در ته سانتریفیوژ تعبیه شده در نظر بگیریم. هنگامی که مختصات r ، فاصله عمودی از این محور را نشان می دهد، محور z منطبق بر محور گردش است. اگر جریان ایزوترمال باشد و به صورت یک جسم صلب گردش کند، اجزای سرعت در راستای (r, θ, z) به ترکیب به صورت زیر است:

$$U = 0, \quad V = \Omega r, \quad W = 0,$$

و توزیع فشار با معادله ی زیر ارائه می شود:

$$P = p_w \exp \left\{ -A^2 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \right\} \quad (۲-۴)$$

که Ω سرعت زاویه ای و P_w فشار در دیواره ی استوانه، a شعاع استوانه، $A = \frac{a\Omega}{(2RT_0)^{1/2}}$ و R

ثابت گازها و T_0 دمای یکنواخت گاز می باشد.

ما فرض کنیم که جریان داخل سانتریفیوژ انحراف کمی از چرخش ایزوترمال جسم صلب دارد. این به ما برای خطی کردن معادله ی جریان تراکم پذیر ویسکوز کمک می کند. به علاوه فرض می کنیم که سرعت چرخش به اندازه کافی زیاد است یعنی $A \gg 1$ ، بنابراین بیشتر سیال در نزدیکی دیواره ی استوانه جمع می شود یعنی $r = a$ و این فرض کمک می کند، در هر جایی در معادله که r داشته باشیم r را برابر a قرار دهیم. و سوم فرض می کنیم که جریان متقارن محوری می باشد و نفوذ محوری نیز قابل صرف نظر باشد.

استفاده از این چهار فرض منجر به معادله ی جریان تراکم پذیر ویسکوز به صورت زیر می شود:

$$e^{-x} w_y - 2A^2 (e^{-x} u)_x = M, \quad (3-4)$$

$$\phi = (e^x p)_x + e^x \mathcal{U} \quad (4-4)$$

$$\phi_{xx} = -\frac{\text{Re } S}{A^4} e^{-x} u - (\mathcal{T} - 2\mathcal{V}) \quad (5-4)$$

$$p_y = \frac{8A^6}{\text{Re}} w_{xx} + \mathcal{W} \quad (6-4)$$

$$-4A^4 H_{xx} - H_{yy} = 4A^4 [\mathcal{T} + 2(S-1)\mathcal{V}] \quad (7-4)$$

که (u, ω, w) انحراف سرعت ها در راستای (r, θ, z) ، فشار باشد، $\phi = \theta - 2\omega$ و $H = \theta + 2(S-1)\omega$ که θ دما است و $y = z/a$ و $x = A^2(1 - r^2/a^2)$ می باشد. $\mathcal{J}, \mathcal{W}, \mathcal{V}, \mathcal{U}, \mathcal{M}$ منابع بدون بعد جرم، سه جزء ممنتوم و انرژی می باشند. در تمام معادلات ۳-۴ تا ۷-۴، تمامی متغیرها بدون بعد شده اند. با استفاده از Ωa برای اجزای سرعت، P_w برای فشار و T_0 برای دما و ρ_w برای دانستیه. ثوابت مورد استفاده در معادلات بالا $\text{Re} = \rho_w \Omega a^2 / \mu$ و $S = 1 + \text{Pr} A^2 (\gamma - 1)$ و Pr عدد پرنتل و μ ویسکوزیته و C_p ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت می باشند.

x فاصله تا دیواره سیلندر را نشان می دهد. ما بر طبق نیاز تابع ψ را تعریف می کنیم:

$$e^{-x} u = -\psi_y + \frac{1}{2A^2} \int_x^{x_r} \mathcal{M}(\xi, y) d\xi \quad (8-4)$$

$$e^{-x} w = -2A^2 \psi_x, \quad (9-4)$$

که در آن x_T به اندازه کافی بزرگ انتخاب می شود تا جریان را وقتی $x \rightarrow \infty$ می رود شبیه سازی کند. دقت کنید که اگر $M \equiv 0$ شود، ψ یک تابع جریان معمولی می شود. حذف فشار از دو رابطه ۴-۴ و ۶-۴ منجر به رابطه ی زیر می شود:

$$\phi_y = \frac{8A^6}{\text{Re}} (e^x w_{xx})_x + (e^x W)_x + e^x \mathcal{U}_y \quad (10-4)$$

با جایگزین کردن ۸-۴ و ۹-۴ در ۵-۴ و ۱۰-۴ داریم:

$$\phi_{xx} = \frac{\text{Re } S}{A^4} \psi_y - \frac{\text{Re } S}{2A^6} \int_x^{x_T} \mathcal{M}(\xi, y) d\xi - (\mathcal{T} - 2\mathcal{V}) \quad (11-4)$$

$$\phi_y = -\frac{16A^8}{\text{Re}} (e^x (e^x \psi_x)_{xx})_x + (e^x W)_x + e^x \mathcal{U}_y. \quad (12-4)$$

با حذف ϕ از بین معادلات ۱۱-۴ و ۱۲-۴ داریم:

$$(e^x (e^x \psi_{xx})_{xx})_{xxx} + B^2 \psi_{yy} = \frac{\text{Re}^2 S}{32A^{14}} \int_x^{x_T} \mathcal{M}_y(\xi, y) d\xi + \frac{\text{Re}}{16A^8} [(e^x W)_{xxx} + (e^x \mathcal{U})_{yxx} + (\mathcal{T} - 2\mathcal{V})_y] \quad (13-4)$$

که $B = \text{Re} S^{1/2} / 4A^6$ است. حالا ما تابع پتانسیل χ را تعریف می کنیم:

$$\psi = -2A^2 \chi_x \quad (14-4)$$

با جایگذاری در ۱۳-۴ و انتگرال گیری از نتایج از x تا x_T و فرض اینکه χ و تمام مشتقاتش به

صورت $x \rightarrow x_T$ قابل صرف نظر هستند؛ به معادله زیر می رسم:

$$(e^x (e^x \chi_{xx})_{xx})_{xx} + B^2 \chi_{yy} = F(x, y) \quad \text{for } 0 < x < x_T \text{ and } 0 < y < y_T \quad (15-4)$$

که در آن:

$$F(x, y) \equiv -\frac{\text{Re}}{32A^{10}} \left[(e^{xq}W)_{xx} + (e^{xq}U)_{xy} + \int_x^{x_T} (2V - \mathcal{T})_y d\xi \right] \quad (16-4)$$

$$+ \frac{B^2}{4A^4} \int_x^{x_T} \int_\xi^{x_T} \mathcal{M}_y(\xi', y) d\xi' d\xi,$$

که در آن y_T موقعیت بالای استوانه است. معادله ۴-۱۵ معادله ی پنکیک آنسجر برای مدل جریان سانتریفیوژ می باشد [۷].

۴-۲- شبیه سازی به کمک شبکه های عصبی^۶

همانطور که مشاهده در فصل گذشته دیدیم، پیش بینی جداسازی ایزوتوپ ها به وسیله یک مدل ریاضی با استفاده از سانتریفیوژ گازی کار بسیار مشکلی است. همان طور که دیده شد، حرکت گاز می تواند توسط حل تحلیلی یا عددی یک سیستم معادلات تعریف شده با معادله ی پیوستگی، معادله ی نایور استوکس و معادله ی انرژی توصیف شود. ولی در عمل حتی اگر بتوانیم با محاسبات پیچیده ریاضی شرایط مرزی حاکم بر معادلات را بدست آورده و آنها را با روشهای عددی حل کنیم، به دلیل فرضیات ساده کننده ای که در مدل سازی انجام داده ایم، نمی توانیم از این نتایج برای پیش بینی عملکرد سانتریفیوژهای واقعی استفاده کنیم و در واقع این محاسبات قابل اجرا بر روی سانتریفیوژهای واقعی نیستند.

شبکه های عصبی یک روش جذاب برای مدل کردن مسائل پیچیده که سختی های بسیاری برای حل آن ها به روش های حل به وسیله ی مدل های پدیده شناسی وجود دارد می باشد.

بررسی جداسازی سانتریفیوژ با جریان متقابل اولین بار توسط کوهن^۷ تعریف شد. در دهه ی ۴۰ برای حل معادله ی نفوذ از روشی که فوریه^۸ بسط داده بود استفاده شد و در جای دیگری برای ستون نفوذ گرمایی به کار رفت و نهایتاً منجر به یک روش حل کلاسیک به عنوان معادله ی کوهن - آنسجر

⁶ Neural Networks

⁷ Cohen

⁸ Furry

شد. این مدل جریان متقابل با محور ثابت و یک غلظت متوسط شعاعی را به عنوان فرض در نظر می گیرد. این فرضیات ساده کننده باعث ایجاد خطاهایی در مقایسه با سانتریفیوژهای واقعی می شوند که البته به تدریج بهبود یافتند.

در ۱۹۵۴ جرنوت زیپ^۹ آزمایشاتی را با یک سانتریفیوژ فوق بحرانی انجام داد که این سانتریفیوژ عملکرد بسیار عالی، هم از نظر مکانیکی وهم از نظر جداسازی از خود نشان داد و به عنوان مبدأ سانتریفیوژهای مدرن شناخته شد. حل عددی یا تحلیلی معادلات مدل های موجود همیشه نیازمند تقریب ها و یا خطی کردن معادلات می باشد. تحلیل اجزای داخلی مانند چمچه ها، تیغه های چرخان، به وسیله شرایط مرزی واقعی بسیار مشکل است. در نتیجه هیچ کدام از روش های محاسبه برای پیش بینی عملکرد جداسازی سانتریفیوژهای واقعی کافی نیستند، اگرچه برای فهمیدن پدیده های فیزیکی واقع شده در سانتریفیوژ بسیار با ارزش هستند.

در اینجا ما استفاده از شبکه های عصبی شبیه سازی را برای پیش بینی عملکرد جداسازی سانتریفیوژها را پیشنهاد می کنیم. شبکه های عصبی به دلیل مشخصات ویژه ای که دارند توانایی یادگیری پروسه های غیر خطی ارائه شده به شبکه را در یک مجموعه آموزش دارا می باشند.

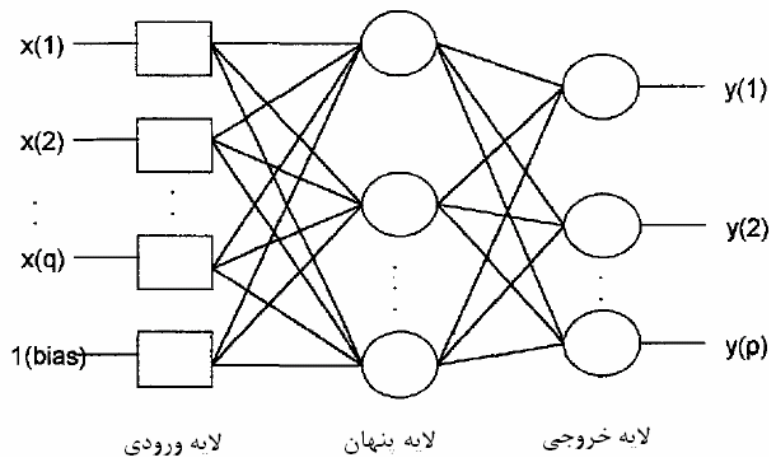
۴-۲-۱- شبکه های عصبی

شبکه های عصبی یکی از سریع ترین سطوح رشد یافته هوش مصنوعی در مهندسی شیمی و رشته های مختلف می باشد. و کاربرد اصلی آن در تشخیص خطاها و در شبیه سازی فرآیند مدل ها می باشد. این روش در جداسازی ایزوتوپ ها از اواخر دهه ۸۰ مورد استفاده قرار گرفت. به کارگیری این روش برای شبیه سازی فرآیندهای شیمیایی و هسته ای و به خصوص جداسازی ایزوتوپ ها به دلیل غیر خطی بودن فرآیند است. همچنین از این روش برای بهینه سازی عملکرد جداسازی سانتریفیوژها استفاده شد و

⁹ Gernot Zippe

نیز برای پیش بینی ماکزیمم جداسازی مورد استفاده قرار گرفت و در آزمایشات جدید به اختلافی کمتر از ۱٪ منجر شد.

این تکنیک منتهی به مدل های عددی قابل قبولی برای سانتریفیوژهای واقعی شد، البته بدون



شکل ۴-۱: شبکه عصبی سه لایه فیدفوروارد

پیچیدگی و سختی های پدیده شناسی که در بالا توضیح داده شد.

موفقیت در این روش مدل سازی، وابستگی زیادی به دانستن متغیرهای مؤثر بر فرآیند و همچنین در دست داشتن اطلاعات تجربی خوب و اطلاعات لازم در مورد محدوده ی آزمایشات دارد. دو ساختار اصلی برای شبکه های عصبی در نظر گرفته می شود:

۱- شبکه ی چند لایه ای فیدفوروارد^{۱۰} که در شکل ۴-۱ آمده است و برای مدل کردن سیستم های پایدار استفاده می شود.

۲- شبکه ی بازگشتی^{۱۱} که برای مدل های دینامیک مناسب تر است.

یک شبکه عصبی از نورون های پردازش گر تشکیل شده که در شکل ۴-۱ با دوایری نشان داده شده اند. کانالهای جریان که انتقال اطلاعات بین نورون ها را بر عهده دارند و اتصال دهنده نامیده می شوند نیز در شکل به صورت خطوطی نشان داده شده اند. جعبه های نشان داده شده در شکل نشان دهنده ی نورون هایی است که اطلاعات ورودی را در خود ذخیره می کنند. هر نورون ابتدا جمع وزنی

¹⁰ Feedforward

¹¹ Recurrent

سیگنال های لایه ی قبلی را محاسبه می کند و سپس مقدار خروجی را از تابع فعال ایجاد می کند که معمولاً با معادله ۲ تعریف می شود:

$$S_v = \sum_{u=1}^n W_{u,v} x_u + W_{n+1,v} \quad (۱۷-۴)$$

$$f(S_v) = \frac{1}{1 + e^{-S_v}} \quad (۱۸-۴)$$

در فرآیند مدل سازی، شبکه ی سه لایه ای بیشترین استفاده را دارد؛ که از لایه ی ورودی، لایه ی پنهان و لایه ی خروجی تشکیل شده است. لایه ی ورودی متشکل از $n_i + 1$ نورون می باشد که n_i تعداد متغیرهای ورودی است و پردازشی در این لایه انجام نمی شود. تعداد نورون ها در لایه ی پنهان توسط کاربر تعیین می شود و دقت نهایی بعد از یک مقدار مینیمم مشخص، تنها مقدار کمی به تعداد نورون های این لایه وابسته است. در نهایت تعداد نورون های لایه ی خروجی برابر با تعداد خروجی ها است.

سیستم «یادگیری^{۱۲}» به وسیله ی تغییر وزن ها ($W_{u,v}$)، مقدار مجموع مربعات تفاضل ها و E را

مینیمم می کند:

$$E = \sum_{m=1}^r \sum_{k=1}^p (y_k^{(m)} - O_k^{(m)})^2 \quad (۱۹-۴)$$

که مقدار y_k مقدار ارائه شده به شبکه عصبی در مجموعه آموزشی و O_k مقدار مشابه به دست

آمده در لایه ی خروجی است که به وسیله ی رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$O_k = f(S_k) \quad (۲۰-۴)$$

الگوریتم بازگشتی متداول ترین روش برای آموزش شبکه ی عصبی سه لایه فیدفوروارد می باشد.

این الگوریتم تعمیم روش توارث نزولی است. برای این روش شبیه سازی به عنوان نمونه ما از اطلاعات

آزمایشگاهی که زیپ برای جداسازی ایزوتوپ های اورانیوم انجام داد به عنوان نمونه استفاده می کنیم.

۴-۲-۲- آزمایشات غنی سازی اورانیوم توسط زیپ

در این کار از نتایج آزمایشات زیپ برای مدلسازی عملکرد سانتریفیوژ فوق بحرانی توسط شبکه های عصبی استفاده می کنیم. زیپ سه نوع آزمایش جداسازی برای تعریف جداسازی و عملکرد مکانیکی سانتریفیوژها برای ایزوتوپ های اورانیوم انجام داد. در نوع اول، جداسازی را به عنوان تابعی از جریان خوراک اندازه گرفت. در حالت دوم آزمایشات که توسط یک جریان با دبی بسیار کم طراحی شده بود، جداسازی را به عنوان تابعی از فشار در مرکز روتور سانتریفیوژ اندازه گرفت و در حالت سوم که بسیار شبیه حالت اول بود از اطلاعات آزمایشگاهی دقیق تری برای انجام آن استفاده کرد. در حدود ۴۰

Syst No.	Top scoop	Bottom scoop	Top baffle			Bottom baffle				EDC H ⁽²⁾	RFL ⁽³⁾	F ⁽⁴⁾ (mg/s)	α	$\delta U \times 10^6$ ⁽⁵⁾ (g/s)	Power (W)	Rem.
			axis t	NP H ⁽¹⁾	fins	axis t	NP H ⁽¹⁾	fins	spider							
10	double 2	double 2	no 0	no 0	no 0	no 0	0	no 0	no 0	0	0.5	-	-	-	-	Practically no separation
5a	double 2	single 1	no 0	No 0	no 0	no 0	0	no 0	no 0	0	0.5	4.6 3.2	1.123 1.132	7.73 6.14	10.8 7.9	
4	double 2	double 2	no 0	no 0	no 0	yes 1	12	no 0	no 0	0.2	0.5	2.8	1.15	6.83	14	Rotor became too hot
5	double 2	single 1	no 0	no 0	no 0	yes 1	12	no 0	no 0	0.2	0.5	3.81 2.55	1.193 1.216	14.79 12.15	7.9 6.25	
6	double 2	single 1	no 0	no 0	no 0	yes 1	12	no 0	no 0	0.2	0.5	5.48 0.5 4.7 7.4	1.155 1.267 1.157 1.125	14.20 3.48 12.47 12.82	8.9 6.13 9.1 11.1	
13	double 2	single 1	yes 1	12	no 0	yes 1	0	no 0	no 0	0.5	0.33	6.18 1.637	1.138 1.228	12.89 8.58	10.5 7.7	
29	double 2	single 1	yes 1	24	no 0	yes 1	0	yes 1	yes 3	0.2	0.5	very low 0.1	1.355	1.14	6.9	no time to optimize δU
30	double 2	single 1	yes 1	24	no 0	yes 1	12	yes 1	no 0	0.2	0.5	very low 0.1	1.355	1.14	10.5	
31	double 2	single 1	yes 1	12	yes 1	yes 1	24	no 0	no 0	0.2	0.5	5.53 3.8 0.477	1.180 1.202 1.274	18.89 16.03 3.48	10 6.6 4.6	

جدول ۴-۱: اطلاعات آزمایشگاهی بدست آمده از آزمایشات زیپ

جایگذاری متفاوت برای چمچه ها و تیغه های چرخان توسط زیپ برای حالت اول انجام شد و تنها ۹ حالت که مهمترین آن ها بودند توسط او ارائه شد. همچنین تست ها با جایگذاری و زاویه های متفاوت برای جریان خوراک ورودی به روتور انجام گرفت.

حال ما با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی زیپ سانتریفیوژها را مدل می کنیم. در این مورد ما به دنبال یک شرایط بهینه برای سانتریفیوژها هستیم. اطلاعات بدست آمده و کد شده ای در جدول ۴-۱ آورده شده که آن ها را به شبکه عصبی، برای آموزش آن، ارائه می کنیم. که تعریف علائم اختصاری در جدول به صورت زیر می باشد:

NPH=تعداد سوراخهای جانبی

EDCH=(قطر روتور) / (قطر سوراخ مرکزی) = قطر معادل سوراخهای مرکزی تیغه ها

RFL=(ارتفاع روتور)/(فاصله از انتهای کلاهک بالایی تا موقعیت خوراک) = جایگاه نسبی خوراک

در ضمن وقتی که خوراک با دبی بسیار کمی وارد شود ما آن را حدود 0.1 mg/s فرض می کنیم که توسط عبارت زیر محاسبه می شود:

$$\delta U = F \cdot \theta (1 - \theta) \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \ln(\alpha) \quad (4-21)$$

که F دبی جریان، α ضریب جداسازی و θ ، برش می باشد که توسط رابطه ی بین محصول و دبی خوراک تعریف شده در حدود 0.5 فرض می شود.

۴-۲-۳- داده های آزمایشگاهی

در این مورد، آزمایشات با آرایش متفاوتی از سانتریفیوژها مورد بحث قرار می گیرند. اطلاعات موجود در جدول ۴-۱، به استثنای ردیف ۱۰، برای آموزش به شبکه عصبی داده می شود، با متغیرهای ورودی که در زیر می آید:

- چمچه پایینی (تک = ۱، دوتایی = ۲)

- وجود تیغه ی بالایی (بله = ۱، خیر = ۰)

- تعداد سوراخ های جانبی تیغه بالایی

- پرده های تیغه ی بالایی (بله = ۱، خیر = ۰)

- وجود تیغه ی بالایی (بله = ۱، خیر = ۰)
- تعداد سوراخ های جانبی تیغه بالایی
- پرده های تیغه ی بالایی (بله = ۱، خیر = ۰)
- شبکه تیغه پایینی (خیر = ۰، بله = ۳ با سه شاخه)
- قطر معادل سوراخ مرکزی تیغه یا تیغه ها
- محل نسبی خوراک
- دبی خوراک mg/s

و متغیرهای خروجی:

- α ، ضریب جداسازی
- W ، توان مصرفی
- δU ، قدرت جداسازی (کار جداسازی)

۴-۲-۴- یادگیری و آزمایش توسط شبکه عصبی

داده های آزمایشگاهی به دو گروه تقسیم می شوند:

- ۱- یک «مجموعه یادگیری^{۱۳}» با ۱۲ مجموعه داده
- ۲- یک «مجموعه آزمایشی^{۱۴}» با ۴ مجموعه داده

مجموعه یادگیری برای آموزش شبکه عصبی و مجموعه آزمایش برای چک کردن نتایج شبکه ی عصبی مورد استفاده قرار می گیرد. یک شبکه عصبی فیدفوروارد با الگوریتم برگشتی مورد استفاده قرار می گیرد. ما هفت شبکه متفاوت را با ۴ تا ۱۰ نورون در لایه ی پنهان آزمایش کردیم. تعداد ارائه داده به شبکه ی عصبی برای آموزش، بیشتر از ۱۰۰۰۰۰ مورد بود. یک شبکه عصبی با ۶ نورون در لایه ی پنهان

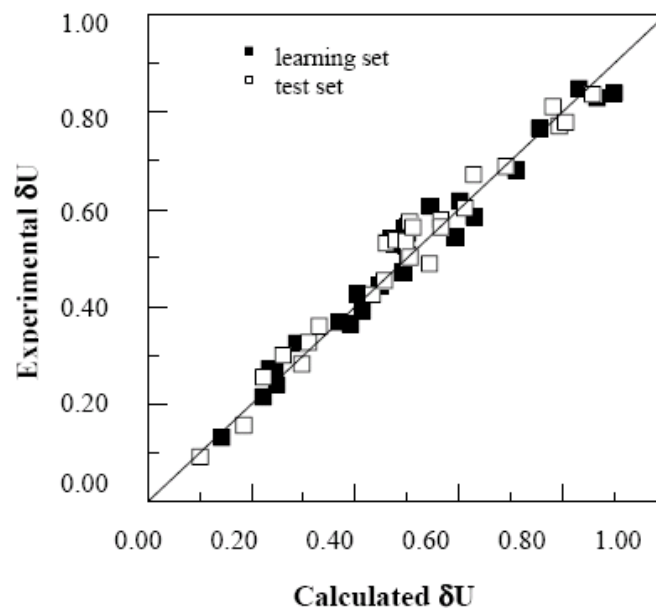
¹³ Learning Set

¹⁴ Test Set

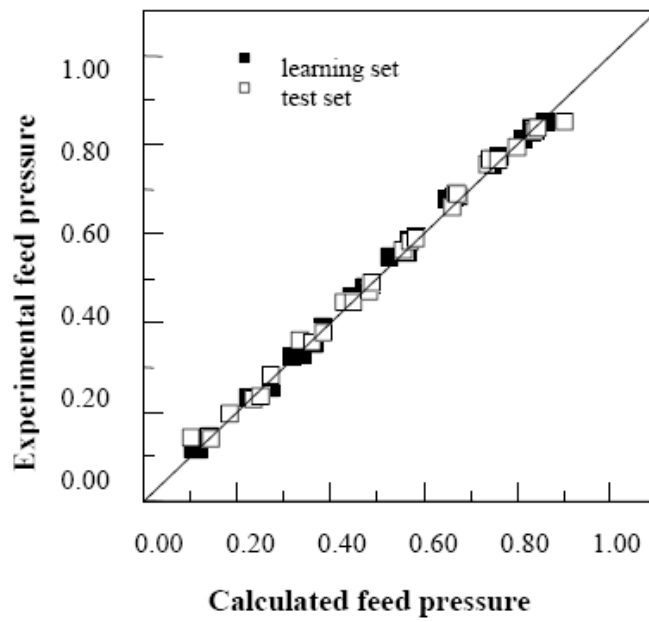
نیز انتخاب شد. اگرچه مجموعه ی آزمایش نشان داد که بهترین نتایج با ۹ نورون حاصل می شود. ما تصمیم گرفتیم که برای جلوگیری از Over Fitting از ۶ نورون استفاده کنیم. شبکه با ۶ و ۹ نورون نتایج مشابهی می دهند.

۴-۲-۵- مقایسه داده های آزمایشگاهی با داده های محاسبه شده

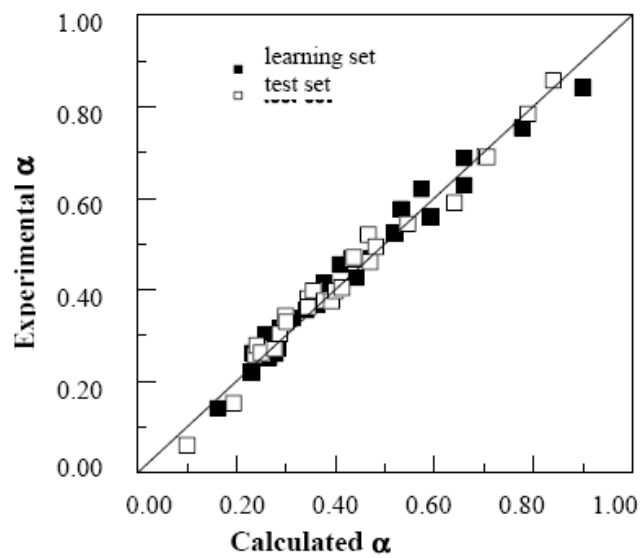
وزن های شبکه عصبی طوری انتخاب شدند که کمترین خطا را در مجموعه آزمایشی بدهند، مقایسه مقدار محاسبه شده و آزمایشگاهی δU و α و فشار خوراک و پسماند خروجی و توان مصرفی انجام شد که در شکل ۴-۲ تا ۴-۵ نمودار مربوط به نتایج آنها نشان داده شده است.



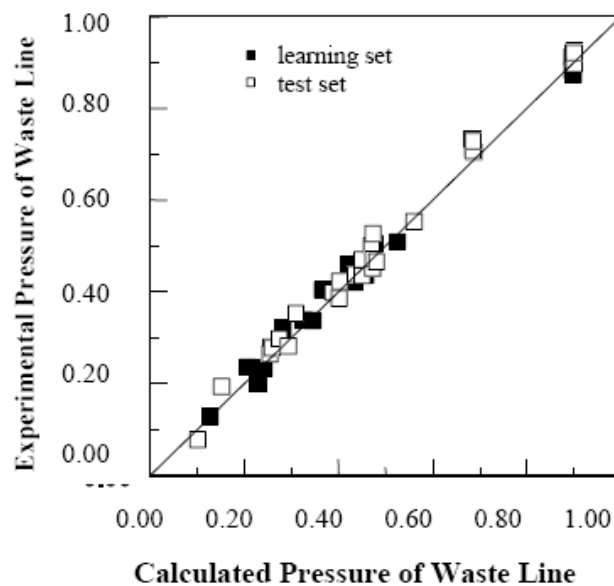
شکل ۴-۲: مقایسه داده های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده توسط شبکه های عصبی برای کار جداسازی، δU [۱۰]



شکل ۴-۳: مقایسه داده های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده توسط شبکه های عصبی برای فشار خوراک [۱۰]



شکل ۴-۴: مقایسه داده های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده توسط شبکه های عصبی برای ضریب جداسازی [۱۰]



شکل ۴-۵: مقایسه داده های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده توسط شبکه های عصبی برای فشار پسماند خروجی [۱۰]

توافق نتایج آزمایشگاهی و محاسبه شده رضایت بخش می باشد. متأسفانه ما هیچ اطلاعاتی در مورد خطاهای آزمایشگاهی نداشته تا بتوانیم یک ارزیابی آماری از پیش بینی شبکه عصبی داشته باشیم.

۴-۲-۶- بهینه سازی سانتریفیوژ گازی

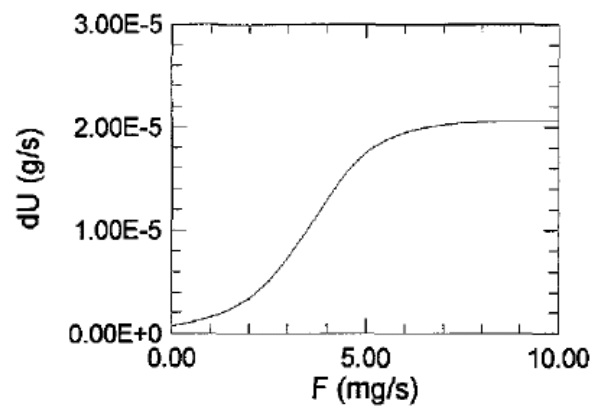
شبکه عصبی برای حالت های مختلف سوار کردن یک سانتریفیوژ با سیستم های متفاوت تیغه ها و چمچه ها آموزش دید. سپس ما به دنبال پیدا کردن یک ترکیبی از حالات برای ماکزیمم δU بودیم. داده های ارائه شده برای حالات مختلف از سانتریفیوژها در جدول ۴-۱ با نرخ خوراک از صفر تا 10 mg/s محاسبه شد. شبکه عصبی ۳۶۲۸۸ راه حل متفاوت محاسبه کرد. سیستمی که شبکه عصبی برای بهترین حالت پیش بینی کرد، در جدول ۴-۲ ارائه شده که متفاوت با هر کدام از سیستم های پیشنهادی زیپ می باشد.

عملکرد جداسازی سانتریفیوژ بهینه شده نیز می تواند با شبکه عصبی پیش بینی شود که

مقداری مورد انتظار در مورد کار جداسازی، δU ، در شکل ۴-۳ نشان داده شده است [۹ و ۱۰].

Top scoop	double - 2	
Bottom scoop	single - 1	
Top baffle	existence	yes - 1
	NPH	24
	fins	yes - 1
Bottom baffle	existence	yes - 1
	NPH	24
	fins	yes - 1
	spider	yes - 3
EDCH	0.2	
RFL	0.3	
Feed rate (mg/s)	9.5	
α	1.199	
$\delta U \times 10^5$ (g/s)	2.06	
Power (W)	12.6	

جدول ۴-۲: شرایط سانتریفیوژ بهینه شده



شکل ۴-۶: پیش بینی کار جداسازی δU ، به عنوان تابعی از نرخ خوراک ورودی برای سانتریفیوژ بهینه شده

نتیجه گیری

با توجه به مطالب گذشته دیدیم که حل معادلات حاکم بر سانتریفیوژ گازی به همراه به دست آوردن شرایط مرزی بسیار مشکل است و برای تا حدودی ساده کردن این کار، مجبور به در نظر گرفتن فرضیاتی هستیم که موجب بروز خطاهایی در نتایج و در نتیجه عدم تطابق آنها با شرایط عملیاتی واقعی می شود. اگرچه این کار برای فهمیدن پدیده های فیزیکی واقع شده در سانتریفیوژ بسیار با ارزش هستند. بنابراین شبکه های عصبی یک روش بسیار مناسب و مهم برای شبیه سازی سانتریفیوژهای گازی می باشد. در دست داشتن داده های آزمایشگاهی مناسب و قابل اعتماد از مهمترین موارد برای دستیابی به نتایج دلخواه است. در این روش ما به نتایج خوبی با اختلاف نزدیک به ۱٪ بین سانتریفیوژ واقعی و مقادیر پیش بینی شده برای سانتریفیوژ بهینه شده رسیدیم. در این مورد اگرچه ما داده های نسبتاً کمی در اختیار داشتیم، شبکه عصبی توانست آموزش ببیند و تطابق خوبی بین داده های آزمایشگاهی و محاسبه شده برقرار کند. اگرچه ما نمی توانیم نتایج را بدون امتحان آنها در آزمایشگاه تضمین کنیم ولی شرایط بدست آمده در فرآیند بهینه سازی واقع گرایانه است.

منابع

- [۱] تریبال، رابرت، انتقال جرم، ویرایش سوم، ترجمه دکتر مرتضی سهرابی، دکتر طاهره کاغذچی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵.
- [۲] Cheremisinoff, Nicholas, Handbook of Chemical Processing Equipment, Butterworth-Heinemann, United States of America, 2000.
- [۳] موری، ریموند ال، مقدمه ای بر مفاهیم، سیستم ها و کاربردهای انرژی هسته ای، دکتر محمد قنادی مراغه، سازمان انرژی اتمی ایران، ۱۳۸۴.
- [۴] Doneddu, F., Uranium enrichment: centrifuge process - physical principles -, CEA/DEN/DM2S, 2004.
- [۵] Houston Wood, Introduction to Gas Centrifuges, University of Virginia, 2003.
- [۶] Rebecca Bourn, Todd E. Peterson, Houston G. Wood, Solution of the pancake model for flow in a gas centrifuge by means of a temperature potentia, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 178, 183-197, 1999.
- [۷] M.D.Gunzburger, H.G.Wood And J.A.Jordan, A Finite Element Method For Gas Centrifuge Flow Problems, SIAM J. Sci. STAT. COMPUT. Vol. 5, No. 1, March, 1984.
- [۸] Daniel Zwillinger, Handbook of Differential Equations, 3rd edition, Academic Press, 1997.
- [۹] Migliavacca, S.C.P., Nascimento, C.A.O. and Rodrigues, C., Use of Neural Network for the Simulation of a Gas Centrifuge. J. Nucl. Sci. and Technol., vol. 36, No. 4, 364-370 (1999).
- [۱۰] Migliavacca, S.C.P., Nascimento, C.A.O. and Rodrigues, C., Analyses and Optimization of Gas centrifugal Separation of Uranium Isotopes by Neural Networks., Brazilian J. Chem. Eng., vol.19, no., pp. 299-306 (2002).