



دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه

جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک هسته‌ای

جداسازی ایزوتوپ‌های عناصر سنگین به روش ICR

نگارش:

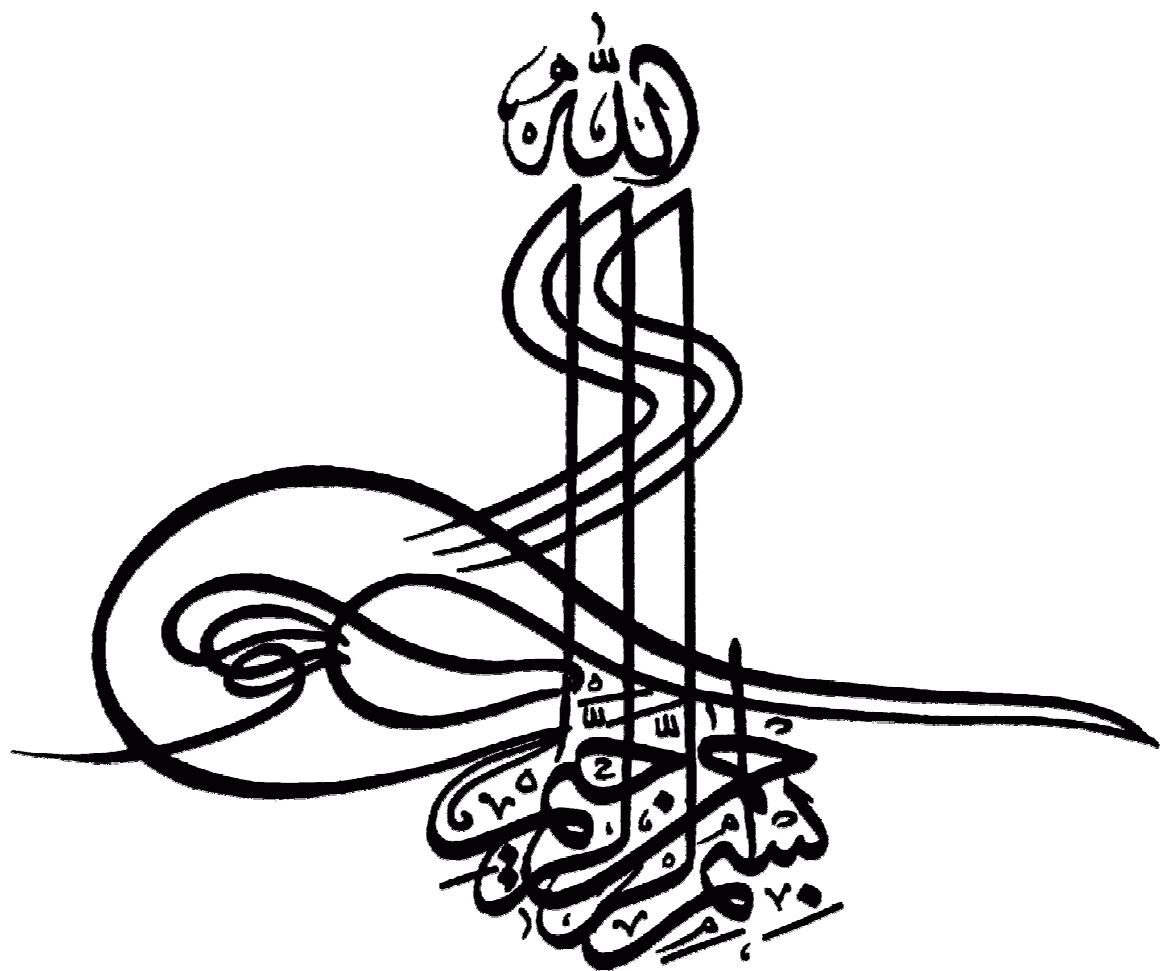
نغمه پوراحمدیان

استاتید راهنما:

دکتر رضا ایزدی (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر مهدی صادقی (سازمان انرژی اتمی ایران)

شهریور ۱۳۹۰



قدردانی

بدین وسیله به شکرانه حصول توفیق در راهیابی به مقطع کارشناسی ارشد و به انجام رسیدن نگارش این پایان نامه، حضرت دوست را سپاس گفته و از همه کسانی که در انجام این پروژه به نحوی مرا یاری نموده اند، صمیمانه سپاسگزاری می نمایم. ابتدا سپاس قلبی خود را به اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر مهدی صادقی و جناب آقای دکتر رضا ایزدی ابراز می دارم که باران دانش و معرفتشان را بی دریغ بر سرم باریدند و بی وقفه در تمامی مراحل انجام پروژه این جانب را یاری نمودند و همواره اینجانب را با رهنمودهای گرانبهای خویش بهره مند ساختند و زحمت باز خوانی و تصحیح پایان نامه را تقبل نمودند، قدر دانی می- نمایم. از استاد محترم جناب آقای دکتر محمد فرهاد رحیمی، استاد با سابقه دانشگاه فردوسی مشهد که به عنوان داور در جلسه دفاع اینجانب حضور داشتند و در طی این راه بنده را با نظرات ارزشمند خود بهره مند ساختند و همچنین به خاطر تصحیح این رساله توسط ایشان، سپاس فراوان دارم. تشکر فراوان از Professor Alen Marshal در (National Magnetic Field Laboratory (University of Florida) که بنده را از راهنمایی های خود بهره مند ساختند. از جناب آقای دکتر هادی هادیزاده که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی و داور در جلسه دفاع اینجانب حضور داشتند و از ابتدا طرح با راهنمایی های ارزشمند خویش اینجانب را یاری نمودند، کمال سپاسگزاری را دارم. از خانواده ام به خاطر تمام محبت هایشان و همکاری پیوسته در راستای انجام این پایان نامه، قدر دانی فراوان می نمایم. امید است که خداوند سبحان دگر باره توفیق ادامه این راه را به بنده بدهد.

نغمه پوراحمدیان

شهریور ۱۳۹۰

چکیده

جداسازی ایزوتوپی یکی از شاخه‌های بزرگ فیزیک هسته‌ای است. امروز نیاز به ایزوتوپ‌های خاص و خالص رو به افزایش است، تا آنجایی که به مقادیر کیلوگرم در سال نیاز به وجود دارد. همچنین به خاطر نیاز چشمگیر به ایزوتوپ‌های ^{48}Ca و ^{157}Ga در پزشکی و رادیو داروها و مسأله تحریم، به تولید این رادیو داروها در داخل ایران نیاز مبرم داریم. دستگاه *ICR (Ion Cyclotron Resonance)* توانایی تولید چندین کیلوگرم ایزوتوپ را در سال دارا می‌باشد، و می‌تواند ایران را به تولید کننده ایزوتوپ‌ها نیز تبدیل کند. این پایان نامه، با همکاری سازمان انرژی اتمی ایران و دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. از آنجایی که این اولین طرح تحقیقاتی در مورد *ICR* در ایران است و با توجه به حجم مطالعات، پژوهش از فروردین ماه ۱۳۸۹ آغاز و در شهریور ۱۳۹۰ به پایان رسید. این پایان نامه با امید تأمین اطلاعات اولیه برای ساخت دستگاه *ICR* آغاز شده است.

توابع توزیع سرعت عرضی و عوامل موثر بر تشدیدها در روش گرمایش تشدید سیکلوترونی یونی تعیین شده است. این اثرها برای ایزوتوپ‌های عناصر سنگین به ویژه ایزوتوپ‌های اورانیوم مورد بررسی قرار گرفته است. همینطور پارامترهای اصلی برای آنتن سیستم جداساز گرمایش سیکلوترونی یونی در حالت‌های تشدید تعیین گردیده و عوامل موثر بر ضریب جداسازی برای آن مشخص شده است.

شارهای یونی به سوی صفحات جمعگر می‌روند و با انتگرال گیری از توابع توزیع یونی، که متناظر با محدوده مجاز سرعت‌های طولی و عرضی و مختصات عرضی مراکز هادی مسیره‌های یونی در مقابل صفحات جمعگر می‌باشند، تخمین زده شده است.

یک چینش تشدید سیکلوترونی و راه‌های تولید جریان پلازما را توضیح داده‌ایم. جداسازی ایزوتوپ غلیظ شده توسط روش سیکلوترونی یونی مورد بحث قرار گرفته است. مشخصات اولیه جداسازی جمعگر ذرات گرم، با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی چینش و پلازما، محاسبه شده اند. و در نهایت توانایی جداسازی ایزوتوپی یون‌های ^{235}U توسط این سیستم جداسازی به اثبات رسیده است.

کلید واژه‌ها

پلاσμα، غنی سازی، جداسازی ایزوتوپی، ایزوتوپ، تشدید سیکلوترونی یونی، دستگاه های جداسازی، *ICR*

۱	مقدمه
۳	فصل اول محاسبات و روش‌های غنی سازی
۴	۱-۱ اصول کلی در غنی سازی اورانیوم
۴	۱-۱-۱ تعاریف پایه
۵	۲-۱-۱ آنروپی و کار جداسازی
۷	۳-۱-۱ نمونه‌ای از یک دستگاه غنی سازی
۷	۱-۳-۱-۱ ظرفیت جداسازی
۹	۴-۱-۱ آبشارها
۹	۱-۴-۱-۱ مراحل
۱۲	۲-۴-۱-۱ جریان‌های ماده
۱۳	۳-۴-۱-۱ زمان تعادل
۱۶	۴-۴-۱-۱ آبشارهای مربعی و رودرو
۱۸	۵-۱-۱ خلاصه
۲۱	۶-۱-۱ خصوصیات اورانیوم فلزی و UF_6
۲۳	۲-۱ فرآیندهای غنی سازی
۲۳	۱-۲-۱ روش پخش گازی
۲۳	۱-۱-۲-۱ اصول پایه
۲۴	۲-۱-۲-۱ سد پخش
۲۷	۲-۲-۱ روش سانتریفوژ گازی
۲۷	۱-۲-۲-۱ اصول پایه
۲۹	۲-۲-۲-۱ سانتریفوژهای مدرن
۳۲	۳-۲-۲-۱ آبشار سانتریفوژ
۳۵	۳-۲-۱ روش‌های الکترومغناطیسی و پلاسما
۳۵	۱-۳-۲-۱ اصول پایه
۳۸	۲-۳-۲-۱ کالوترون
۴۰	۳-۳-۲-۱ تشدید سیکلوترونی یونی
۴۴	۴-۳-۲-۱ سانتریفوژهای پلاسما
۴۷	۵-۳-۲-۱ خلاصه
۴۸	فصل دوم سیکلوترون (شتاب دهنده تشدید مغناطیسی)
۴۹	۱-۲ مقدمه
۴۹	۲-۲ گسترش تاریخی
۵۴	۳-۲ اصل تشدید

۵۸	فصل سوم اساس کار <i>ICR</i> و پارامترهای مؤثر بر آن
۵۹	۱-۳ حرکت سیکلوترونی یونی
۵۹	۱-۳-۱ بسامد، شعاع، سرعت و انرژی مداری سیکلوترونی یونی
۶۳	۲-۳ اساس روش تشدید سیکلوترونی یونی برای جداسازی ایزوتوپی
۶۹	فصل چهارم چیدمان جداسازی ایزوتوپی به روش <i>ICR</i>
۷۰	۱-۴ اصول پایه چیدمان جداسازی ایزوتوپی به وسیله روش گرمایشی <i>ICR</i>
۷۰	۱-۱-۴ اصول فیزیکی اجزای اساسی سیستم چشمه پلاسما
۷۴	۱-۱-۱-۴ نتایج آزمایشگاهی
۷۸	۲-۱-۴ اصول کلی آنتن گرمایی گزینشی
۸۱	۱-۲-۱-۴ اثر ساختار طولی میدان آنتن روی سرعت تولید و جداسازی ایزوتوپی <i>ICR</i>
۸۲	۱-۱-۲-۱-۴ میدان آنتن
۸۵	۲-۱-۲-۱-۴ گرمایش
۸۷	۳-۱-۴ اصول کلی سیستم جمع آوری ایزوتوپ هدف توسط جمعگر
۹۴	۱-۳-۱-۴ عملکرد جداسازی سیستم جمعگر
۱۰۰	۲-۴ طراحی چیدمانی برای جداسازی پلاسما به روش تشدید سیکلوترونی یونی
۱۰۴	۳-۴ سرعت تولید جداساز
۱۰۷	۴-۴ طراحی یک چیدمان برای دستیابی به ^{157}Gd
۱۱۱	فصل پنجم جداسازی ایزوتوپی به روش <i>ICR</i>
۱۱۲	۱-۵ محاسبات تابع توزیع سرعت عرضی تحت گرمایش سیکلوترونی یونی
۱۱۲	۱-۱-۵ محاسبات مخلوط ایزوتوپی دوتایی
۱۲۴	فصل ششم نتایج محاسبات و حالت‌های بهینه برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم توسط روش <i>ICR</i>
۱۲۵	۱-۶ مقدمه
۱۲۵	۲-۶ تعیین تابع توزیع برای یون‌های مخلوط دو ایزوتوپی اورانیوم
۱۳۱	۳-۶ محاسبه بازده گرمایش برای مخلوط دو ایزوتوپی اورانیوم
۱۳۴	۴-۶ تعیین غلظت ایزوتوپ هدف در مقابل صفحه جمعگر
۱۳۵	۵-۶ تعیین انرژی عرضی متوسط یون‌ها و اثبات توانایی جداسازی یون‌های ^{238}U و ^{235}U توسط دستگاه <i>ICR</i>
۱۳۷	۶-۶ نتیجه گیری
۱۳۸	مراجع

جداسازی ایزوتوپی شاخه‌ای بزرگ از صنعت است. ایزوتوپ‌ها کاربرد وسیعی در تولید رادیوداروها، پزشکی، کشاورزی، صنعت و برق اتمی دارند، همچنین ایزوتوپ‌ها برای حل مشکلات فیزیک بنیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های جداسازی ایزوتوپی صنعتی موجود (سانتریفوژهای گازی، جداسازهای الکترومغناطیسی و ...) نمی‌توانند همواره باتوجه به شرایط اقتصادی، مناسب باشند. این مسأله مربوط به بازده بسیار پایین روش جداسازی الکترومغناطیسی و یا نبود مواد فرار مناسب است که برای جداسازی سانتریفوژها ضروری می‌باشد.

تحقیقات برای تکنولوژی‌های جایگزین این امکان را به وجود آورده اند تا از کوچکترین به وسیع‌ترین محدوده و طبقه‌بندی پیکربندی‌های ایزوتوپی و کاهش توان مصرف، گسترش یابند و منجر به توسعه روش‌های گزینشی ایزوتوپی جدید شوند. از جمله آنها می‌توان به روش لیزر، روش فوتوشیمی برای جداسازی ایزوتوپ‌های جیوه و همچنین روش‌های جداسازی پلاسما اشاره کرد. روش‌های پلاسمایی نیاز به تحقیق بیشتر و توسعه دارند. در حال حاضر به ناچار هزینه‌های بالای تبخیر، یونش (از مرتبه $3000-300 eV/atom$) مواد و مشکلات فنی برای اثرات افزایشی در تأسیسات پلاسمایی وجود دارد. البته ضرایب جداسازی به قدر کافی بالا، تأسیسات قابل قبولی را برای مقیاس تولیدی مطرح می‌کند. از جمله فن‌آوری‌های شناخته شده جداسازی در پلاسما، با هدفی مشخص و بسیار مؤثر، روش جداسازی ایزوتوپی است که براساس تشدید سیکلوترونی یونی (ICR)^۱ ایزوتوپ‌ها را گرم می‌کند. این فرآیند در سال ۱۹۴۲ در خلال پروژه منهتن^۲ کشف شده بود، اما در آن زمان به علت فقدان آشنایی با علم پلاسما و فن‌آوری‌های مورد نیاز، چندان دنبال نشد.

امروزه این فرآیند پیشرفت کرده است. ایده اولیه در استفاده از پلاسما (به جای باریکه یونی)، یعنی مخلوطی شبه خنثی از یون‌ها و الکترون‌ها می‌باشد، به طوری که محدودیت‌های بار فضایی که توسط قانون چایلند لانگمور^۳ تعیین می‌شود، تا حدودی بر طرف خواهد شد. پیشرفت دوم راه‌کار جمع‌آوری در حجم است.

هردوی این موارد سرعت جریان ماده را افزایش می‌دهند. گذشته از این، فن‌آوری‌های جدید (میکروموج و مغناطیس‌های ابر رسانا)، که در دهه ۱۹۸۰ مطرح شدند موجود و قابل اطمینان می‌باشند.

گاهی اوقات به مقادیر خالص و بسیار ایزوتوپی مورد نیاز است، به عنوان مثال کلسیوم و نئودیموم که در مهندسی هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و همچنین بعضی از ایزوتوپ‌های عناصر خاکی کمیاب، که اشتعال‌زایی بیشتری در مخلوط سوخت راکتور دارند مانند ^{157}Gd ، نیاز به مقادیر قابل توجه آنها احساس می‌شود.

^۱ Ion Cyclotron Resonance

^۲ Manhattan

^۳ Child Langmuir

در نهایت باتوجه به این شرایط، روش جداسازی سیکلوترونی یونی، روشی بسیار مناسب است که توانایی تولید مقادیر مورد نیاز ایزوتوپ خالص را در بهترین حالت داراست. کار حاضر شروعی برای فعالیت بر روی چنین روشی در ایران می‌باشد.

فصل اول

محاسبات و روش‌های غنی سازی

۱-۱ اصول کلی در غنی سازی

۱-۱-۱ تعاریف پایه

بطور کلی یک واحد غنی سازی می تواند به عنوان جعبه/ای سیاه در نظر گرفته شود که ورودی آن ترکیبی از ایزوتوپ های مختلف یک عنصر با درصد معین و خروجی آن دو جریان یونی متفاوت است. یک جریان شامل درصد بیشتر از ایزوتوپ مطلوب و دیگری شامل درصدی کمتر از آنچه در جریان خوراک اولیه وجود دارد. ماده ای با درصد بیشتر عموماً فرآورده و ماده ای با درصد کمتر پسماند نامیده می شود [۱].

شکل (۱-۱) طرحی کلی از یک واحد غنی سازی با پارامترهای مهم آن را نشان می دهد. علامت های F ، P و W به ترتیب مشخص کننده جریان خوراک، فرآورده و پسماند هستند و معمولاً بر حسب کیلوگرم بر ثانیه (kg/s) یا تن بر سال (t/yr) بیان می شوند. علامت های N_F ، N_P و N_W درصد ترکیب تعداد مولکول های ایزوتوپ مطلوب مثلاً در غنی سازی اورانیوم، (^{235}U) را به ترتیب در مسیر جریان های مربوط به آنها نشان می دهد. اگر مخلوط تنها شامل دو ایزوتوپ باشد، آنگاه بخشی از ایزوتوپ که مربوط به گونه نامطلوب (^{238}U) است، توسط $(1-N)$ بدست می آید. برای مثال اگر ورودی شامل یک درصد ^{235}U باشد، آنگاه $N_F = 0.01$ و فراوانی ایزوتوپ نامطلوب $(1 - N_F) = 0.99$ خواهد بود [۲].

اغلب اوقات استفاده از یک متغیر دیگر به جز N برای توصیف ترکیب ماده مناسب است. مخصوصاً زمانی که مخلوط تنها شامل دو ایزوتوپ است، فراوانی نسبی ایزوتویی R را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$R = \frac{N}{1-N}$$

که معادل نسبت تعداد مولکول های دو ایزوتوپ در مخلوط است.

اثر واحد جداسازی بر این نسبت توسط ضریب جداسازی تک مرحله q به صورت زیر تعریف می شود [۳]:

$$q = \frac{R_P}{R_W}$$

برای بسیاری از فرآیندها این عدد کمی بزرگتر از یک است، از این رو اکثر اوقات مناسبتر است که با مقدار کم $g = q - 1$ سروکار داشته باشیم، که بهره جداسازی نامیده می شود. برای مثال، فرض کنیم یک فرآیند غنی سازی ویژه قابلیت استخراج ۵۱ درصد از تمامی ^{235}U موجود در ماده خوراک را داشته باشد، در این صورت جریان فرآورده تنها ۴۹ درصد ^{235}U را با خود حمل می کند. یعنی اگر برای هر ۱۰۰ اتم خوراک N_F اتم ^{235}U و $(1 - N_F)$ اتم ^{238}U وجود داشته باشد، فرآورده ترکیبی از N_F اتم ^{235}U و $(1 - N_F)$ اتم ^{238}U خواهد بود و فراوانی نسبی ایزوتویی در فرآورده عبارتست از:

$$R_P = \frac{51}{49} R_F$$

به طریق مشابه، فراوانی نسبی پسماند به صورت زیر خواهد بود:

$$R_W = \frac{49}{51} R_F$$

از این رو ضریب جداسازی تک مرحله می شود:

$$q = \frac{R_p}{R_w} = \left(\frac{51}{49}\right)^2 = 1,0833$$

و در نهایت بهره جداسازی خواهد بود:

$$g = 0,0833$$

۱-۲-۱-۱ آنتروپی و توان جداسازی

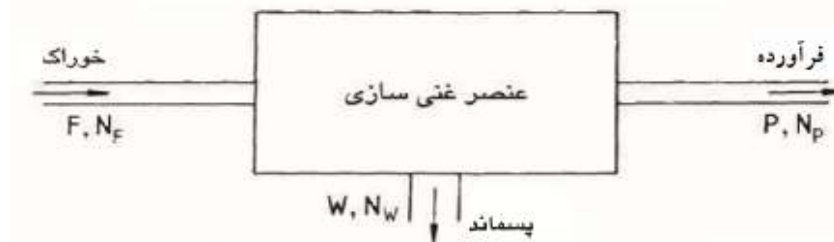
پارامتر اساسی که توسط فرآیند جداسازی تغییر می‌کند، آنتروپی است. آنتروپی میزان بی‌نظمی یک سیستم است. فرآورده و پسماند که از یک واحد غنی‌سازی خارج می‌شوند، تشکیل سیستمی با بی‌نظمی اندکی کمتر نسبت به ماده خوراک ورودی را می‌دهند. به بیان دیگر، ایزوتوپ‌ها اندکی جدا شده‌اند، از این رو به حالت منظم‌تری از جداسازی کل نزدیک شده‌اند. این بدان معناست که آنتروپی ماده توسط فرآیند جداسازی کاهش پیدا کرده است.

قانون دوم ترمودینامیک بیان می‌کند که هر کاهشی در آنتروپی یک سیستم تنها می‌تواند با مصرف انرژی انجام شود. بنابراین واحد جداسازی را می‌توان به عنوان دستگاهی تصور کرد که انرژی را دریافت و آن را به سفارش یا چیزی که اغلب، آنتروپی منفی گفته می‌شود، تبدیل می‌کند. تغییر آنتروپی در هر واحد از فرآوری خوراک توسط یک واحد جداسازی مانند شکل (۱-۱) توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta S = \frac{1}{T} K g^2 \theta (1-\theta) N_F (1-N_F) \quad (1-1)$$

$$\theta = \frac{P}{F} \quad \text{که}$$

θ نسبت جریان فرآورده به جریان خوراک است و معمولاً "برش" نامیده می‌شود. K ثابتی است که مقدار آن به انتخاب دستگاه واحد برای آنتروپی بستگی دارد. این عبارت برای تغییر آنتروپی تا زمانی معتبر است که اثر یک تک واحد جداسازی کوچک باشد، یعنی تا زمانی که $g \ll 1$ می‌باشد.



شکل ۱-۱. طرح کلی یک واحد غنی‌سازی، ورودی (خوراک F) و خروجی‌ها (فرآورده P و پسماند W) را نشان می‌دهد.

N_F ، N_P و N_W بخشی از U^{235} است که در هر مسیر قرار دارد [۱].

^۱ در این محاسبه فرض شده است که مسیرهای جریان و پسماند با دما و فشار مشابه با مسیر خوراک بیرون می‌آیند.

اگر فرآیند جداسازی از نظر ترمودینامیکی ایده‌آل، یعنی برگشت پذیر باشد، از تغییر آنترופی می‌توان سرعت مصرف انرژی واحد جداسازی را محاسبه کرد. اما تمام فرآیندهای غنی سازی شناخته شده با حالت ایده‌آل فاصله دارند و هیچ ارتباط ساده‌ای بین نیاز به انرژی در یک واحد جداسازی و تغییرات آنترופی، که به وجود می‌آورد، وجود ندارد.

خصوصیت دیگر آنترופی که آن را برای توصیف غنی سازی اورانیوم نامناسب می‌سازد، وابستگی آن به ترکیب ماده خوراک است. رابطه (۱-۱) نشان می‌دهد که تغییر آنترופی توسط واحد جداسازی، زمانی که $N_F = 0.5$ باشد، بیشینه است و زمانی که N_F به صفر یا یک نزدیک شود، بسیار کوچک خواهد شد. بنابراین یک واحد معین در موقعیت‌های مختلف در یک آبشار، تغییرات آنترופی متفاوتی را ایجاد خواهد کرد. خصوصیات نامناسب آنترופی توسط محققانی که برای اولین بار غنی سازی اورانیوم را در اوایل دهه ۱۹۴۰ فرمول بندی کردند شناخته شده بود. آنها مفهوم کار جداسازی یا توان جداسازی^[۳a] را به عنوان یک جانشین ابداع کردند، تا کمیتی داشته باشند که بتوانند آن را به یک واحد جداسازی مستقل، در موقعیت آن در یک آبشار، نسبت دهند و تقریباً متناسب با سرعت مصرف انرژی در یک واحد می‌باشد. به جای آنترופی یک مخلوط، فرمول زیر به عنوان ارزش مخلوط تعریف می‌شود:

$$V(N) = (2N - 1) \ln\left(\frac{N}{1 - N}\right) \quad (2-1)$$

که \ln نشان دهنده لگاریتم طبیعی است و N نشان دهنده تعداد مولکول‌های ایزوتوپ مطلوب است^[۴]. این رابطه موضوع اصلی شکل (۲-۱) است. سرعت تغییر ارزش مخلوط که توسط واحد جداسازی ایجاد می‌شود، توان جداسازی (کار جداسازی در واحد زمان) یک واحد نامیده می‌شود و از رابطه زیر بدست می‌آید^[۱]:

$$\Delta V = \frac{1}{2} Fg \theta (1 - \theta) \quad (3-1)$$

این کمیت برحسب واحدهای یکسان، مانند آنچه برای جریان خوراک بکار می‌رود، اندازه گیری می‌شود، برای مثال، خوراک یک کیلوگرم اورانیوم در سال. اما معمول است که به عنوان تعداد کیلوگرم واحد کار جداسازی ($Kg SWU/yr$) در واحد زمان بیان شود، برای مثال، $Kg SWU/yr$.

فرض شود یک واحد جداسازی با بهره جداسازی 0.833 ، دارای برش یک دوم و ظرفیت فرآیند $10 Kg$ اورانیوم خوراک در ساعت باشد. چنین واحدی طبق رابطه (۳-۱) دارای سرعت $76 kg SWU/yr$ خواهد بود. مفید است که سرعت خوراک برحسب جرم اورانیوم موجود در فرآیند بیان شود تا مقادیر UF_6 یا ترکیبات و مخلوط‌های دیگر.

مفهوم کار جداسازی برای داشتن خاصیتی از یک واحد، که نسبت نزدیکی با سرعت جریان مواد و در نتیجه با مصرف انرژی دستگاهی با چندین مرحله، و غنی سازی اندک در هر مرحله، داشته باشد، ابداع شد. در واقع مفهوم کار جداسازی برای تحلیل و بهینه سازی دستگاه‌های پخش گازی^۱ ابداع شد. کمتر بودن تعداد مراحل و بیشتر بودن ضریب غنی سازی هر مرحله، باعث کم فایده شدن مفهوم کار جداسازی است.

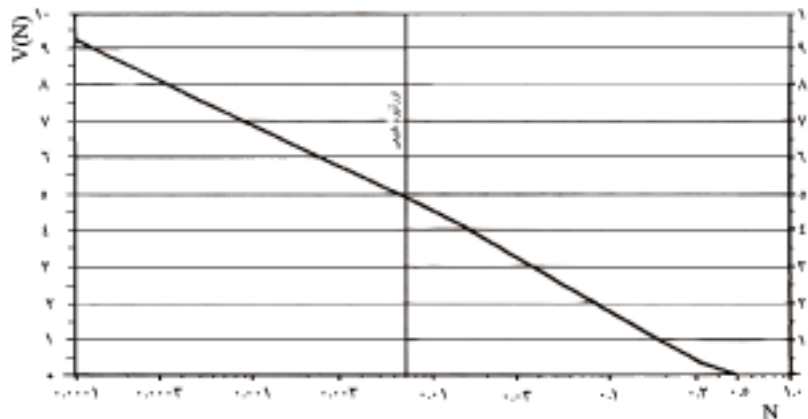
^۱ از روش‌های غنی سازی که عملکرد آن بر اساس پخش گازی است، به کمک نظریه‌های مکانیک آماری توجیه می‌شود.

برای یک فرآیند تک مرحله با ضریب غنی سازی بسیار بزرگتر از ۱، مفهوم کار جداسازی اساساً بی معنی است. فرآیندهای دیگری مانند تبادل شیمیایی^۱ وجود دارند که برای آنها نیز مفهوم کار جداسازی چندان مناسب نیست. در این فرآیندها قسمت عمده انرژی ورودی در خارج از خود آبشار مصرف می شود و در نتیجه توان جداسازی به واحدهای منفرد مربوط نمی شود. در هر حال از آنجایی که کار جداسازی دارای قدمت تاریخی معتبر در زمینه غنی سازی اورانیوم است، هنوز به طور گسترده ای به عنوان واحدی برای ظرفیت غنی سازی، با هدف مقایسه فرآیندهای مختلف، مورد استفاده قرار می گیرد. این تحقیق نیز بر همین اساس استوار است.

۳-۱-۱. نمونه ای از یک دستگاه غنی سازی

۱-۳-۱-۱-۱ ظرفیت جداسازی

مفهوم کار جداسازی می تواند برای تحلیل یک دستگاه غنی سازی کامل نیز مورد استفاده قرار گیرد. این دستگاه همانند یک جعبه سیاه بسیار بزرگتر عمل می کند (شکل (۱-۳) الف). به عنوان مثال می توان تأسیساتی را که دارای ظرفیت $1000 t SWU/yr$ واحد کار جداسازی در سال است که می تواند بر حسب تن (t) یا kg تعیین شود) در نظر گرفت. با این انتخاب، مقدار خوراک، فرآورده و پسماند مورد نیاز را می توان بررسی کرد. کار جداسازی کل با در نظر گرفتن تفاوت بین ارزش کل خروجی و ورودی محاسبه می شود. برای مثال ارزش فرآورده توسط ضرب تعداد کیلوگرم فرآورده P در تابع ارزش، که برای غنی سازی ویژه ای ارزیابی می شود، طبق رابطه زیر محاسبه می گردد:



شکل ۲-۱. نمودار رابطه (۱-۲) برای تابع ارزش. توجه شود که مقیاس عمودی در بخش N برای ^{238}U لگاریتمی است.^[۱]

^۱ از روش های غنی سازی است که عملکرد آن بر اساس روش های شیمیایی می باشد.

$$\text{Product Value} = P \times V(N_P) = \text{تابع ارزش}$$

کار جداسازی کل انجام شده توسط دستگاه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta V = P V(N_P) + W V(N_W) - F V(N_F) \quad (4-1)$$

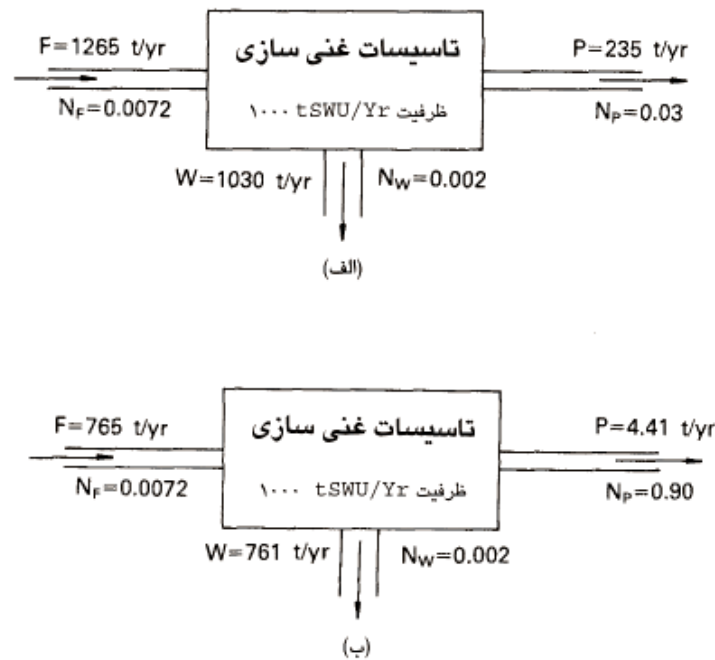
اگر فرض شود که هیچ ماده‌ای در داخل دستگاه مصرف یا گم نمی‌شود، آنگاه مقادیر کل ^{235}U و ^{238}U ، که بیرون آمده‌اند، باید با مقادیر وارد شده یکسان باشند. این حقیقت می‌تواند برای تعیین رابطه بین مقادیر فرآورده، پسماند و مقدار خوراک مورد استفاده قرار گیرد. این روابط به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{F}{P} = \frac{(N_P - N_W)}{(N_F - N_W)} \quad (5-1)$$

$$\frac{W}{P} = \frac{(N_P - N_F)}{(N_F - N_W)}$$

این روابط را می‌توان در معادله (4-1) جایگذاری کرد و رابطه زیر را به دست آورد:

$$\Delta V = P \left\{ V(N_P) + \frac{(N_P - N_F)}{(N_F - N_W)} V(N_W) + \frac{(N_P - N_W)}{(N_F - N_W)} V(N_F) \right\} \quad (6-1)$$



شکل ۱-۳. (الف) یک تاسیسات غنی سازی 1000 t SWU/yr با تولید فرآورده ۳ درصد و پسماند ۰٫۲ درصد از خوراک طبیعی. (ب) یک تاسیسات غنی سازی 1000 t SWU/yr با تولید فرآورده ۹۰ درصد فرآورده غنی شده و پسماند ۰٫۲ درصد از خوراک طبیعی. جریان خوراک، فرآورده و پسماند برحسب تن اورانیوم در سال برای هر دو تاسیسات نشان داده شده است [۱].

با استفاده از یک ترفند می‌توان تابع ارزش را ارزیابی کرد. این کار به کمک شکل (۲-۱) انجام می‌گیرد. مزیت عمده این فرمول‌ها در این است که، زمانی که ترکیبات خوراک، فرآورده و پسماند مشخص شوند، تمام سرعت‌های جریان ماده توسط ظرفیت جداسازی تعیین می‌گردند. برای مثال تصور کنید تأسیسات شکل (۳-۱) الف)) برای تولید سوخت ۳ درصد غنی شده راکتور از اورانیوم طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است و عیار پسماند ۰/۲ درصد باشد. پس می‌توان مقادیر N_F ، N_P و N_W را در رابطه (۶-۱) وارد کرد و با کمک شکل (۲-۱) نشان داد که کمیت داخل کروزه برابر با ۴۲۵ است. از این رو به 425 t SWU برای تولید هر تن فرآورده در این دستگاه مورد نیاز است. با ظرفیت کل 1000 t SWU/yr ، این دستگاه می‌تواند ۲۳۵ تن از سوخت راکتور را تولید کند. این مقدار برای تهیه نیاز سالانه هشت یا نه راکتور هسته‌ای بزرگ کافی است.^۱

به طور مشابه برای سرعت جریان فرآورده می‌توان مقادیر را در رابطه (۵-۱) وارد کرد و سرعت جریان‌های خوراک و پسماند را به ترتیب ۱۲۶۵ و 1030 t/yr به دست آورد. توجه شود که جمع جریان‌های فرآورده و پسماند، مساوی با جریان خوراک است. این نتیجه برای یک کنترل مفید بر روی محاسبات ضروری است و در شکل (۳-۱) الف)) نشان داده شده است.

۱-۱-۴ آبشارها

۱-۴-۱-۱ مراحل

حال روش‌هایی در داخل تأسیسات غنی سازی توصیف می‌شود که در آنها واحدهای جداسازی بسیاری در یک آبشارنظم پیدا کرده اند. این کار دشوار است زیرا هر فرآیند احتیاجات ویژه خود را برای یک آبشار بهینه دارد. از این رو این توصیفات اولیه باید کاملاً عمومی و خلاصه باشند. نقش آبشارها در تک تک مباحث فرآیندهای جداسازی ایزوتوپی بسیار محسوس است.

تصوری کلی از آبشار در شکل (۴-۱) توضیح داده شده است. یک آبشار آرایه‌ای از واحدهای سازمان یافته در چند مرحله را نشان می‌دهد. گفته می‌شود که واحدها داخل یک مرحله به صورت موازی متصل شده اند. یعنی تمام آنها ورودی یکسانی دریافت کرده و خروجی یکسانی نیز تولید می‌کنند، و توسط آنها مراحل دیگر تغذیه می‌شوند. با تنظیم بسیاری از واحدها به این شیوه، مقدار زیادی از ماده می‌تواند در یک مرحله مشخص فرآوری شود، حتی اگر یک واحد منفرد ظرفیت بسیار کمی داشته باشد. این مطلب بیان می‌کند که عرض آبشار یعنی تعداد واحدها در یک مرحله مشخص، متناسب با سرعت کل جریان ماده است که از میان آن مرحله عبور می‌کند.

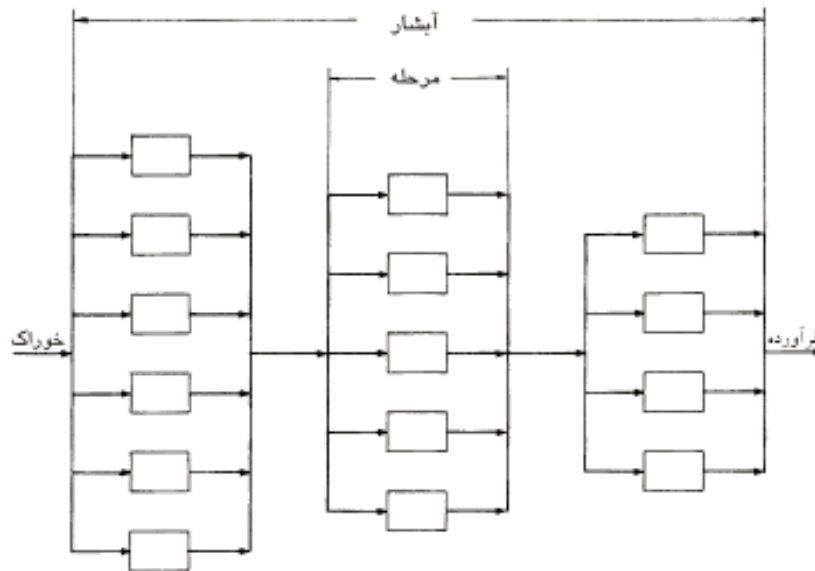
مراحل مختلف در مجموعه‌هایی به یکدیگر متصل شده اند، یعنی هر مرحله ورودی خود را از مرحله قبل دریافت کرده و خروجی خود را به مرحله بعد می‌دهد. توجه شود که عرض مراحل ثابت نیست. این مطلب

^۱ یک راکتور آبی تحت فشار $1000 \text{ MW}(e)$ نیاز به حدود ۲۷ تن سوخت ۳ درصد غنی شده در سال دارد [۴].

بیان می‌کند که مقدار ماده فرآورده شده در هر مرحله با شماره مرحله تغییر می‌کند. دلیل رخ دادن این مسئله به روشنی از بحث قبل مشهود است. در بحث قبل نشان داده شد که سرعت جریان فرآورده همیشه به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از سرعت جریان خوراک است.

شکل (۵-۱) چگونگی بازیافت دائمی ماده را در یک آبشار، برای استخراج ^{235}U ، نشان می‌دهد. اکنون هر جعبه در شکل بیانگر یک مرحله است و خروجی هر مرحله شامل دو مسیر است یکی مسیر غنی شده و دیگری مسیر تهی شده، که هر دو کسر متفاوتی از ^{235}U ورودی را به خود اختصاص داده اند. مسیر غنی شده برای تأمین بخشی از ورودی برای مرحله بعد به جلو فرستاده می‌شود.

در عین حال، جریان تهی شده به عقب فرستاده می‌شود تا به عنوان قسمتی از ورودی به مرحله پایین‌تر به کار گرفته شود. بنابراین هر مرحله در حال فرآورش مواد با غنی شدگی معینی است که قسمتی از آن به عنوان ماده غنی شده از مرحله ای پایین‌تر، و قسمتی از آن به عنوان ماده تهی شده از مرحله بالاتر، می‌آید. برای بیشتر فرآیندها جریان غنی شده و تهی شده توسط یک مرحله به جلو یا عقب فرستاده می‌شوند. چنین آبشاری، آبشار متقارن نامیده می‌شود^[۵]. در این حالت مقدار برش اندکی کمتر از یک دوم است. اما در بعضی از فرآیندها (بعنوان مثال فرآیند نازل آیرودینامیکی^۱) از برشی متفاوت و مقادیر نامتقارن غنی سازی و تهی سازی در هر دو مسیر خروجی استفاده می‌شود. در این حالت این مسیرها باید به شماره‌های متفاوتی از مراحل، به جلو یا عقب فرستاده شوند و طراحی آبشار به طور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌تر خواهد شد.



شکل ۱-۴. ترتیب قرار گرفتن واحدهای غنی سازی و مراحل در یک آبشار نشان داده شده است. توجه شود که تعداد واحدها نسبت به فرآورده نهایی آبشار کاهش می‌یابد. جریان های پسماند نشان داده نشده است^[۱].

^۱ از روش‌های غنی سازی است که عملکرد آن بر اساس روش‌های آیرودینامیکی است.

اکنون می‌توان فهمید که چرا یک آبشار باید شامل دو بخش اصلی باشد، یک بخش غنی سازی بالای نقطه‌ای که خوراک وارد می‌شود و یک بخش تهی سازی پایین نقطه‌ای که خوراک وارد می‌شود. تعداد مراحل مورد نیاز در هر بخش بطور مستقل توسط فرآورده مطلوب و عیار پسماند تعیین می‌شود و عرض مراحل در هر بخش توسط سرعت جریان‌های مواد غنی شده و تهی شده تعیین می‌گردد. این نکته قابل توجه است که عوامل اندکی برای تعیین کامل شکل یک آبشار ایده‌آل کافی است. این آبشاری است که نسبت کار جداسازی به فرآورده تولید شده را کمینه می‌کند با این اطمینان که مسیر غلظت‌های متفاوت هیچگاه با یکدیگر مخلوط نمی‌شوند.

در یک آبشار ایده آل، یک رابطه ساده بین نسبت ایزوتوپی در هر مرحله و مراحل قبلی و بعدی وجود دارد. اگر n نشان دهنده شماره مرحله و R_n فراوانی ایزوتوپی نسبی ماده ورودی به آن مرحله باشد، آنگاه:

$$R_{n+1} = \alpha R_n$$

$$R_{n-1} = \frac{1}{\alpha} R_n \quad (7-1)$$

α ضریب غنی سازی مرحله نامیده می‌شود^[7]. برای مثال بخش ۱-۱-۳ این مقدار برابر با ۵۱٫۴۹ می‌باشد.^۱ رابطه (۷-۱) می‌تواند برای تعیین نسبت ایزوتوپی در مرحله $n + 2$ مورد استفاده قرار گیرد، از این رو:

$$R_{n+2} = \alpha R_{n+1} = \alpha^2 R_n$$

و به صورت کلی رابطه به شکل زیر در می‌آید:

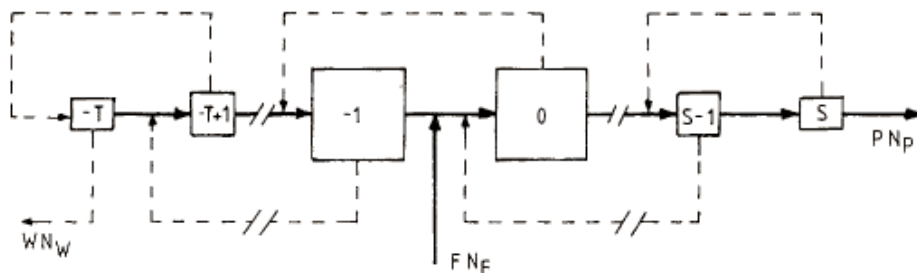
$$R_{n \pm m} = \alpha^{\pm m} R_n$$

به ویژه، اگر فرض شود خوراک به مرحله $n = 0$ وارد شود و فرآورده از مرحله S خارج شود آنگاه

$$R_P = \alpha^{S+1} R_F$$

به طور مشابه اگر مرحله آخر از بخش تهی شده شماره T باشد، داریم:

$$R_W = \alpha^{-T} R_F$$



شکل ۵-۱. جریان‌های فرآورده توسط خطوط پیوسته و جریان‌های پسماند توسط خطوط منفصل مشخص شده اند. تعداد

مراحل غنی سازی برابر $S + 1$ و تعداد مراحل تخلیه برابر T است^[8].

^۱ توجه شود که در مرجع [۷] از علامت α^* برای کمیتی که در اینجا با α نشان داده شده است، استفاده می‌شود.

با استفاده از این روابط، محاسبه تعداد کل مراحل، برابر با $S + T + 1$ می‌باشد، برای ایجاد یک آبشار ایده آل مورد نیاز است. یک بار دیگر عیار فرآورده و پسماند تعیین شده و ضریب غنی سازی را مشخص می‌کنیم:

$$S + T + 1 = \frac{\ln (R_p / R_w)}{\ln \alpha} \quad (8-1)$$

با ادامه مثال قبل، به فرض $g = 0.833$ و $\theta = 0.5$ ، آنگاه $\alpha = 1.0408$ و $\ln \alpha = 0.0400$ خواهد بود. اگر قرار باشد آبشار، فرآورده ۳ درصد را به همراه پسماند ۰/۲ درصد، تولید کند، آنگاه $R_p = 0.309$ و $R_w = 0.02$ خواهد بود. پس رابطه (۸-۱) نشان می‌دهد که ۶۸ مرحله در چنین دستگاهی مورد نیاز است. با حل معادله برای S و T بطور مستقل، می‌توان نشان داد که $(S + 1) = 36$ مرحله باید در بخش غنی سازی و $T = 32$ مرحله در بخش تهی سازی قرار گیرند.

۱-۴-۲ جریان‌های ماده

خصوصیت مهم دیگر یک آبشار مقدار ماده‌ای است که باید داخل هر مرحله پمپ شود تا سرعت معینی برای خروجی به دست آید. اگر L_n سرعت جریان ماده به داخل مرحله n ام یک آبشار ایده‌آل در نظر گرفته شود، آنگاه با تقریب بسیار خوبی در بخش غنی سازی داریم:

$$L_n = \frac{p (N_p - N_n)}{g N_n (1 - N_n)} \quad (9-1)$$

و در بخش تهی سازی داریم:

$$L_n = \frac{w (N_n - N_w)}{g N_n (1 - N_n)} \quad (10-1)$$

توجه شود که دومین رابطه (۵-۱) در بخش قبل را می‌توان با مساوی قرار دادن دو عبارت فوق برای $n = 0$ ($N_0 = N_F$) بار دیگر به دست آورد.

با مراجعه به منحنی آبشار مانند آنچه در شکل (۶-۱) نشان داده شده است، می‌توان کمیت L_n را برای تمام مقادیر n محاسبه کرد. در این نمودار بعد عمودی تعداد مراحل و بعد افقی سرعت جریان کل ماده را در هر مرحله نشان می‌دهد.

هر دو نوع آبشاری که در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته اند، برای نشان دادن مغایرت چشمگیر بین شکل‌های آنها، رسم شده اند. به هر حال باید توجه شود که شکل عمومی آبشار در هر دو حالت مشابه است و در حقیقت این شکل مشخصه‌ای برای تمام آبشارهای ایده‌آل می‌باشد. حتی این شکل به عنوان لوگوی شرکت ایرودید^۱ انتخاب شده است. ایرودید شرکتی است که مالک تأسیسات پخش گازی تریکاستین^۲ می‌باشد.

^۱Eurodif
^۲Tricastin

قابل توجه‌ترین جنبه آبشارها در شکل (۶-۱)، جریان عظیم ماده مورد نیاز در مراحل پایین‌تر است. برای تولید ۲۳۵ تن فرآورده ۳ درصد در سال (سرعت جریان فقط ۷٫۵ g/s است) باید در حدود 36000 t/yr (1.14 kg/s) به پایین‌ترین مرحله پمپ شود. توجه شود که این جریان ۲۸ برابر بزرگتر از جریان خوراک است. از این رو آخرین مرحله سهم بسیار کمی نسبت به جریان اولین مرحله دارد. بیشتر جریان شامل ماده موجود باز چرخیده از مرحله دوم است که به بالاترین مرحله بخش تهی سازی فرستاده می‌شود. تفاوت جریان حتی برای غنی سازی ۹۰ درصد بیشتر چشمگیر است، جریان در اولین مرحله بیش از ۶۰۰۰ برابر بزرگتر از سرعت جریان فرآورده است. این حجم و انرژی مورد نیاز برای حمل و پمپ این مقدار عظیم گاز است که فرآیندهای پخش گازی و آیرودینامیکی را برای اجرا بسیار بزرگ و پرهزینه می‌سازد.

صورت‌های آبشار در شکل (۶-۱) می‌تواند برای تعیین یک خصوصیت با اهمیت‌تر آبشار مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که بعد عمودی نمودار تعداد مراحل، و بعد افقی جریان را در هر مرحله اندازه گیری می‌کند، پس مساحت مقطع عرضی آبشار باید برابر با سرعت کل جریان ماده باشد که مستقیماً متناسب با توان جداسازی کل آبشار خواهد بود. این رابطه به سادگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$L_{total} = \left(\frac{\Delta V}{g}\right) \Delta V \quad (11-1)$$

که از رابطه (۶-۱) حاصل می‌شود. برای دستگاه $1000t \text{ SWU}$ در شکل (۶-۱)، جریان کل $1.15 \text{ million t/yr}$ یا 36.5 kg/s خواهد بود. در رابطه (۱۱-۱) می‌توان مشاهده کرد که سرعت جریان کل نسبت به مقدار g بسیار حساس است. اگر g در این مثال از 0.833 به 0.05 ، که مشخصه فرآیند پخش گازی است، کاهش یابد، آنگاه جریان کل توسط ضربی تقریباً به اندازه ۲۸۰ به 320 million t/yr در یک دستگاه 1000 t SWU/yr افزایش می‌یابد. در چنین دستگاهی جریان کل ماده بیش از یک میلیون مرتبه بیشتر از سرعت تولید است. از طرف دیگر یک دستگاه سانتریفوژ با $g = 0.5$ تنها نیاز به جریان کل 32000 t/yr دارد. این عامل ۱۰۰۰۰ در کاهش جریان، باعث شده است که روش سانتریفوژ بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

یک نتیجه نهایی جالب رابطه (۱۱-۱) این است که سطح زیر دو نمودار آبشار نشان داده شده در شکل (۶-۱) باید برابر باشد. به طور کلی هردو آبشار ایده‌آلی که مقدار کار جداسازی یکسانی انجام می‌دهند، تا زمانی که از واحدهایی با ضریب جداسازی یکسان استفاده می‌کنند، جریان کل یکسانی خواهند داشت. از این رو بازآرایی آبشار از پیکربندی غنی سازی پایین به پیکربندی غنی سازی بالا، نباید منجر به هزینه‌های انرژی بالاتر باشد.

۱-۴-۳ زمان تعادل

معمولاً یک آبشار با پر کردن تمام مراحل توسط ماده‌ای که ترکیب ایزوتوپی اولیه یکسانی دارد، شروع به کار می‌کند. سپس با بستن شیرهای استخراج فرآورده، پمپ‌ها شروع به کار می‌کنند. هنگامی که ماده در