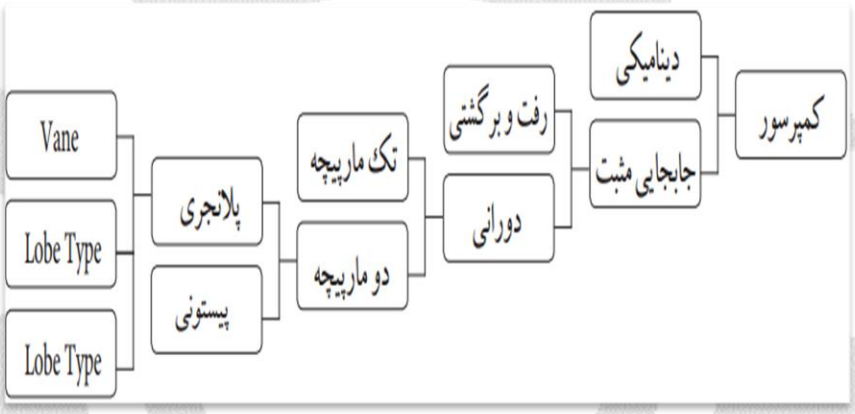
## ۱– مقدمه

کمپرسور تجهیزی است برای بالا بردن فشار سیالات تراکم‌پذیر به‌منظور انتقال از نقطه‌ای به نقطه دیگر، غلبه بر اصطکاک مسیر و یا رساندن فشار به میزان مورد انتظار در هر فرایند. در صنعت نفت و گاز، از کمپرسور برای انتقال گاز (تأمین فشار لازم جهت جریان گاز و افت‌های مسیر)، تأمین فشار مخازن ذخیره تحت فشار، تزریق گاز به میدان‌های نفتی به منظور بالا بردن ضریب بهره‌وری، بالا بردن سرعت واکنش‌ها در فرایندهای شیمیایی، تصفیه گاز و تأمین هوای مورد نیاز برای تجهیزات ابزار دقیق استفاده می‌شود. با توجه به گستردگی کمپرسورهای موجود، شناخت درست و انتخاب صحیح یک کمپرسور ضمن تأمین شرایط فرایندی مورد انتظار، باعث کاهش هزینه خرید و کاهش در هزینه تعمیرات و نگهداری آن می‌شود.کمپرسورها قادرند طیف وسیعی از گازها، از هیدروژن با وزن مولکولی ۲ تا گازهایی با وزن مولکولی ۴۰۰ را متراکم کنند.

کمپرسورها براساس مکانیزم اعمال انرژی به گاز، به دو گروه عمده کمپرسورهای جابجایی مثبت و دینامیکی تقسیم می‌شوند. هم‌چنین می‌توان کمپرسورها را بر مبنای جریان ورودی به‌صورت زیرطبقه‌بندی کرد:



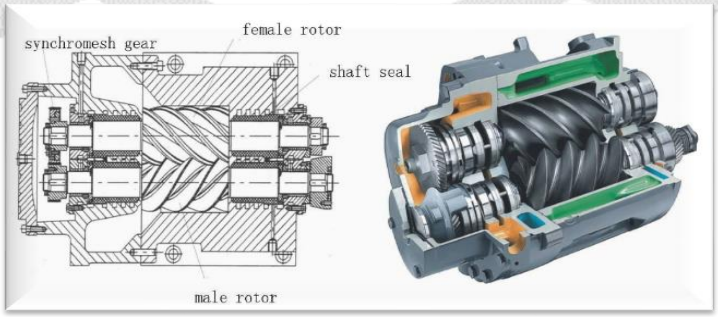

شکل ۱ – انواع کمپرسورها

علاوه‌بر نوع جریان، طراحان بر اساس محدوده‌های خاصی که از نظر نسبت تراکم و شدت جریان گاز در مراجع وجود دارد، نوع خاصی از کمپرسور را برای هدف مورد نظر انتخاب می‌کنند. کمپرسورهای مورد استفاده در صنایع مختلف باید در شرایط کاری تعریف شده عملکرد بهینه‌ای داشته باشند. با توجه به این‌که عملکرد مفید یک کمپرسور تنها در بازه‌ی محدودی است و همچنین تحت تأثیر عوامل دیگری نیز قرار دارد، کنترل عملکرد آن فرایند پیچیده‌ای است. در جریان‌های جرمی بالا، رسیدن سرعت سیال به سرعت صوت و پدیده چوک از جمله عوامل محدودیت است. حال آنکه در جریان‌های جرمی پایین، وجود دو نوع ناپایداری سبب محدود شدن ناحیه‌ی عملکرد کمپرسور می‌شود. پایداری در کمپرسورها به معنی توانایی کمپرسور در غلبه بر اغتشاشاتی است که ممکن است پیرامون نقطه‌ی عملکرد آن پدید آید. این اغتشاشات ممکن است به صورت اغتشاش گذرا، در نقطه‌ی عملکرد باشد. در این صورت، سیستم در دو حالت پایدار خواهد ماند: در حالت نخست کمپرسور پایدار است، اگر به نقطه‌ی عملکرد اولیه‌ی خود بازگردد و در حالت دوم، سیستم پایدار است، اگر از حالت تعادل اولیه به حالت تعادل دیگری برسد. برای نمونه، در نیروگاه‌های

گازی که در آن‌ها اتاق احتراق و توربین به کمپرسور متصل است، حالت نخست هنگامی اتفاق می‌افتد که اجزای جفت شده سبب ایجاد تغییری گذرا در جریان جرمی عبوری شوند. حالت دوم هنگامی روی می‌دهد که سرعت یا بار گرفته شده از توربین گاز تغییر کند. بنابراین، به‌طور کلی، عملکرد پایدار یک سیستم تراکمی به دو عامل بستگی دارد: یکی منحنی مشخصه‌ی سیستم تراکمی و دیگری منحنی مشخصه‌ی وسایل و سیستم‌های پایین‌دستی جفت شده با آن. همان‌طورکه پیش از این نیز گفته شد، عملکرد پایدار یک کمپرسور محوری و یا گریز از مرکز در سرعت‌های بالا و پایین محدود است، زیرا اجزای کمپرسور در این سرعت‌ها، سبب خفگی و ایجاد شوک در آن می‌شوند. از طرف دیگر، با کاهش جریان عبوری از کمپرسور، ناپایداری‌هایی در جریان مانند پدیده‌ی سرج در کمپرسورهای سانتریفیوژی روی می‌دهد.

## ۲- کمپرسورهای پیچشی

کمپرسورهای پیچشی از نوع کمپرسورهای جابجایی مثبت بوده و افزایش فشار در آن‌ها از طریق کاهش حجم صورت می‌گیرد. عملکرد کمپرسورهای پیچشی با فشارِ مکش اتمسفریک از حدود ۳بار(تک مرحله) تا حدود ۱۷بار(چند مرحله) بوده و شدت جریان ورودی به آن از ۸۵۰ تا ۶۰۰۰۰ متر مکعب در ساعت است. این کمپرسورها از لحاظ محدوده‌ی کاربرد مابین کمپرسورهای رفت و برگشتی و سانتریفیوژ قرار دارند و دارای قیمت کم‌تری نسبت به آن دو در یک محدوده عملکردی می‌باشند. راندمان این کمپرسورها در محدوده ۷۵ تا ۸۵ درصد قرار دارد. این کمپرسورها می‌توانند گازهای دارای پلیمر و قیر را فشرده کنند که در این شرایط، راندمان بالاتری نسبت به گاز خالص دارند. از کمپرسور پیچشی برای فشرده کردن گاز در یک فرایند، انتقال نیرو، غلبه بر اصطکاک در خطوط انتقال گاز، ثابت نگه داشتن گاز در سیستم‌هایی که احتمال نشتی در آن‌ها وجود دارد و... استفاده می‌شود. در این دسته از کمپرسورها به‌وسیله محبوس کردن گاز ورودی و کاهش حجم آن توسط یک عضو متراکم‌کننده، فشار گاز افزایش می‌یابد. عمل تراکم گاز در کمپرسورهای رفت و برگشتی به وسیله پیستون انجام می‌شود، درحالی‌که درکمپرسورهای پیچشی، مارپیچه‌ای به نام نر این وظیفه را بر عهده دارد. کار مارپیچه نر در کمپرسورهای پیچشی دقیقاً مانند وظیفه پیستون در کمپرسورهای رفت و برگشتی است.




شکل ۲- کمپرسور پیچشی

در کمپرسورهای رفت و برگشتی، ظرفِ حاوی گاز، سیلندراست درصورتی‌که در کمپرسورهای پیچشی، ظرف حاوی گاز، مارپیچه‌ای است به‌نام ماده .گاز، ابتدا بر روی مارپیچه ماده قرار می‌گیرد و سپس با شروع به کار کمپرسور، حرکت از طریق یک موتور الکتریکی و یا توربین به مارپیچه نر منتقل شده و با چرخش آن، مارپیچه ماده نیز به چرخش درمی‌آید. برآمدگی‌های روی مارپیچه نر به تناوب درون مارپیچه ماده حرکت کرده و به‌تدریج حجم گاز محبوس شده موجود در شیارها کاهش می‌یابد. این کاهش حجم، سبب افزایش فشار گاز می‌شود. تراکم گاز تا زمانی‌که گاز طول مارپیچه را طی کند، ادامه یافته و از طریق مجرای خروجی، گاز متراکم شده خارج می‌شود. هرکدام از شیارهای مارپیچه‌ی ماده به‌ترتیب به مجرای خروجی می‌رسند و گاز فشرده شده را درون مجرای خروجی تخلیه کرده و مجدداً از هوای کم‌فشار پُر می‌شوند و این سیکل به تناوب تکرار می‌گردد. در شکل-۳ دو مارپیچه نر و ماده نشان داده شده است. مارپیچهی نر، ضخیمتر است و متصل به موتور محرک می‌باشد. مارپیچه‌ی ماده، مارپیچه‌ی نازکتر بوده و با نیروی مارپیچه‌ی نر حرکت می‌کند.

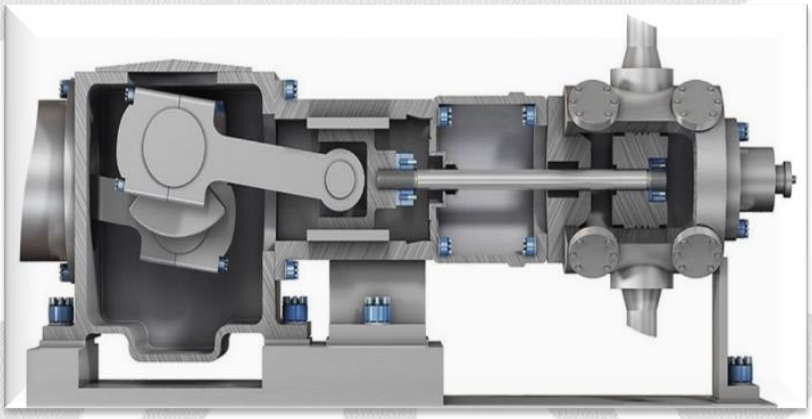
شکل ۳ – دو مارپیچه نر و ماده

## ۳- کمپرسور رفت و برگشتی

کمپرسورهای رفت و برگشتی از نوع کمپرسورهای جابجایی مثبت هستند که در آن‌ها تراکم گاز در سیلندر و از طریق رفت و برگشت پیستون انجام می‌گیرد (شکل۴). کمپرسورهای رفت و برگشتی از جمله قدیمی‌ترین کمپرسورها بوده و در میان کمپرسورهای کوچک و متوسط جایگاه ویژه‌ای دارند. در این گروه از کمپرسورها، تراکم گاز توسط کاهش حجم صورت می‌گیرد. کمپرسور رفت و برگشتی، از نظر تعداد مورد استفاده در صنعت نفت، نسبت به انواع دیگر کمپرسورها در رتبه نخست قرار دارد. این کمپرسورها برای تمام فشارها از خلا تا حدود ۶۵۰۰ بار مناسب هستند و نیز برای مقادیر جریان از ۸۸ مترمکعب بر ساعت تا ۱۷۰۰۰متر مکعب بر ساعت به ازای هر سیلندر طراحی و ساخته می‌شوند. بازده‌ی این نوع کمپرسور بین ۸۰ تا ۹۰ درصد است و برای نسبت‌های تراکم بالاتر از۵، بیشترین بازده‌ی را نسبت به دیگر انواع کمپرسور دارد. علی رغم مزایای زیاد، این کمپرسورها از محدودیت‌هایی نیز برخوردار می‌باشند؛ درصورت استفاده از کمپرسورهای رفت و برگشتی برای سرویس با جریان پیوسته با حجم

زیاد، معمولاً بیش از یک کمپرسور نیاز خواهد بود. کمپرسورهای رفت و برگشتی غالباً بزرگ و گران‌بها هستند و هزینه تعمیرات و نگهداری آن‌ها بالاست. این کمپرسورها برای جابه‌جایی گازهای دارای ذرات جامد، ذرات ساینده و خورنده، به علت احتمال نفوذ ذرات به فضای بین سیلندر و پیستون، دارای محدودیت می‌باشند. همچنین، با توجه به نیروهای لرزشی بالا، کمپرسورهای رفت و برگشتی نیاز به فوندانسیون‌های بزرگی دارند.

در این گروه از کمپرسورها، رفت و برگشت پیستون، عمل تراکم را انجام می‌دهد. در این حالت، موتور، تنها در نصف دوره تحت بار قرار دارد و در نیمه بعدی، بدون بار کار می‌کند. این روش کارکرد می‌تواند مشکلاتی برای موتور ایجاد کند و راندمان را درکل پایین بیاورد. برای حل این مشکل عمل تراکم باید هم در مسیر رفت و هم در مسیر برگشت انجام گیرد.



شکل ۴ – نمایی برش خورده از کمپرسور رفت و برگشتی

روش معمول برای این کار استفاده از دو پیستون در دو جهت مختلف است، به این دسته از کمپرسورها، Double Acting می‌گویند. روش کار کمپرسورهای Double Acting به این صورت است که هنگامی‌که یک پیستون در حال تراکم است، پیستون دیگر در حال مکش بوده و برعکس.

شکل ۵ - کمپرسور چند مرحله‌ای (double Acting)

کمپرسورهای چند مرحله‌ای یا Double Acting در بین کمپرسورهای رفت و برگشتی دارای بالاترین بازدهی و قیمت بوده و انواع مختلفی از این کمپرسورها با توان‌های مختلف ساخته شده است. در صورتی‌که فشار مورد نیاز برای گاز خروجی بالا باشد، استفاده از یک مرحله تراکم ممکن نیست. راه حل پیشنهادی دراین مورد، استفاده از دو یا چند کمپرسور پشت سر هم است به‌طوری که خروجی متراکم شده در هر کمپرسور وارد کمپرسور بعدی شود. این روش، معمول بوده و کاربردی است اما به دلیل هزینه بالای کمپرسور، طراحان ترجیح می‌دهند تا جایی‌که ممکن است، مراحل تراکم را در تعداد کم‌تری کمپرسور قرار دهند. به‌طور مثال، زمانی‌که نیاز به دو کمپرسور برای انجام دو مرحله تراکم است، دو مرحله را در یک کمپرسور قرار داده و به این ترتیب، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه ساخت کمپرسور صورت می‌گیرد. باید توجه داشت که در اثر اِعمال فشار به گاز، دمای آن بالا رفته و درصورتی‌که همین گاز، بدون تغییر(کاهش) دما وارد مرحله بعدی شود، راندمان کاری کمپرسور بسیار کاهش یافته و علاوه‌بر این، می‌تواند مشکلات دیگری را نیز در کمپرسور ایجاد نماید. به همین دلیل لازم است بعد از هر مرحله تراکم و قبل از مرحله‌بعد، دمای گاز به نحوی کاهش یابد. استفاده از خنک کننده‌های هوایی و مبدل برای این کار مرسوم بوده و بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. گاز متراکم شده در هر مرحله با خنک شدن در این دستگاه‌ها قابلیت تراکم تا فشارهای بالاتر را نیز پیدا خواهد کرد. کمپرسورهای پیستونی در فشارهای و وزنهای مولکولی متغیر به راحتی کار می‌کنند اما نیاز به تعمیرات بیشتر و زیرساخت‌های بزرگ و پُرهزینه، استفاده از این ماشین‌ها را محدود می‌کند. این کمپرسورها قادرند فشارهای بالا را با مقدار جریان اندک تأمین کنند. بنابراین، کاربرد اصلی این کمپرسورها برای ایجاد فشارهای خیلی بالاست. مکش گاز و تخلیه گاز متراکم شده از طریق شیرهای تخلیه و اصطکاک‌های ایجاد شده از جمله عوامل موثر در کاهش بازدهی در این نوع کمپرسورها می‌باشد. یکی دیگر از عوامل پایین بودن بازده این کمپرسورها، کوچک بودن اندازه آن‌هاست. در کمپرسورهای کوچک‌تر، نسبت بیشتری از انرژی ورودی به کمپرسور، صرف اصطکاک ایجاد شده در آن می‌شود. به‌طور کلی، این نوع کمپرسورها قابل استفاده برای انواع سیستم‌های تبرید بوده که یکی از دلایل عمده آن، قابلیت کار این نوع از کمپرسورها در فشارهای متوسط و بالاست. کمپرسورهای چند مرحله‌ای کاربرد بیشتری نسبت به کمپرسورهای یک مرحله‌ای دارند. بحث ایجاد حرارت در اثر تراکم، از اهمیت خاصی برخوردار است که برای رساندن بازدهی کمپرسور به حد قابل قبول، باید به آن توجه کافی شود.

## ۴- کمپرسور سانتریفیوژی

کمپرسور سانتریفیوژ از نوع کمپرسورهای دینامیکی است و در آن، انتقال انرژی از طریق مجموعه‌ای از پره‌های دوار به‌صورت ترکیبی از فشار و سرعت درآمده و تبدیل بیشتر سرعت به فشار، بعد از خروج پره‌های پروانه در جزء ثابت موسوم به دیفیوزر انجام می‌پذیرد. کمپرسورهای سانتریفیوژ از نظر تعداد مورد استفاده در صنایع، پس از کمپرسورهای رفت و برگشتی در ردیف دوم هستند و راندمان آن‌ها بین ۶۸ تا ۷۶ درصد قرار دارد. محدوده ظرفیت آن‌ها ۱۷۰۰ تا ۳۴۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت و فشارهای خروجی ۰/۷تا ۷۰۰بار می‌باشد. حد پایین فشار به نوع تک‌مرحله یا دمنده و حد بالای فشار به کمپرسورهای تقویت‌کننده و یا

چند مرحله‌ای منسوب می‌شود. امکان آلودگی گاز با روغن در آن‌ها وجود نداشته و هزینه تعمیرات و هزینه اولیه برای شرایط عملیاتی مشابه، پایین‌تر از نوع رفت و برگشتی است.

شکل ۶ – کمپرسور سانتریفیوژ

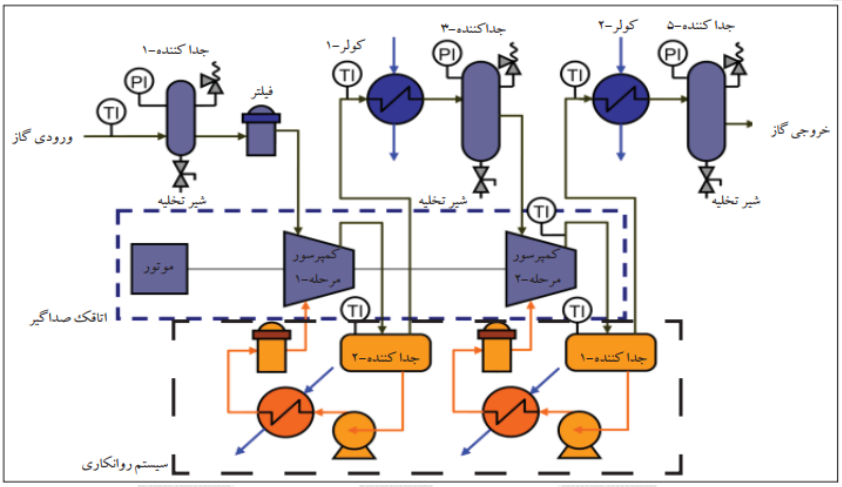
این کمپرسورها نیاز به فوندانسیون سنگین ندارند و به مدت سه سال یا بیشتر می‌توانند به طور دائم کار کنند. درتوربین‌های گازی مدرن که برمبنای چرخه برایتون کار می‌کنند، از کمپرسور سانتریفیوژ استفاده می‌شود. در موتور خودروهای دیزل و برخی خودروهای سواری از کمپرسور سانتریفیوژ به‌عنوان توربوشارژر و سوپرشارژر استفاده می‌گردد. برای انتقال گاز در خطوط لوله و انتقال آن از محل تولید به محل مصرف، کمپرسورهای سانتریفیوژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این موارد، کمپرسورها یک یا چندمرحله‌ای هستند و به وسیله توربین‌های گاز بزرگ به حرکت درمی‌آیند. ضخامت پوسته این کمپرسورها به علت الزامات موجود در استانداردهای API و یا ASME زیاد است که این مسأله ایمنی تجهیزات در کارکرد را تضمین می‌کند. پروانه این کمپرسورها مانند پروانه‌ی اکثر پمپ‌ها پوشیده است و برای راه‌اندازی آن‌ها معمولاً به توان چندین هزار اسب‌بخار نیاز است. داشتن مشخصات واقعی گاز برای طراحی، تست و تحلیل عملکرد این کمپرسورها ضروری است.

درمجتمع‌های‌پتروشیمی، پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های فرایندی گاز طبیعی، از کمپرسورهای سانتریفیوژ چند مرحله‌ای استفاده می‌شود که تمامی طبقات آن بر روی یک محور قرار دارند. این کمپرسورها دارای محفظه بشکه‌ای و یا افقی هستند.

در میدان‌های نفتی، برای بالا بردن ضریب بهره‌روی برای تزریق مجدد گاز، از کمپرسورهای سانتریفیوژ استفاده می‌شود. برای این منظور نیز از کمپرسورهای چند مرحله‌ای، تک محوره استفاده می‌گردد. به علت این‌که فشار خروجی این کمپرسورها به ۷۰۰ بار می‌رسد ، لازم است تا آن‌ها دارای محفظه‌ای بشکه‌ای شکل باشند.

## ۵- مسیر گاز در کمپرسور دو مرحله‌ای

در شکل-۹ تصویر شماتیک از فرایند فشرده شدن گاز در یک کمپرسور پیچشی دو مرحله‌ای از نوع Oil-Flooded به همراه مسیرهای خنک‌کاری، روغن‌کاری و برخی از سیستم‌های کنترلی نشان داده شده است.




شکل ۷ - نمایی از مراحل گردش گاز در یک کمپرسور دو مرحله‌ای

در این کمپرسور ابتدا گاز به جداکننده-۱که به‌عنوان مخزن آب‌گیر عمل می‌کند، وارد می‌شود. در مواردی که سیال فرایندی هوا باشد، به‌جای مخزن آب‌گیر از خشک‌کن استفاده می‌شود. در ورودی کمپرسورها برای جدا کردن آلودگی‌های احتمالی، چند عدد فیلتر تعبیه می‌شود. در کمپرسورهای چند مرحله‌ای به‌علت این‌که گاز خروجی از مرحله اول حاوی مقداری روغن است، گاز خروجی از مرحله اول ابتدا وارد کولر- ۱شده و پس از آن وارد جداکننده-۲ می‌شود. گاز سرد شده حاوی مقداری میعانات است. بنابراین، در مرحله بعد وارد جداکننده-۳ می‌شود تا میعانات همراه آن کاهش یابد. این گاز برای فشرده شدن بیشتر وارد مرحله دوم کمپرسور شده و پس از آن، برای جدا شدن روغن همراه، وارد جداکننده-۴و سپس کولر-۲ می‌شود. برای جداسازی میعانات ناشی ازسرد شدن، گاز از جداکننده-۵ نیز عبور داده شده و سپس به سمت خطوط لوله هدایت می‌شود. باید توجه داشت در مواردی که کمپرسور از نوع خشک باشد، گاز خروجی از هر مرحله مستقیماً وارد کولر بعد از خود می‌شود.

### ۵-۱- اتاقک صداگیر

به علت سر و صدای زیاد کمپرسورها، به‌ویژه کمپرسورهای پیچشی، در هنگام کارکرد و ایجاد آلودگی صوتی، کمپرسور در یک اتاقک صداگیر نصب می‌شود.

### ۵-۲- شیرهای هواگیری و تخلیه میعانات

در مخازن جداسازی که برای جداسازی میعانات در نظر گرفته می‌شود، شیرهای تخلیه تعبیه می‌شود.

### ۵-۳- سیستم روانکاری

اصطکاک ایجاد شده در برخورد اجزا متحرک و ثابت از جمله در یاتاقان‌ها سبب فرسودگی اجزا و گرم شدن آن‌ها می‌شود. در کمپرسورهای، Oil-Flooded روغن روان‌کاری اغلب از سیستم روغنی که به محفظه کمپرسور تزریق می‌شود، تغذیه می‌گردد. در این سیستم، روغن از مخزن حاوی آن که در واقع جداکننده گاز و روغن است، به کولر روغن پمپ می‌شود تا دمای آن تا حد مناسبی سرد شود. سپس، برای تمیزی و رفع آلودگی‌های احتمالی، وارد فیلتر شده و پس از آن، به قسمت‌هایی که باید روغن‌کاری شود، فرستاده می‌شود. در برخی موارد، برای آب‌بندی نیز از روغن استفاده می‌شود. در این‌گونه موارد لازم است برای روغن، آب‌بندی سیستمی مشابه با سیستم روغن روانکاری در نظر گرفته شود.

### ۵-۴- سیستم خنک‌کاری

در هر کمپرسور از جمله کمپرسورهای رفت و برگشتی، برای سرد کردن گاز یا روغن، سیستم خنک‌کاری تعبیه می‌شود. برای این منظور، مسیرهایی برای خنک کننده مورد نیاز در کولرهای خنک کننده گاز و روغن در نظر گرفته می‌شود. به‌علاوه در کمپرسورهای رفت و برگشتی، بر اثر فشرده شدن گاز در داخل سیلندر، دمای سیلندر و پیستون بالا می‌رود و برای خنک کردن آن‌ها نیز اغلب از آب خنک کاری استفاده می‌شود. اجزا متحرک در داخل سرسیلندر و محفظه میل‌لنگ به دلیل وجود اصطکاک گرم می‌شوند. در نتیجه، برای خنک کردن آن‌ها نیز مسیرِ آب خنک کننده‌ی جدایی در نظر گرفته می‌شود.

### ۵-۵- سیستم کنترلی

تجهیزات کنترلی یکی از بخش‌های اساسی در هر کمپرسور است که کنترل کارکرد صحیح آن را به‌عهده دارند. برخی از این اجزا فقط نشانگرهایی هستند که مقدار متغیر موردنظر مانند دما، فشار و شدت جریان را نشان می‌دهد. برخی دیگر از این اجزا، ابزارهای کنترلی هستند که علاوه‌بر نشان دادن متغیر مورد نظر، کنترل آن را نیز انجام می‌دهند.

**در نهایت سه نوع از کمپرسورهای پرکاربرد صنعت نفت در جدول زیر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.**

| نوع کمپرسور | محدوده فشار خروجی (bar) | محدوده شدت جریان $(\frac{m^3}{hr})$ | قیمت | محدوده راندمان (درصد) | رتبه براساس میزان کاربری در صنعت نفت |
|---|---|---|---|---|---|
| رفت و برگشتی | ۰ - ۶۵۰۰ | ۸۸ - ۱۷۰۰۰ | گران بها | ۸۰-۹۰ | اول |
| سانتریفیوژ | ۰/۷ - ۷۰۰ | ۱۷۰۰ - ۳۴۰۰۰۰ | متوسط | ۶۸-۷۸ | دوم |
| پیچشی | ۳ - ۱۷ | ۸۵۰ - ۶۰۰۰۰ | ارزان‌تر | ۷۵-۸۵ | سوم |

جدول شماره ۱- مقایسه انواع کمپرسور

## منابع

[1] J. T. Gravdahl, O. Egeland, "compressor surge and rotating stall modeling and control", springer 1999.

[2] F. k. moor, E. M. Greitzer, "Athory of post – stall transients in a axial compressor system, part 1-development of Equation", journal of Engineering for gas turbine and power 108, 68-76.

[3] F. willems, W. P. M.heemels, B. d. Jager, A. Stoorvogel, "Positive feedback stabilization of centrifugal compressor surge", Journal of engineering 2001.

[4] The Design of Ultra-High-Speed Miniature Centrifugal Compressors /Mick V. Casey-PCA Engineers Ltd, England ITSM, University of Stuttgart, Germany

[5] J. T. Gravdahl, O. Egeland, S. O. Vatland, "Drive torque actuation surge control of centrifugal compressor", Journal of engineering 2002.

**گردآورنده:** عرفان سیفی - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان