



انتخاب اندازه‌ی مناسب برای سیستم‌های پمپاژ

کاهش هزینه‌های چرخه عمر از طریق انتخاب درست
سیستم پمپ و لوله‌کشی با الزامات عملکرد واقعی

نوشته‌ی: David A. Sellers, PE
برگردان: مهندس محمدرضا رزاقی اصفهانی

هرگز نمی‌توانم گفته‌های لس را فراموش کنم. او یک پیمانکار کهنه‌کار بود که در آغاز زندگی شغلی‌ام مرا زیر بال و پر خود گرفت. یک روز هنگامی که من و لس با خودرو به سوی یکی از سایت‌های کاری در حرکت بودیم و من به‌طور مداوم درباره اهمیت هماهنگی مناسب بازدهی طراحی با الزامات عملکرد واقعی یا «انتخاب درست اندازه‌های سیستم» صحبت می‌کردم، لس به من گفت: «هرگز برای این که از سیستم بیش از حد بزرگ استفاده کرده‌ام علیه من شکایتی نشده است.»

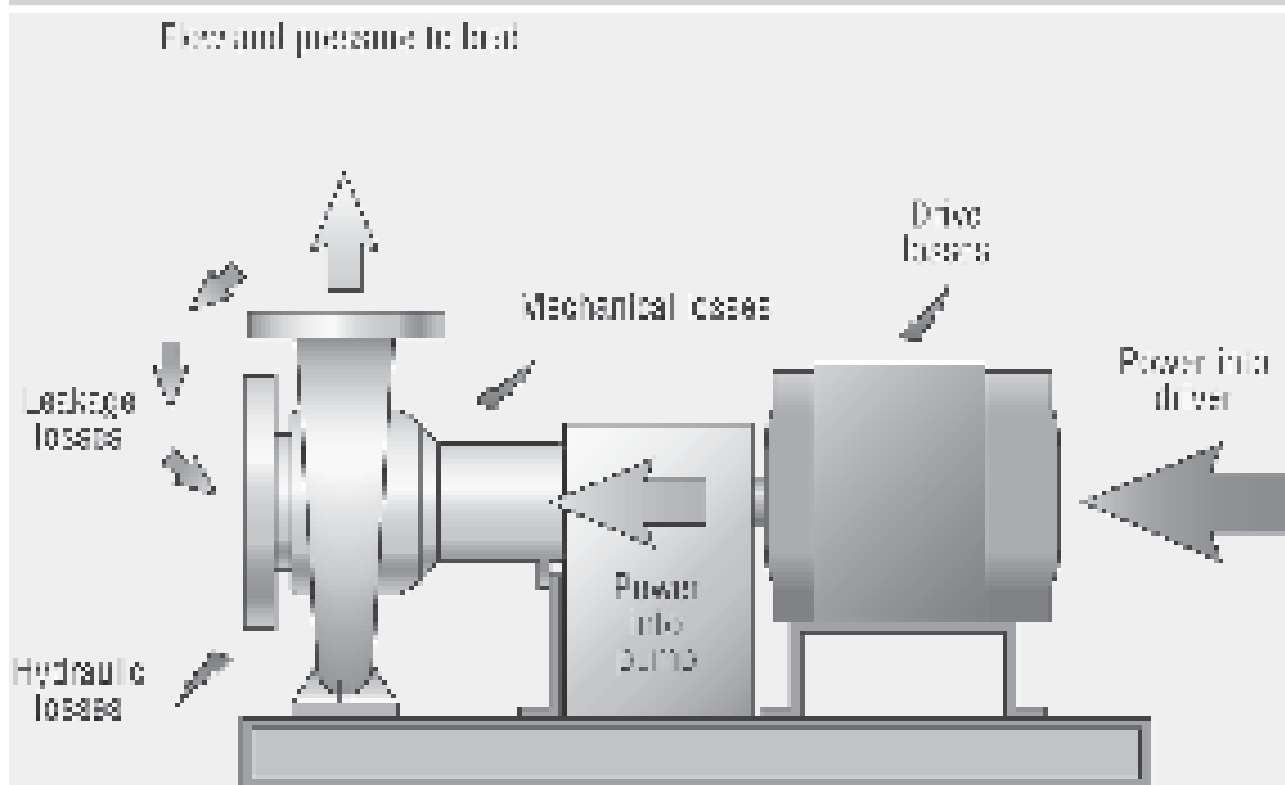
که به واسطه مشکلات موجود در ساخت تجهیزات رخ می‌دهند، توانایی طراحان اصلی را برای پاسخگویی به نیازهای طراحی تحت تاثیر قرار ندهد. خود من معمولاً از ضریب اطمینان ۱۰ درصد استفاده می‌کنم. به یاد داشته باشید که مهر و امضای شما در زیر مدارک خواهد بود، بنابراین عددی با توجه به تجارب و قضاوت خود درباره اشتباهاتی که در بین طراحی تا ساخت رخ می‌دهد، (که نتایج آن پس از استفاده طولانی مدت در سیستم ظاهر می‌شود) انتخاب نمایید.

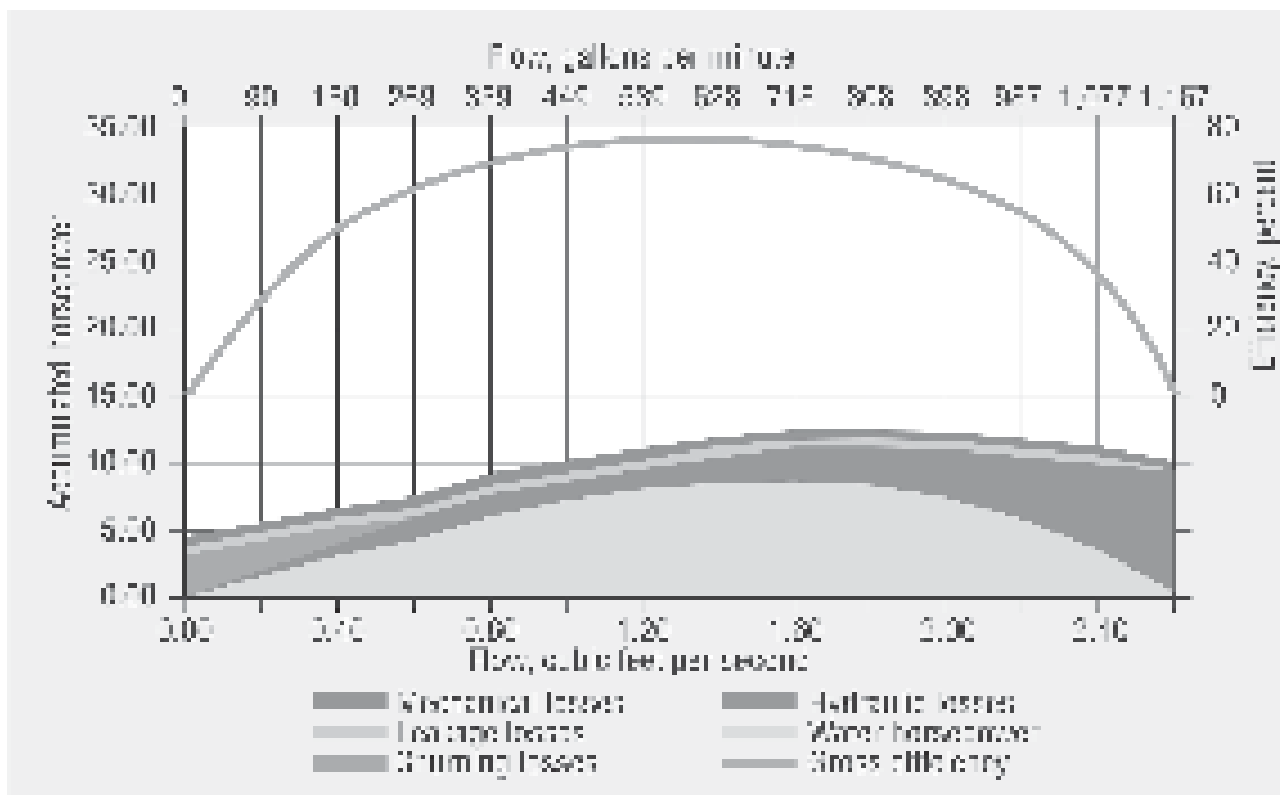
- در هنگام طراحی محدودیت‌های فیزیکی و دیگر فاکتورهایی که در ارتباط با نصب تجهیزات می‌باشد را در نظر بگیرید، تا احتمال وقوع «پیشامدهای غیرمنتظره» به حداقل برسد.
 - در فرآیند ساخت شرکت نموده و آن را کنترل کنید تا «پیشامدهای غیر منتظره» را پیشاپیش مشخص نمایید.
 - تجهیزات را مطابق با شرایطی که نصب شده است تنظیم نموده و راه‌اندازی نمایید تا سیستم تا حد ممکن نزدیک به بیشترین حد بازدهی عمل نماید.
 - کادر عملیاتی مالک را آموزش دهید تا درک کنند چگونه باید بازدهی بهینه سیستم را هنگامی که سیستم کهنه می‌شود و مقدار بارها تغییر می‌کند، حفظ نمایند.
- اهداف خود را به‌وضوح در اسناد قرارداد ذکر نمایید و به یاد داشته باشید که این مساله موضوع بسیار مهمی است. حتی ماهرترین تکنسین‌های فنی نیز به راهنمایی نیاز دارند. شاید چیزی بیش از بیان اهداف که معمولاً

لس به نکته مهمی اشاره کرد: به اندازه کافی بزرگ نبودن هیچ جایی در این حرفه ندارد، زیرا اگر یک تجهیز از اندازه مطلوب کوچک‌تر باشد، می‌تواند باعث جرایم نقدی شده و هرگونه صرفه‌جویی انجام شده در هزینه اولیه را از بین ببرد. اما در حالی که باید ایمنی را رعایت نمود، باید به این نکته نیز توجه داشت که تجهیزاتی که از اندازه مطلوب بزرگ‌تر باشد، بازدهی کمتری داشته و به واسطه عواملی مانند خفانش (throttling)، سیکل‌های کوتاه‌مدت و پدیده‌های دیگر، در معرض خرابی زودرس قرار خواهد گرفت. اما جای خوشحالی دارد که بدانید می‌توانید مانند آب خوردن با پیروی از نکته‌های زیر یک سیستم را طراحی و نصب نمایید:

- الزامات بار را به خوبی درک کنید (حتا الزاماتی که فراتر از الزامات طراحی می‌باشند). در کنار این الزامات به نیازهای فوری و بلند مدت ساکنین ساختمان و استفاده‌کنندگان سیستم HVAC توجه داشته باشید. با مالک مجموعه ارتباط برقرار کنید.
- طراحی را مطابق با الزامات واقعی سیستم در شرایط ظرفیت اوج، افزونگی و در حالت کاهش بار انجام دهید. در حین طراحی، مالک را نیز در جریان امور قرار دهید.
- پمپ‌ها را به گونه‌ای انتخاب نموده و آرایش کنید که در بیشتر اوقات با بیشترین بازدهی کار کنند. این نکته را به خاطر بسپارید که بسیاری از سیستم‌ها بیشتر اوقات در شرایطی متفاوت با شرایط طراحی کار می‌کنند.
- یک ضریب اطمینان در نظر بگیرید، تا «پیشامدهای غیر منتظره»

شکل (۱) افت‌های بازدهی پمپ





شکل (۲) تغییرات افت بازدهی یک پمپ سانتریفیوژ در سرعت ثابت

به صورت نمودار است، مورد نیاز باشد.

و مواد به کار رفته در ساخت به مشخصه‌های این پارامترها میدان عملکردی را به خوبی تعریف می‌نماید.

انتخاب پمپ

بازدهی پمپ تحت تاثیر چندین نوع اتلافات مختلف قرار دارد. (شکل ۱) برخی از این اتلافها ثابت هستند، اما برخی دیگر با میزان جریان تغییر می‌کنند (شکل ۲) که در نتیجه به نقطه‌ای می‌رسیم که بازدهی ناخالص بیشترین مقدار خود را داراست. این نقطه به هندسه و آرایش فیزیکی هر یک از پمپها بستگی دارد. در شرایط ایده آل، پمپهایی را مورد استفاده قرار می‌دهیم که همیشه در «بهترین وضعیت» خود کار می‌کنند. اما در دنیای واقعی، اگر بتوانیم از یک تولیدکننده، پمپی دریافت نماییم که بازدهی آن به الزامات مورد نظر ما نزدیک باشد، بسیار خوشبخت خواهیم بود. حتی خوشبخت‌تر خواهیم بود اگر بتوانیم راهی پیدا کنیم تا بتوانیم عملکرد پمپ را در نقطه بیشترین بازدهی آن و یا نزدیک به آن نقطه حفظ نماییم. البته مهندسی کاربرد را برای بهینه‌سازی انتخاب پمپها دارند. یک راه این است که پمپ مطلوب را مشخص نموده و مشخصه‌های آن را به قدری دقیق ذکر نماییم که پمپهای دیگر را شامل نشود. در صنعتی که رقابت بر سر ارائه بهترین پیشنهادات وجود دارد، این کار غیر قابل قبول تلقی می‌شود. روش دیگر، بیان نمودن مشخصات پمپ به صورت پارامترهای اساسی می‌باشد. این پارامترها عبارتند از جریان، هد، حداکثر توان ترمز، حداقل بازدهی پمپاژ، حداقل ضریب توان موتور و حداکثر سرعت موتور. اضافه کردن الزامات مربوط به نگهداشت

بهینه‌سازی سیستم توزیع

انتخاب پمپ تنها بخشی از معادله تعدیل سیستم می‌باشد. سیستم توزیع نیز با مطرح شدن طراحی و کاربرد اتصالات نقش مهمی پیدا می‌کند. شکل (۳) افت فشار را در یک زانویی نشان می‌دهد. مقاومت مربوط به سیالی که از روی دیواره لوله گذر می‌کند، مستقیماً با افزایش طول پیش افزایش می‌یابد. اما با افزایش شعاع نسبی، افت‌های دینامیکی مربوط به تغییر جهت به صورت رادیکالی کاهش می‌یابد و پس از آن افزایش پیدا کرده و به مقادیر بالاتر می‌رسد. در نتیجه مقاومت کل هنگامی بهینه است که شعاع نسبی زانویی (شعاع زانویی نسبت به قطر لوله) در حدود ۱/۵ تا ۵ باشد. در دنیای واقعی این بدین معناست که زانویی با شعاع زیاد و شعاع نسبی ۱/۵، افت فشاری بسیار کمتر از یک زانویی استاندارد با شعاع نسبی ۱ دارد. همیشه چنین صرفه‌جویی‌هایی در افت فشار (که مستقیماً به معنای صرفه‌جویی در انرژی است) را می‌توان با هزینه‌های اولیه پایینی به دست آورد. تفاوت‌های جزئی در به کارگیری اتصالات می‌تواند اثر فوق‌العاده‌ای بر افت فشار داشته باشد. به عنوان مثال اتصالات نشان داده شده در شکل (۴)، هر دو جریان را به صورت مساوی در دو جهت تقسیم می‌کنند. اتصال بالایی جریان را از پایه می‌گیرد، در حالی که اتصال پایینی جریان را از شاخه دریافت می‌کند. تفاوت در چیست؟ در نرخ جریان

یکسان، افت فشار در اتصال پایینی به شش برابر این مقدار در اتصال بالایی می‌رسد.

هماهنگ کردن عملکرد طراحی با الزامات واقعی بار

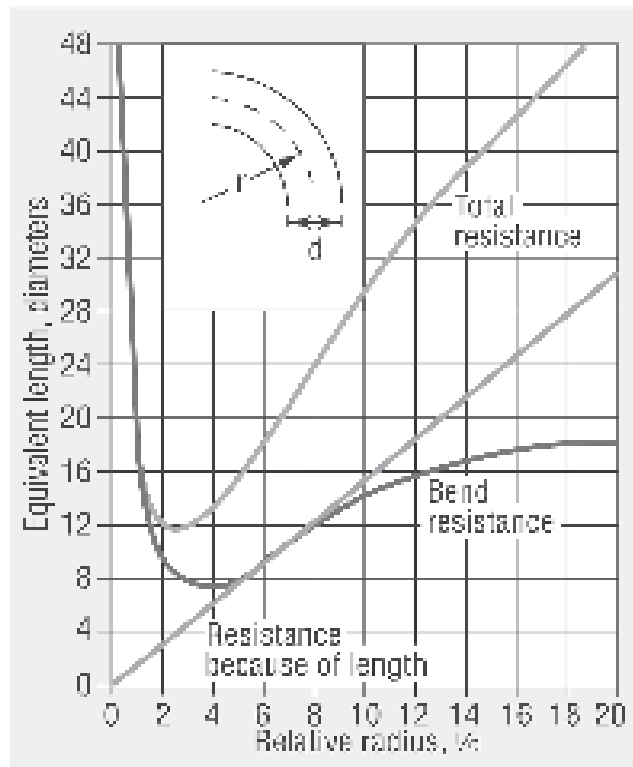
هنگامی که برای اولین بار سعی داشتیم در یک محیط عملی طراحی، سیستم را با اندازه مناسب انتخاب نمایم، خود را سردرگم یافتیم. برای بهینه‌سازی انتخاب پمپ باید ابتدا بارها و سیستم توزیع بهینه‌سازی می‌شد، که هیچ یک از این دو بدون پیشرفت بیشتر فرآیند طراحی امکان‌پذیر نبود. علاوه بر این، از طرف دیگر بخش‌های طراحی نیز تحت فشار بودم تا اطلاعات مورد نیاز آن‌ها را در اختیارشان قرار دهم، در حالی که این اطلاعات به داده‌هایی وابسته بودند که هنوز تایید نشده بود. در نهایت، روشی آموختم که می‌توان با استفاده از آن در عرض چند دقیقه هد پمپ را تخمین زد. مطابق با آنچه تاکنون تجربه کرده‌ام، این تخمین‌ها بین ۱۰ تا ۱۵ درصد با الزامات نهایی تفاوت دارند. علاوه بر طراحی، این روش برای رفع ایرادها و ارزیابی سیستم موجود کارایی دارد. شکل (۵ و ۶) نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از این سیستم برای ارزیابی قابلیت بالقوه صرفه‌جویی در مصرف انرژی در یک سیستم ذخیره یخ استفاده نمود. این روش بدین ترتیب اجرا می‌شود:

- ترسیم دیاگرام یک سیستم با تمامی اجزا و تجهیزات هیدرولیکی آن. صرف نظر از روشی که برای تخمین پمپ در نظر گرفته شده است، این کار قدم اول در طراحی یا رفع اشکالات یک فرآیند است.

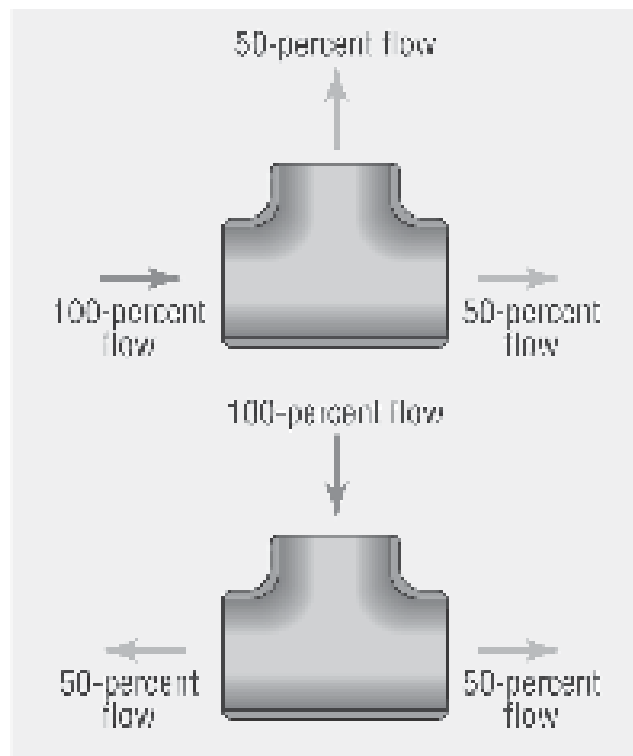
- تخمین زدن افت هد در جریان طراحی برای هر جزء اصلی (مجموعه لوله‌ها، کویل‌ها، شیرهای کنترلی و غیره). این تخمین‌ها می‌تواند براساس تجربه‌های گذشته، نقشه‌های ساخت و یا اطلاعات کاتالوگ‌ها یا یک تخمین ساده باشد. من معمولاً به جای یک عدد، یک بازه را تخمین می‌زنم، به ویژه اگر بخواهم رفع ایراد نموده و یا سیستم را ارزیابی کنم.

- ارزیابی اتلاف‌ها در سیستم لوله‌کشی مستقیم هم‌ارز با آن (براساس آرایش فیزیکی اجزا در ساختمان). داده‌های انجمن مهندسی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع (ASHRAE) و هم چنین تجارب موجود نشان می‌دهد که برای بیشتر پروژه‌های تجاری، طول هم‌ارز لوله‌کشی مستقیم، یک و نیم تا دو برابر طول لوله‌کشی می‌باشد. من این روش تخمینی را برای سیستم ذخیره یخ موجود مورد استفاده قرار دادم. بنابراین طول هم‌ارز برای لوله‌کشی با طول ۳۶ فوت در مخزن یخ، در کمترین حالت $(1/5 \times 36)$ ۵۴ و در بیشترین حالت (2×36) ۷۲ می‌باشد. هنگامی که طول لوله‌کشی مستقیم هم‌ارز سیستم به‌دست آمد، افت فشار را می‌توان از طریق نرخ اصطکاک مربوط به جریان طراحی در اندازه‌ای که برای لوله پیش‌بینی شده و یا از طریق یک حد نوعی طراحی بدون در نظر گرفتن اندازه لوله، به‌عنوان مثال 4ftwc در هر 100ft لوله به‌دست آورد.

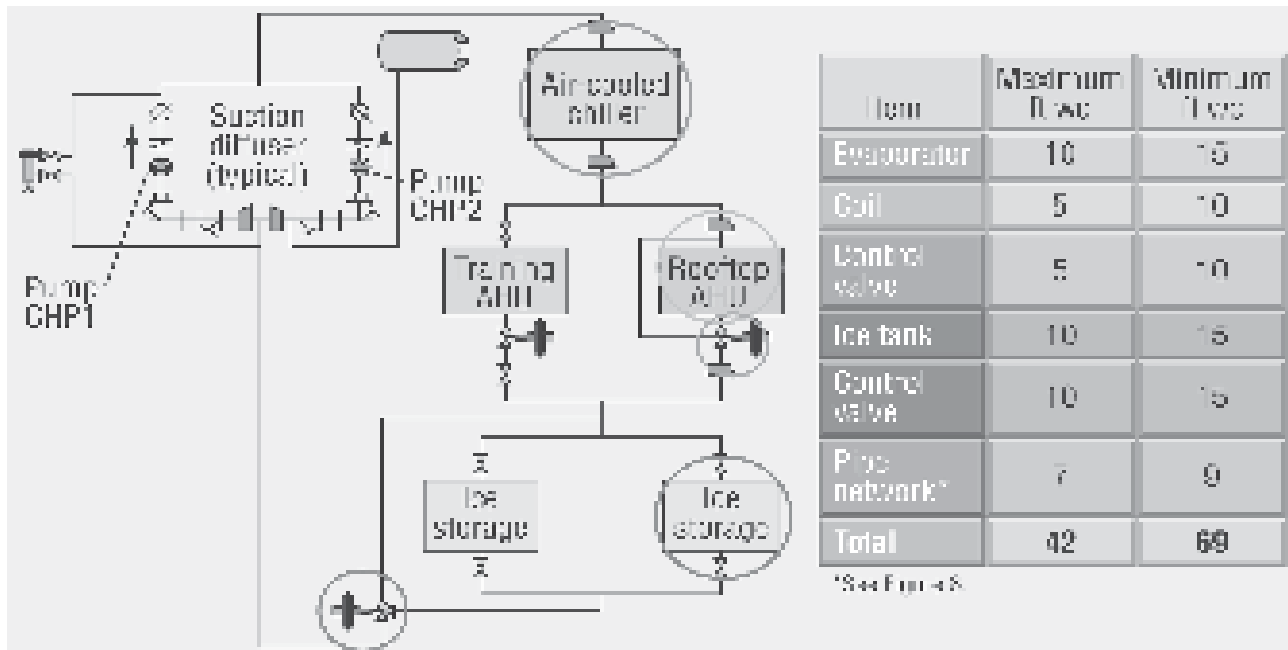
- هماهنگ نمودن الزامات سیستم با نیازهای بلندمدت پیش‌بینی شده برای آن. به‌عنوان مثال یک سیستم بسته که به صورت مطلوب نگهداری شده باشد، از یک سیستم باز که هوا به‌طور مداوم در آن جریان دارد، دیرتر خورده می‌شود (عکس‌های A و B). در صورتی که سیستم بزرگ باشد و بتوان از آن برای چندین سال استفاده نمود، داشتن کمی آزادی در انتخاب ظرفیت و اندازه موتور می‌تواند مطلوب باشد. هیچ دلیلی



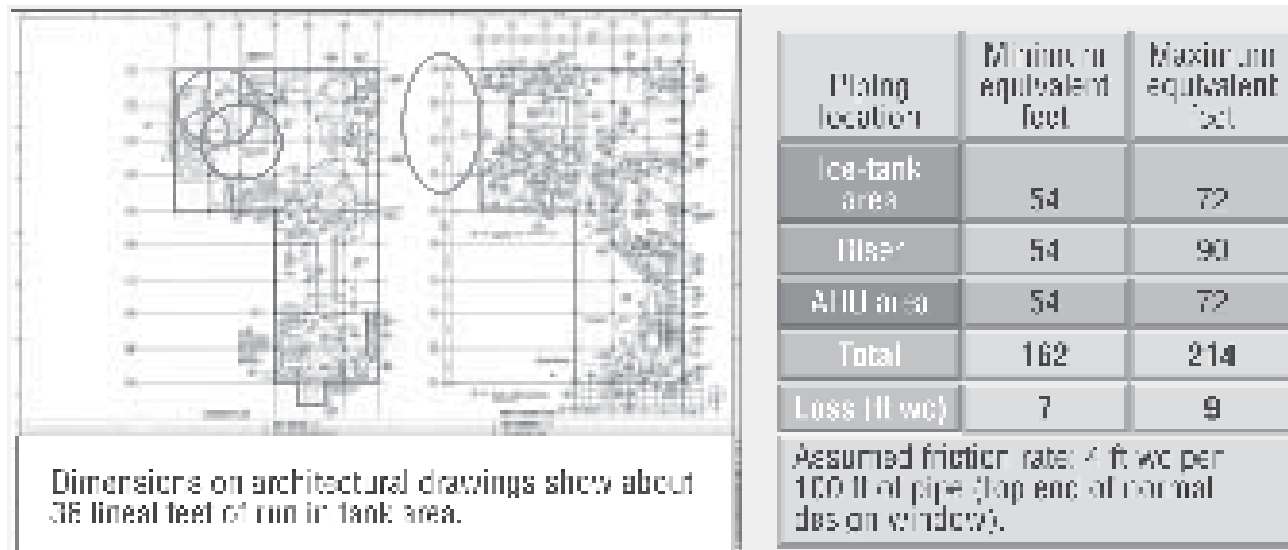
شکل (۳) نمودار افت فشار زانویی نسبت به شعاع آن



شکل (۴) تقسیم جریان با استفاده از یک سه‌راهی



شکل (۵) تخمین الزامات هد پمپ از اطلاعات اولیه طراحی



شکل (۶) تخمین طول هم ارز لوله با استفاده از اطلاعات اولیه

می تواند بیشترین مقدار، کمترین مقدار و یا مقداری میانگین داشته باشد. این مقدار به این بستگی دارد که شما تا چه حد مطمئن هستید. همچنین می توان تخمین ها را به صورت بازه کوچک تری اصلاح نمود.

اثرات از دست دادن هدف

برای سیستم ذخیره یخ، هدف طراحی همان طور که در برجسب مشخصات پمپ و در اسناد قرار داد ذکر شده بود، عددی برابر با 110ftwc بوده است. سیستم به گونه ای طراحی شده بود که هر دو پمپ کار می کردند

وجود ندارد که زیاده از حد مته به خشخاش بگذاریم. من این گونه نتیجه گیری کردم که هد پمپ مورد نیاز برای سیستم ذخیره یخ پس از نصب باید بین 42ftwc تا 69ftwc (شکل ۵) باشد. برای ارزیابی سیستم، این امکان وجود داشت که این بازه را با مشخصات پمپ و داده های طراحی ساختمان مقایسه نمود و با توجه به قابلیت بالقوه صرفه جویی در مصرف انرژی، یک تصمیم گیری صحیح انجام داد. در طراحی، هد پمپی که برای برداشتن گام های اول انتخاب پمپ و اندازه موتور مورد استفاده قرار می گیرد،

بودم).

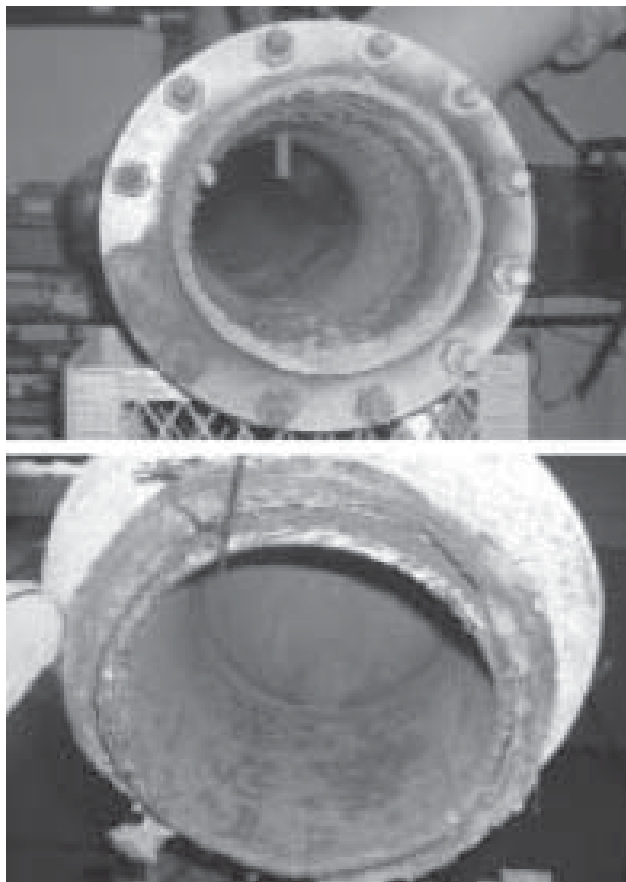
خفانش به پمپ این اجازه را داد تا هنگامی که تقریباً با بیشترین بازدهی عمل می‌کرد، با مصرف انرژی کمی کمتر از 5bhp جریان طراحی را ایجاد نماید.

● برش پروانه‌ها این امکان را ایجاد نمود تا پمپ با مصرف انرژی کمی بیشتر از 25 bhp جریان طراحی را ایجاد نماید (با وجود این که پمپ در وضعیتی کار می‌کرده که بازدهی آن پایین‌تر از حداکثر بازدهی آن بوده است، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی محسوب می‌شود) استفاده از یک محرک با فرکانس متغیر (VFD) این امکان را می‌دهد تا پمپ با سرعت کمتری کار کرده و ظرفیت مورد نیاز را با توان ورودی کمتری تولید نماید. همچنین این کار باعث می‌شود پمپ در وضعیتی عمل کند که بازدهی آن بیشینه بوده و یا به آن نزدیک باشد. با وجود این، این کار باعث پیچیدگی سیستم و افزایش هزینه خواهد شد و افت بازدهی خود را خواهد داشت که عددی بین ۸ تا ۱۲ درصد، با توجه به کاهش سرعت مورد نیاز خواهد بود.

نتیجه گیری

آزمایش پمپ نشان داد که سیستم ذخیره یخ می‌تواند از طریق برش یک پروانه موثرتر (و افزونه‌تر) باشد (روشی ساده و مقرون به صرفه) همچنین این آزمایش نشان داد که پمپ موجود به درستی انتخاب نشده بود. با توجه به این که با یک سیستم نصب شده روبرو هستیم، می‌توان دید پمپی که در 58ftwc با ظرفیت 106gpm کار کند، انتخاب بهتری بوده است. این انتخاب هزینه اولیه را کاهش داده و هزینه‌های مربوط به کارکرد بلند مدت سیستم را بهینه می‌کند. خوشبختانه ابعاد کوچک پمپ خسارات اولیه ناشی از عدم هماهنگی را کاهش داد و اثرات بلند مدت را کم نمود.

متأسفانه شواهد نشان می‌دهد، که سیستم‌های زیادی وجود دارند که ناهماهنگی قابل توجهی بین ظرفیت پمپاژ سیستم و الزامات عملکردی واقعی آن‌ها دیده می‌شود. در یکی از پروژه‌های اخیر دیده شد در صورت انتخاب هر یک از پمپ‌ها با اندازه صحیح از ابتدا، 50hp در انرژی صرفه‌جویی می‌شد. علاوه بر این که انتخاب صحیح پمپ‌ها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد، پمپ‌هایی که هماهنگ با الزامات عملکردی واقعی انتخاب می‌شوند، ۶ تا ۸ درصد بازدهی بیشتری خواهند داشت. البته باید گفت این دو پمپ، پمپ‌های اوپراتور می‌باشند که در یک سیستم بسته کار می‌کنند و دو پمپ دیگر، پمپ‌های کندانسور هستند که در یک سیستم باز عمل می‌نمایند. در پمپ‌های کندانسور، هد اضافی باعث می‌شود پمپ پس از مدت طولانی و بروز خوردگی قابلیت خود را حفظ نماید. با وجود این، از سوی دیگر هماهنگ نمودن این پمپ‌ها با الزامات موجود می‌تواند باعث صرفه‌جویی در انرژی شود، که این مساله خود بر این کار صحت می‌گذارد. آموزش و مستندسازی به کادر عملیاتی کمک می‌کند تا هنگامی که کهنه شدن سیستم باعث نیاز به افزایش هد سیستم می‌شود، بتوانند به‌طور صحیح تصمیم‌گیری نمایند. در مورد پمپ‌های اوپراتور، هد اضافی می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی و هزینه اولیه شود. جدول (۱) پیامدهای چندگانه‌ی ناهماهنگی را به صورت هزینه اولیه و هزینه عملکردی

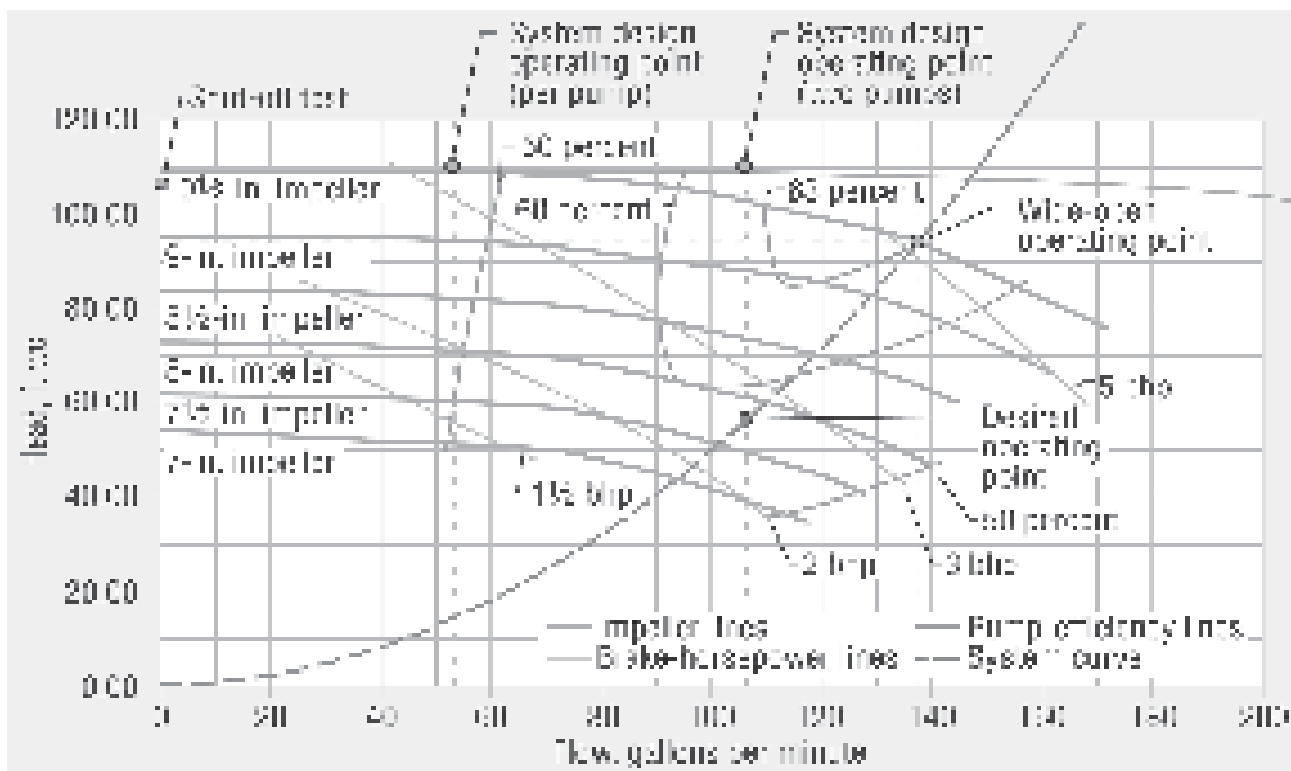


عکس‌های A و B - هر دوی این لوله‌ها به یک اندازه مورد استفاده قرار گرفته، در یک سرما ساز به کار گرفته شده و ساعات کاری آن‌ها تقریباً یکسان است. لوله‌ای که در سمت پایین قرار گرفته لوله آب کندانسور بوده (سیستم باز) و لوله‌ای که در سمت بالا قرار دارد خط لوله آب سرد (سیستم بسته) است. هر دو لوله تحت یک برنامه تصفیه آب توسط یک پیمانکار قابل و تحت نظارت یک کارفرمای دانا تهیه شده‌اند.

و خروجی هر یک در 110ftwc، برابر 53gpm (به‌طور کلی 106gpm) بود. بنابراین ارزیابی من این بود که می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمود. علاوه بر این معتقد بودم الزامات هر پمپاژ نیز باید به گونه‌ای دیگر باشد. من در وضعیتی بودم که در آن یک سیستم نصب شده را ارزیابی می‌کردم، ولی طراح اطلاعات و زمان بیشتری برای طراحی داشت (احتمالاً). برای این که بدانم حق با چه کسی است، پمپ را مورد آزمایش قرار دادم که نتایج این آزمایش در شکل (۷) ارائه شده است. بحث با جزئیات کامل پیرامون نتایج این آزمایش در این مقاله لازم نیست، اما می‌توان به نکته‌های مهم آن اشاره کرد:

● یک پمپ، هنگامی که به‌صورت کاملاً آزاد (بدون خفانش) کار می‌کرد، با مصرف انرژی کمی بیشتر از 5bhp، ۱۳۰ درصد ظرفیت مورد نیاز را تولید نمود.

● این امکان وجود داشت که بتوان جریان طراحی را با هد پمپی برابر با ۵۷ تا ۵۸ftwc ایجاد کرد (تقریباً نقطه میانی بازه‌ای که من انتخاب کرده



شکل (۷) نتایج آزمون پمپ برای سیستم ذخیره یخ

جدول (۱) هنگامی که تعیین اندازه‌ی مناسب سیستم در نظر گرفته نشود فرصت نیز از دست می‌رود

	Original	Revised	Savings
First-cost savings			
Motor size	125	75	50
Nominal amperage	155	86	69
Motor efficiency	90 percent	90 percent	N/A
Nominal kw	104	62	41
Motor cost	\$4,025	\$2,060	\$1,965
Wiring cost	\$5,050	\$4,600	\$450
Total	\$9,075	\$7,660	\$1,425
Annual operating-cost savings			
Hours of operation	3,000	3,000	N/A
Annual kwh	510,933	186,500	324,433
Electric rate \$ per kwh	\$0.1300	\$0.1300	\$0.1300
Annual operating cost	\$66,423	\$24,245	\$42,178

متعادل کننده باید افت فشار را در سیستم به گونه‌ای افزایش دهد که پمپ به نقطه عملکردی طراحی خود برسد.

۶) در نقطه عملکردی طراحی، پمپ‌ها دارای بازدهی ۸۱ تا ۸۲ درصد می‌باشند. برش یک پروانه باعث می‌شود تا جریان طراحی به جای توان 108bhp تا توان 50bhp تامین شود، درحالی‌که بازدهی ۷۰ تا ۷۲ درصد خواهد بود.

سالانه برای یکی از پمپ‌ها نشان می‌دهد. درک آنچه که قبلاً اتفاق افتاده است همیشه ساده است. برای من به‌عنوان یک پیمانکار نسبتاً ساده است که بگویم یک پمپ از کجا باید انتخاب شود. زیرا با یک سیستم نصب شده سر و کار دارم و هیچ فشاری به‌واسطه زمان محدود طراحی و بودجه محدود بر من وارد نیست. اما نگرانی برای نسل‌های آینده مرا بر این وا می‌دارد که بگویم باید بهتر عمل کنیم. تجربه من در زمینه بهینه‌سازی ماشین‌آلات و سیستم‌ها می‌گوید که به‌راحتی می‌توانیم این کار را انجام دهیم.

نکته‌های قابل توجه

۱) برای اطلاعات بیشتر راجع به این نوع مشخصات به کتاب «مشخص نمودن پمپ‌ها که در شماره نوامبر 2003 HPAC Engineering انتشار یافته، مراجعه نمایید.

۲) هرچه شعاع زانویی بیشتر باشد، محیط دایره آن بیشتر خواهد شد و در نتیجه مسیر جریان بلندتر می‌شود.

۳) برای این‌که بدانید آرایش اتصالات چگونه بر بازدهی سیستم و هزینه‌های اولیه اثر می‌گذارد، به سایت اینترنتی www.energydesignresources.com/resource/25 مراجعه کنید.

۴) در این روش اتصالات با لوله مستقیمی جایگزین می‌شوند که همان افت فشار را ایجاد می‌نماید. این عدد با طول واقعی لوله مستقیم جمع می‌شود تا افت هد کل مدار لوله‌کشی مورد ارزیابی قرارگیرد.

۵) وجود شیر خفانش شده در خروجی پمپ بدین دلیل است که