

سورة الفجر



صرفه‌جویی و مدیریت انرژی در سیستم‌های الکتریکی

اعضاء گروه مؤلف:

حسین بهرامی

محمد علی شفیع‌زاده

محمود رضا قهارپور

غلامرضا کبریایی طبری

کیان نجف‌زاده

صرفه‌جویی و مدیریت انرژی در سیستم‌های الکتریکی / تدوین و تألیف گروه مؤلفان سازمان بهره‌وری انرژی ایران «سایا» - تهران: سازمان بهره‌وری انرژی ایران «سایا»، ۱۳۸۳.
۳۷۷ ص: مصور، جدول، نمودار

ISBN ۹۶۴-۶۵۵۳-۱۵-X

فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیبا.

کتابنامه: ص: [۳۷۵] - ۳۷۷.

۱. برق نیرو - استفاده بهینه. ۲. برق نیرو - مصرف. ۳. برق - سیستم‌ها - مدیریت. الف. سازمان بهره‌وری انرژی ایران

۴ ص: TK1۰۰۱

۶۲۲/۳۱

۸۳-۲۶۶۶۷

کتابخانه ملی ایران

صرفه‌جویی و مدیریت انرژی در سیستم‌های الکتریکی

ناشر: وزارت نیرو - سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سایا)

تألیف و تدوین: حسین بهرامی، محمدعلی شقیع‌زاده، محمودرضا قهارپور،

غلامرضا کبریایی طبری، کیان نجف‌زاده

تایپ و صفحه‌آرایی: لیلا سهرابی

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: طیف نگار

نوبت چاپ: دوم - پانز ۸۸ (با تجدید نظر و اصلاح)

تیراژ: ۲۰۰۰ جلد

شابک: ISBN: ۹۶۴-۶۵۵۳-۱۵-X / ۹۶۴-۶۵۵۳-۱۵-X

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

پیشگفتار

انرژی الکتریکی یکی از حامل‌های بار ارزش انرژی بوده و از آن برای به حرکت در آوردن بارهای مکانیکی، تولید روشنایی، گرما و تولید حامل‌های بار ارزش دیگر مانند هوای فشرده استفاده می‌شود. از مزایای این حامل انرژی می‌توان به پاکیزه بودن و انتقال آسان آن اشاره نمود.

اگر این حامل انرژی را در یک زنجیره‌ای از تولید تا مصرف نهایی در نظر بگیریم در گذر از هر مرحله از این زنجیره، خواه ناخواه تلفاتی از این انرژی را خواهیم داشت. به‌طور کلی تبدیل انرژی فسیلی به انرژی الکتریکی، در نیروگاه‌ها با یک راندمان خاص که با توجه به نوع فناوری نیروگاه متفاوت است، صورت می‌گیرد و در کنار تولید انرژی الکتریکی، حجم قابل توجهی از آلاینده‌های هوا نیز منتشر می‌شود.

در سیستم انتقال و توزیع نیز بدلیل مقاومت خطوط و مبدل‌ها همواره تلفاتی را خواهیم داشت. در مصرف کننده نهایی هم در اثر یک راندمان تبدیل دوباره بخشی از انرژی تلف شده و بقیه به انرژی مفید تبدیل می‌شود. بنابراین در این زنجیره قسمت قابل توجهی از حامل انرژی اولیه (انرژی فسیلی) و نیز بخشی از حامل انرژی ثانویه (انرژی الکتریکی) تلف می‌گردد.

بنابراین صرفه‌جویی یک واحد انرژی الکتریکی در مصرف‌کنندگان نهایی علاوه بر صرفه‌جویی انرژی مفید، حذف تلفات در نقاط مختلف این زنجیره را نیز برای آن واحد انرژی به دنبال خواهد داشت.

از طرف دیگر کاهش این تلفات به منزله کاهش اثرات مخرب زیست محیطی روی هوا، آب و خاک است. اگر از دیدگاه مدیریت سمت تقاضا، به مسئله بنگریم اعمال مدیریت صحیح در مصرف این انرژی می‌تواند از سیر فزاینده سرمایه‌گذاری در بخش نیروگاهی جهت احداث نیروگاه‌های جدید و در بخش پالایش جهت احداث پالایشگاه‌ها برای خوراک دهی به بخش نیروگاهی بکاهد.

افزایش قیمت انرژی الکتریکی عرضه شده از سوی شرکت‌های برق منطقه‌ای نیز یکی دیگر از عواملی است که انگیزه در جهت صرفه‌جویی انرژی الکتریکی را افزایش می‌دهد.

مرجع حاضر جامع‌ترین مرجعی است که در ارتباط با روش‌های کاهش مصرف و هزینه انرژی الکتریکی تهیه گردیده است.

در این مرجع به تفصیل، پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در مصرف‌کنندگان نهایی مانند الکتروموتورها، کمپرسورها، فن‌ها و پمپ‌ها، کوره‌های القایی، روشنایی، سیستم‌های تهویه مطبوع معرفی گردیده و روش‌های مختلف کاهش هزینه و کنترل تقاضای توان، آمیخته با تجربیات حاصل از انجام چندین ممیزی در صنایع مختلف توسط گروه مؤلف ارائه گردیده است.

در کنار مسائل مربوط به صرفه‌جویی انرژی به مطالب جدیدی مانند پارامترهای انرژی الکتریکی و کیفیت توان که هم اکنون در کشور، زمینه‌های مطالعاتی بسیاری یافته نیز پرداخته شده است که این مفاهیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

گروه مؤلف این کتاب هر چند زحمت زیادی در تهیه آن متحمل شده‌اند لیکن بر این عقیده هستند که ذهن بیدار و منتقد خواننده حتماً به کاستی‌هایی در متن برخورد خواهد نمود. نظر به اینکه تنها اهداف ملی و رشد شکوفایی صنایع و زمینه‌سازی برای بهره‌وری بیشتر از سرمایه‌ها و ذخایر ارزشمند کشور در تهیه این مرجع مد نظر بوده، از خوانندگان محترمی که این گروه را در رفع کاستی‌ها و شناسایی خلأهای متن حاضر و بهبود کیفی و کمی آن یاری دهند کمال سپاسگزاری را به عمل می‌آورند.

گروه مؤلف

فهرست مطالب

فصل ۱: روش‌های مدیریت و صرفه‌جویی انرژی الکتریکی

۱	۱- ضرورت مدیریت انرژی الکتریکی
۱-۱	۱-۱- مقدمه
۱	۱-۲- شناخت امکانات و محدودیت‌های بار و انرژی الکتریکی
۳	۱-۳- ضرورت مدیریت مصرف برق در صنایع کشور
۴	۲- اصول مدیریت بار
۵	۲-۱- انگیزه‌های مدیریت بار
۶	۲-۲- تکنیک‌های اجرای مدیریت بار
۷	۲-۳- پارامترهای لازم برای مدیریت بار
۹	۳- راههای افزایش ضریب بار
۱۱	تأثیرات منفی پائین بودن ضریب قدرت
۱۱	روش‌های اصلاح ضریب قدرت
۱۲	۴-۲- روش‌های اندازه‌گیری قدرت و انرژی الکتریکی
۲۰	۵-۲- اصلاح منحنی بار
۲۱	۳- تعرفه‌های برق و مدیریت تقاضا
۲۱	۳-۱- تعرفه‌های برق بخش صنعت
۲۳	تعیین ضریب قدرت و ضریب زیان
۲۴	۳-۲- توصیه‌های مدیریت بار در دو کارخانه
۲۵	جایگزینی کشور به تعرفه
۲۶	استفاده از تعرفه جمعه
۲۶	- مدیریت بار در کارخانه شماره ۲
۲۶	پیک منحنی در آسیاب‌های دولاب
۲۷	پیک‌سازی در آسیاب‌های لعاب
۲۸	- محاسبه هزینه فعلی مصرف برق
۲۸	۴- تلفات در سیستم‌های قدرت و راهکارهای کاهش آن
۳۰	۴-۱- انواع تلفات در سیستم قدرت
۳۱	۴-۲- عوامل افزایش تلفات در شبکه
۳۲	۴-۳- اجزاء تلفات الکتریکی
۳۵	۴-۴- محاسبه تلفات انرژی و توان
۳۸	انرژی تلف شده از طریق کروتا
۴۰	۵-۴- تلفات در پست‌های فشار قوی
۴۱	۶-۴- راهکارهای موجود برای کاهش تلفات
۴۶	۵- کنترل توان راکتیو
۴۶	۱-۵- روش‌های کنترل قدرت راکتیو و ولتاژ

۵۲	۲-۵- بهبود ضریب توان
۵۳	۳-۵- انواع جیرانسازی
۵۶	۴-۵- جیرانسازی در کارخانه‌ها
۵۷	۵-۵- تعیین قدرت خازن مورد نیاز
۶۲	۶- موتورهای القائی (آسکرون) سه فاز
۶۲	۱-۶- مقدمه
۶۲	۲-۶- ساختمان موتورهای القائی
۶۳	ب-۲- رتور قفس سنجایی مضاعف
۶۵	۳-۶- مشخصه‌های اسمی موتورهای القائی یا آسکرون سه فاز
۶۶	۵-۶- منحنی گشتاور- لغزش*
۶۸	۷-۶- تلفات در موتورهای القائی سه فاز
۷۰	۸-۶- تشریح بخش توان در موتورهای القائی سه فاز
۷۱	۹-۶- آزمایش‌های مربوط به تعیین تلفات
۷۳	۱۰-۶- روش راه‌اندازی موتورهای القائی سه فاز

فصل ۲: صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های تولید هوای فشرده

۷۷	خلاصه
۷۷	۱- مقدمه
۷۸	۲- مروری بر مبانی اولیه
۷۹	۳- دسته‌بندی انواع کمپرسورها
۸۰	۱-۳- انواع کمپرسورها
۸۴	۴- تولید هوای فشرده
۸۹	۵- اجزای دیگر از سیستم هوای فشرده
۸۹	۱-۵- اجزای (فیلترها)
۹۰	۲-۵- مخازن هوای فشرده
۹۱	۳-۵- خشک کن‌ها
۹۲	۴-۵- خشک کن بین مرحله‌ای
۹۲	۶- توزیع هوای فشرده
۹۵	۷- نشی‌های هوا
۹۷	۸- بهره‌برداری از هوای فشرده
۹۷	۹- پتانسیل‌های رایج در صرفه‌جویی انرژی سیستم‌های تولید هوای فشرده
۹۸	۱-۹- کاهش دمای هوای ورودی
۱۰۰	۲-۹- کاهش فشار تخلیه
۱۰۱	۳-۹- تعمیر نشی‌های هوا
۱۰۳	۴-۹- سایر پتانسیل‌های کاهش مصرف انرژی
۱۰۵	۱۰- موارد تکمیلی در مورد شناسایی میزان نشی هوای فشرده

فصل ۳. صرفه‌جویی انرژی در فن‌ها و پمپ‌ها

۱- فن‌ها ۱۱۱	۱-۱- انواع فن‌ها ۱۱۱
۲-۱- مقاومت و منحنی‌های مقاومت در فن‌ها ۱۲۲	۳-۱- توان لازم برای فن‌ها ۱۲۳
۴-۱- صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در فن‌ها ۱۲۴	۲- پمپ‌ها ۱۳۲
۱-۲- طبقه‌بندی پمپ‌ها ۱۳۲	۲-۲- مشخصات پمپ‌ها ۱۴۰
۳-۲- توان مصرفی و راندمان پمپ‌ها ۱۴۱	۴-۲- کارکردهای مختلف یک پمپ ۱۴۲
۵-۲- کارکرد موازی پمپ‌ها ۱۴۴	۶-۲- کارکرد سری پمپ‌ها ۱۴۶
۷-۲- شرایط انتخاب کارکرد سری یا موازی ۱۴۷	۸-۲- راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در پمپ‌ها ۱۴۹

فصل ۴. صرفه‌جویی انرژی در روشنایی، ترانسفورماتورها و سیستم‌های تهویه مطبوع

۱- بهینه‌سازی انرژی در ترانسفورماتورها ۱۵۵	۱-۱- مقدمه ۱۵۵
۲-۱- تلفات ترانسفورمرها ۱۵۵	۳-۱- تلفات هسته و مس ۱۵۶
۴-۱- ضریب تلفات ۱۵۶	۵-۱- راندمان ترانسفورمرها ۱۵۷
۶-۱- رابطه بین ظرفیت ترانسفورمرها و راندمان آنها ۱۶۳	۷-۱- رابطه بین ضریب توان بار و راندمان ترانسفورمرها ۱۶۳
۸-۱- ترانسفورمرهای با راندمان بالا ۱۶۴	۹-۱- تلفات مختلف یا تغییر تعداد ترانسفورمرها ۱۶۴
۱۰-۱- کنترل ترانسفورمرها با تعداد آنها ۱۶۵	۲- بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های روشنایی ۱۶۸
۱-۲- مقدمه ۱۶۸	۲-۲- چگونگی تولید نور ۱۶۸
۳-۲- تعریف ۱۶۹	۴-۲- انواع منابع روشنایی (لامپ) ۱۷۰
۵-۲- مقایسه خواص منابع نور مختلف ۱۸۲	

۱۹۵	دیگر مشخصه‌های بالاست‌های الکترونیکی
۱۹۶	۷-۲- چراغ‌ها
۱۹۸	۸-۲- کنترل‌های سیستم روشنایی
۲۰۳	۹-۲- تعمیر و نگهداری سیستم‌های روشنایی
۲۰۳	۱۰-۲- محاسبات اقتصادی روشنایی
۲۰۶	۱۱-۲- جانمایی مؤثر روشنایی
۲۰۸	۳- بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع (HVAC)
۲۰۸	۱-۳- تعریف
۲۰۸	۲-۳- شرایط لازم برای آسایش و سلامت انسان
۲۰۹	۳-۳- معرفی سیستم‌های نمونه
۲۱۶	۴-۳- محاسبه بار سرمایش و گرمایش ساختمان
۲۲۸	۵-۳- استفاده از کامپیوتر جهت محاسبه بار سرمایش و گرمایش
۲۳۰	۶-۳- فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی در تهویه مطبوع

فصل ۱۵: مباحث ویژه در مدیریت انرژی الکتریکی

۲۳۵	۵- هارمونیک‌ها
۲۳۵	۱-۱- مقدمه
۲۳۶	علت ایجاد اغوج (هارمونیک) در شکل موج ولتاژ و جریان
۲۳۶	۲-۱- اثر هارمونیک‌ها روی تجهیزات برقی
۲۳۹	مثالی از اثرات هارمونیک بر تلفات و راندمان ترانسفورماتورها
۲۴۵	۳-۱- اثرات عازن‌ها بر روی میزان هارمونیک
۲۴۷	۲- پارهای مخصوص - کوره های القایی
۲۴۷	۱-۲- مشخصات کوره های القایی
۲۴۸	۲-۲- موازنه انرژی در کوره‌های القایی [شکل (۵-۸)]
۲۴۹	۳-۲- نرخ توان مصرفی
۲۵۱	۴-۲- راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در کوره های القایی
۲۵۶	آثار پیش گرم کردن
۲۵۸	۳- سیستم‌های محرک
۲۵۸	۱-۳- موتورهای با راندمان بالا
۲۶۰	اندازه‌گیری‌های موتورهای با راندمان بالا
۲۶۲	۲-۳- کنترل کننده‌های موتور
۲۶۶	۳-۳- سیستم‌های با سرعت متغیر

مراجع و منابع

۲۷۱	الف - مراجع خارجی
۲۷۵	ب - مراجع فارسی

فهرست جداول

فصل ۱: روش های مدیریت و صرفه جویی انرژی الکتریکی

جدول ۱-۱: روش های اصلاح منحنی بار	۶
جدول ۱-۲: تلفات ناشی از ناشی جریان در سه خط مشخص در هوای تمیز و خشک	۴۰
جدول ۱-۳: ناشی جریان در هر زنجیره مقرر بر حسب درجه آلودگی منطقه	۴۰
جدول ۱-۴: تلفات ناشی از جریان در هر زنجیره از یک خط انتقال ۱۱۰ کیلوولت، بر حسب کیلووات با توجه به درجه آلودگی محیط	۴۰
جدول ۱-۵: ویژگی ها و کامن های جیرانساها	۵۱
جدول ۱-۶: محاسبه ضریب K جهت افزایش ضریب توان از $\cos \phi_1$ به $\cos \phi_2$	۵۹
جدول ۱-۷: مقادیر تقریبی قدرت خازن بر حسب کیلووات برای موتور و ترانسفورماتور	۶۰

فصل ۲: صرفه جویی انرژی در سیستم های تولید هوای فشرده

جدول شماره ۲-۱: گستره های کاربرد برای انواع مختلف کمپرسورها	۸۵
جدول شماره ۲-۲: در حد انرژی صرفه جویی شده بر حسب درجه حرارت هوای ورودی در کمپرسورها	۱۰۰
جدول ۲-۳: تلفات توان الکتریکی با توجه به اندازه ناشی ها	۱۰۲
جدول شماره ۲-۴: میزان هوای فشرده مورد نیاز با توجه به وجود ناشی ها	۱۰۳

فصل ۳: صرفه جویی انرژی در فن ها و پمپ ها

جدول شماره ۳-۱: مشخصات و عملکرد انواع فن ها	۱۲۱
جدول شماره ۳-۲: مقدار η	۱۲۴
جدول شماره ۳-۳: مقدار	۱۲۴
جدول شماره ۳-۴: عمر کلید (هنگامی که تحت تعمیر قرار نگیرد)	۱۲۵
جدول شماره ۳-۵: مقایسه انواع سیستم های رانندگی	۱۲۶
جدول شماره ۳-۶: روش کاهش ظرفیت دمش هوا (نوع ثابت)	۱۲۷
جدول شماره ۳-۷: روش کاهش جریان هوا (نسبت متغیر)	۱۲۸
جدول شماره ۳-۸: مقایسه اصول و مشخصات عملکردی دمپر، پره رانما و تغییر سرعت در فن ها	۱۳۰

فصل ۴: صرفه جویی انرژی در روشنایی، ترانسفورماتورها و سیستم های تهویه مطبوع

جدول شماره ۴-۱: مشخصات ترانسفورماتورهای تک فاز و ۳ فاز برای ظرفیتهای مختلف	۱۵۹
جدول شماره ۴-۲: مشخصات ترانسفورماتورهای تک فاز و ۳ فاز ترانسفورماتورهای تک فاز	۱۶۲
جدول شماره ۴-۳: پارامترهای استاندارد برای ترانسفورماتورهای با عایق روغنی (معمولی و راندمان بالا)	۱۶۶
جدول شماره ۴-۴: مقایسه بین لامپ های نئگن-آرگون عادی و لامپ های فلورسنت فشرده با بالاست های فرکانس بالا و معمولی	۱۸۱
جدول شماره ۴-۵: محدوده راندمان انواع لامپ های تخلیه ای	۱۸۶
جدول شماره ۴-۶: راندمان لامپ های تخلیه ای فشار بالا در توان های مختلف	۱۸۷

جدول شماره ۷-۴	تلفات بالاستهای نوعی لامپهای تخلیه فشار بالا بصورت درصدی از توان لامپ	۱۸۸
جدول شماره ۸-۴	مقایسه منابع نور مختلف	۱۸۹
جدول شماره ۹-۴	مثالهایی از نور منتشر شده چراغ و نور تولید شده پس از نصب هر کدام از انعکاس دهندهها	۱۹۷
جدول شماره ۱۰-۴	انواع مختلف پوشش چراغهای فلورسنت	۱۹۸
جدول شماره ۱۱-۴	محل مناسب برای یکار بردن انواع حسگرهای حضور افراد	۲۰۱
جدول شماره ۱۲-۴	ضریب ارزش کلونی پکنواخت	۲۰۵
جدول شماره ۱۳-۴	ضریب ارزش کلونی برای مقادیر منفرد	۲۰۵
جدول شماره ۱۴-۴	مستلزمات تهویه هوای ASHREA ۶۲-۷۳ (اصلاح شده بر اساس ۷۵-۹۰)	۲۱۶
جدول شماره ۱۵-۴	ضریب انتقال حرارت کلی ترکیبات مختلف دیوار	۲۱۸
جدول شماره ۱۶-۴	ضریب انتقال حرارت برای مواد مختلف	۲۲۱
جدول شماره ۱۷-۴	ضریب شفافیت شیشه پنجرهها با پرده داخلی	۲۲۲
جدول شماره ۱۸-۴	حرارت دریافتی از تشعشع استاندارد خورشید از میان شیشه پنجره	۲۲۳
جدول شماره ۱۹-۴	دفعات تهویه اتاقها نسبت به ابعاد آنها برای سرمایش و گرمایش	۲۲۴
جدول شماره ۲۰-۴	حرارت تولید شده توسط وسایل خانگی مختلف	۲۲۵
جدول شماره ۲۱-۴	حرارت تولید شده توسط بدن افراد	۲۲۷
جدول شماره ۲۲-۴	راندمان فن ها	۲۲۸
جدول شماره ۲۳-۴	راندمان موتورها	۲۲۸
جدول شماره ۲۴-۴	مقادیر R برای عایق ها و ترکیبات مواد متداول	۲۳۲
جدول شماره ۲۵-۴	جدول محاسبات اقتصادی برای عایق های با مقادیر ضریب R متفاوت	۲۳۳

فصل ۵: مباحث ویژه در مدیریت انرژی الکتریکی

جدول شماره ۱-۵	خطاهای حاصل از نوع سنجش برای موج های معروف	۲۴۲
جدول شماره ۲-۵	تغییرات راندمان ترانسفورماتور در محیطهای هارمونیکی به ازای THDهای مختلف	۲۴۵
جدول شماره ۳-۵	نتایج دوره ای پار که نشان دهنده میزان صرفه جویی KVar.Kwh هنگام استفاده از کنترل کننده موتور در موتورهای استاندارد است	۲۴۷

فهرست اشکال

فصل ۱: روش‌های مدیریت و صرفه‌جویی انرژی الکتریکی

۷	شکل شماره ۱-۱: روش‌های اصلاح منحنی بار
۱۵	شکل شماره ۲-۱: اندازه‌گیری توان الکتریکی
۱۹	شکل شماره ۳-۱: نمونه‌ای از منحنی بار یک واحد صنعتی اندازه‌گیری شده
۵۱	شکل شماره ۴-۱: جبراسازی اختصاصی
۵۵	شکل شماره ۵-۱: جبراسازی گروهی
۵۶	شکل شماره ۶-۱: انواع جبراسازی
۵۷	شکل شماره ۷-۱: تعیین قدرت خازن مورد نیاز
۵۸	شکل شماره ۸-۱: محاسبه مقدار K
۶۰	شکل شماره ۹-۱: تعیین مقدار خازن مورد نیاز
۶۳	شکل شماره ۱۰-۱: اجزاء یک موتور الکتریکی
۶۳	شکل شماره ۱۱-۱: شمای ساده یک روتور قفسه سنجی که در دو انتها میلرها توسط حلقه‌های انتهایی اتصال کوتاه شده‌اند.
۶۶	شکل شماره ۱۲-۱: شمای ساده یک روتور سیم پیچی شده در موتور القایی سه فاز
۶۸	شکل شماره ۱۳-۱: منحنی گشتاور لغزش یا TSL برای یک موتور القایی سه فاز
۶۹	شکل شماره ۱۴-۱: اثر مقاومت روتور بر روی منحنی گشتاور لغزش یا TSL
۷۰	شکل شماره ۱۵-۱: افت توان در موتورهای الکتریکی
۷۴	شکل شماره ۱۶-۱: مدار مربوط به آزمایش تعیین تلفات در موتورهای القایی سه فاز
۷۵	شکل شماره ۱۷-۱: شمای رابطه‌ی ستاره مثلث در موتورهای القایی سه فاز
۷۶	شکل شماره ۱۸-۱: منحنی گشتاور-لغزش هنگام استفاده از کلید راه انداز ستاره مثلث

فصل ۲: صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های تولید هوای فشرده

۷۸	شکل شماره ۱-۲: نمودار سیستم هوای فشرده که توسط یک موتور الکتریکی کار می‌کند
۷۹	شکل شماره ۲-۲: شماتیک یک سیستم هوای فشرده متداول
۸۰	شکل شماره ۳-۲: نمودار مقایسه‌ی دبی و فشار خروجی در کمپرسورهای مختلف
۸۱	شکل شماره ۴-۲: الف- کمپرسور رفت و برگشتی تک مرحله‌ای
۸۱	شکل شماره ۴-۲: ب- کمپرسور رفت و برگشتی دو مرحله‌ای
۸۲	شکل شماره ۴-۲: ج- کمپرسور جرخان
۸۳	شکل شماره ۴-۲: د- کمپرسور پیچشی
۸۳	شکل شماره ۴-۲: ه- کمپرسور دیافراگمی
۸۴	شکل شماره ۵-۲: نوریو کمپرسور
۸۵	شکل شماره ۶-۲: فرایندهای تراکم همدمای بی دررو و پلی تروپیک
۹۲	شکل شماره ۷-۲: خشک کن تبریدی
۹۵	شکل شماره ۸-۲: نمودار تعیین اندازه اولیه در سیستم هوای فشرده
۱۰۴	شکل شماره ۹-۲: سیستم بازیافت حرارت

- شکل شماره ۱۰-۲: سیستم بازیافت حرارت برای کمپرسورهای آب خنک ۱۰۵
- شکل شماره ۱۱-۲: دیاگرام جریان انرژی برای یک کمپرسور ۱۰۸

فصل ۳: صرفه جویی انرژی در فن‌ها و پمپ‌ها

- شکل شماره ۱-۳: شکل کلی و اجزای فن‌های محوری ۱۱۱
- شکل شماره ۲-۳: مشخصات یک نمونه فن از نوع پروانهای ۱۱۵
- شکل شماره ۳-۳: مشخصات یک فن از نوع محوری-لوله‌ای ۱۱۶
- شکل شماره ۴-۳: مشخصات یک نمونه فن از نوع محوری-پره‌ای ۱۱۷
- شکل شماره ۵-۳: شکل کلی و اجزای فن‌های نوع گریز از مرکز (سانتریفوژ) ۱۱۸
- شکل شماره ۶-۳: مشخصات یک نمونه فن از نوع بکواره اینکلایند ۱۱۹
- شکل شماره ۸-۳: مشخصات یک نمونه فن از نوع شعاعی ۱۲۰
- شکل شماره ۹-۳: منحنی‌های سیستم و فن ۱۲۲
- شکل شماره ۱۰-۳: منحنی عملکرد برای کارکرد موازی فن‌ها ۱۲۸
- شکل شماره ۱۱-۳: منحنی مشخصه برای فن‌های مختلف ۱۳۱
- شکل شماره ۱۲-۳: مقایسه توان ورودی در موتورهای ۱۳۲
- شکل شماره ۱۳-۳: پمپ‌های نوع توربو ۱۳۴
- شکل شماره ۱۴-۳: پمپ رفت و برگشتی و مخزن هوا ۱۳۴
- شکل شماره ۱۵-۳: پمپ‌های نوع جریخان ۱۳۵
- شکل شماره ۱۶-۳: ساختار یک پمپ گریز از مرکز کوچک ۱۳۶
- شکل شماره ۱۷-۳: ساختار یک پمپ سانتریفوژ چند مرحله‌ای ۱۳۷
- شکل شماره ۱۸-۳: پمپ گریز از مرکز یا مکش دابل ۱۳۸
- شکل شماره ۱۹-۳: پمپ جریان مرکب ۱۳۹
- شکل شماره ۲۰-۳: پمپ جریان محوری ۱۳۹
- شکل شماره ۲۱-۳: گستره کاربرد انواع پمپ‌ها (مطابق استاندارد JIS ژاپن) ۱۴۰
- شکل شماره ۲۲-۳: منحنی تغییرات (هد-ظرفیت) برای سیستم و پمپ ۱۴۱
- شکل شماره ۲۳-۳: منحنی تغییرات راندمان پمپ‌ها (مطابق استاندارد JIS ژاپن) ۱۴۲
- شکل شماره ۲۴-۳: نقطه کار هنگامی که مقاومت سیستم تغییر می‌کند ۱۴۳
- شکل شماره ۲۵-۳: نقطه کار زمانی که هد واقعی تغییر می‌کند ۱۴۴
- شکل شماره ۲۶-۳: کارکرد موازی پمپ‌ها با مشخصات یکسان ۱۴۵
- شکل شماره ۲۷-۳: کارکرد موازی پمپ‌ها با مشخصات مختلف ۱۴۶
- شکل شماره ۲۸-۳: کارکرد سری پمپ‌ها با مشخصات یکسان ۱۴۷
- شکل شماره ۲۹-۳: کارکرد سری پمپ‌ها با مشخصات مختلف ۱۴۸
- شکل شماره ۳۰-۳: شرایط انتخاب کارکرد سری یا موازی ۱۴۸
- شکل شماره ۳۱-۳: تغییر در عملکرد پمپ در اثر برش قطر پروانه ۱۵۱
- شکل شماره ۳۲-۳: تغییر عملکرد پمپ با تغییرات سرعت ۱۵۲
- شکل شماره ۳۳-۳: دیاگرام سیستم کنترل برای دو حالت کنترل فشار با دی ثابت و تثبیت فشار نرمال ۱۵۱

فصل ۱: صرفه‌جویی انرژی در روشنایی، ترانسفورماتورها و سیستم‌های تهویه مطبوع

- شکل شماره ۱-۱: منحنی تغییرات ولت‌دما و تلفات بی‌باری و تلفات بار برای ۳ ترانسفورماتور با ضریب تلفات مختلف ۱۵۷
- شکل شماره ۱-۲: منحنی شبانه روزی بار یک ترانسفورماتور ۱۵۸
- شکل شماره ۱-۳: تغییرات ولت‌دما و ترانسفورماتور برای ظرفیت‌های مختلف ۱۶۳
- شکل شماره ۱-۴: منحنی تغییرات ولت‌دما و ترانسفورماتور ۱۰ مگاوات آمپری بارهای ضریب توان‌های مختلف ۱۶۴
- شکل شماره ۱-۵: ۳ حالت مختلف برای تأمین یک ظرفیت مشخص با ترانسفورماتورهای مختلف ۱۶۶
- شکل شماره ۱-۶: دو ترکیب مختلف از ترانسفورماتورها برای تأمین یک ظرفیت مشخص ۱۶۷
- شکل شماره ۱-۷: محدوده مفید برای عملکرد ۲ ترانسفورماتور [حالت‌های شکل (۱-۶)] ۱۶۷
- شکل شماره ۱-۸: تولید نور مرنی در یک دستگاه روشنایی ۱۶۹
- شکل شماره ۱-۹: منابع مختلف نور ۱۷۱
- شکل شماره ۱-۱۰: اجزاء مختلف یک لامپ ال‌ئی ۱۷۲
- شکل شماره ۱-۱۱: توزیع طول موج نور تولیدی (اسپکتروم) یک لامپ ال‌ئی ۱۷۳
- شکل شماره ۱-۱۲: مقایسه توزیع طول موج (اسپکتروم) یک لامپ ال‌ئی با افتاب ظهر ۱۷۴
- شکل شماره ۱-۱۳: منحنی‌های تغییرات مشخصات لامپ ال‌ئی برای تغییرات ولتاژ ۱۷۵
- شکل شماره ۱-۱۴: یک لامپ هالوژن با انعکاس دهنده ۱۷۵
- شکل شماره ۱-۱۵: مقایسه افت نور یک لامپ ال‌ئی با لامپ هالوژن تک‌گشت ۱۷۶
- شکل شماره ۱-۱۶: اجزاء یک لامپ فلورسنت ۱۷۷
- شکل شماره ۱-۱۷: تغییرات نور خروجی لامپ فلورسنت در دو حالت ۱۷۸
- شکل شماره ۱-۱۸: تغییرات طول عمر فلورسنت‌های مختلف برای ساعت کارکرد برای هر بار راه‌اندازی ۱۷۸
- شکل شماره ۱-۱۹: افت نور انواع فلورسنت در طول عمر آنها ۱۷۹
- شکل شماره ۱-۲۰: انواع مختلف لامپ‌های فلورسنت و فلورسنت فشرده ۱۸۰
- شکل شماره ۱-۲۱: ۴ نوع لامپ تخلیه‌ای ۱۸۳
- شکل شماره ۱-۲۲: توزیع طول موج تولیدی (اسپکتروم) انواع لامپ‌های ال‌ئی ۱۸۴
- شکل شماره ۱-۲۳: کاهش نور انواع لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا ۱۸۵
- شکل شماره ۱-۲۴: تغییرات نور یک لامپ متال هالید به تغییرات زاویه محور آن به خط عمود ۱۸۶
- شکل شماره ۱-۲۵: نمایش داخل انواع مختلف بالاست‌های الکتریکی ۱۹۵
- شکل شماره ۱-۲۶: مشخصه‌های لامپ فلورسنت فرکانس بالا ۱۹۶
- شکل شماره ۱-۲۷: ساختمان چراغ ۱۹۶
- شکل شماره ۱-۲۸: بدنه چراغ قبل و بعد از نصب آتاکسی دهده نوری ۱۹۷
- شکل شماره ۱-۲۹: سیستم‌های کنترل ۱۹۸
- شکل شماره ۱-۳۰: حسگرهای مافوق صوت ۲۰۰
- شکل شماره ۱-۳۱: حسگرهای مادون قرمز ۲۰۰
- شکل شماره ۱-۳۲: افت نور خروجی سیستم روشنایی در طول زمان ۲۰۲
- شکل شماره ۱-۳۳: افت پیش‌بینی شده نور در نتیجه کثیف شدن داخل بدنه چراغ در یک محیط آلودگی تمیز ۲۰۲
- شکل شماره ۱-۳۴: ترتیب قرار گرفتن چراغ‌ها باید موازی پنجره‌ها باشد ۲۰۶
- شکل شماره ۱-۳۵: تلف و به ترتیب قرار گرفتن چراغ‌ها برای یک خط از میزهای کار ۲۰۷

۲۰۹	شکل شماره ۳۶-۱: نمودار سایکومتريک
۲۱۰	شکل شماره ۳۷-۱: اجزای یک سیستم HVAC نمونه
۲۱۲	شکل شماره ۳۸-۱: سیستم مجاری دو گانه (درجه حرارت‌های نمونه مربوط به فصل تابستان)
۲۱۲	شکل شماره ۳۹-۱: سیستم های چند ناحیه
۲۱۳	شکل شماره ۴۰-۱: سیستم حجم متغیر هوا
۲۱۴	شکل شماره ۴۱-۱: سیستم بار گرمایش پائنه ای
۲۱۴	شکل شماره ۴۲-۱: سیستم خنک کاری تبخیری
۲۱۵	شکل شماره ۴۳-۱: ورودی و خروجی حرارت در یک خانه تحت تهویه مطبوع
۲۱۷	شکل شماره ۴۴-۱: مراحل محاسبه بار تهویه مطبوع یک مکان
۲۲۱	شکل شماره ۴۵-۱: شار حرارتی
۲۲۱	شکل شماره ۴۶-۱: ضریب انتقال حرارت آب در یک لوله
۲۳۵	شکل شماره ۴۷-۱: راهبرد ذخیره جزئی

فصل ۵: مباحث ویژه در مدیریت انرژی الکتریکی

۲۳۸	شکل شماره ۱-۵: یک موج هارمونیک با هارمونیک‌های پنجم و هفتم
۲۴۲	شکل شماره ۲-۵: تغییرات ظرفیت نامی ترانسفورماتور در صورتی که بار آن یک سوئیچینگ باشد
۲۴۸	شکل شماره ۳-۵: ولتاژ یک کارخانه در حالت بار و بدون خازن
۲۴۹	شکل شماره ۴-۵: جریان یک کارخانه در حالت بار و بدون خازن
۲۵۰	شکل شماره ۵-۵: کارکرد کوره‌های القایی بدون هسته با مبنای عملکردی ترانسفورماتورها
۲۵۱	شکل شماره ۶-۵: شکل کلی یک کوره القایی بدون هسته
۲۵۱	شکل شماره ۷-۵: مدار یک کوره القایی بدون هسته
۲۵۳	شکل شماره ۸-۵: تلفات انرژی در یک کوره القایی بدون هسته از نوع فرکانس اصلی
۲۵۴	شکل شماره ۹-۵: رابطه بین نرخ ذوب و ظرفیت کوره
۲۵۸	شکل شماره ۱۰-۵: بازیافت حرارت از یک کوره القایی جهت خشک کردن قراضه
۲۵۹	شکل شماره ۱۱-۵: بازیافت حرارت از یک کوره القایی جهت گرمایش فضا
۲۵۹	شکل شماره ۱۲-۵: بازیافت حرارت از یک کوره القایی جهت گرمایش آب
۲۶۱	شکل شماره ۱۳-۵: مقایسه راندمان بار کامل موتورهای استاندارد و راندمان بالا
۲۶۳	شکل شماره ۱۴-۵: مقایسه ضریب قدرت و راندمان در موتورهای استاندارد و راندمان بالا
۲۶۳	شکل شماره ۱۵-۵: میزان صرفه‌جویی در انرژی ناشی از کاربرد موتورهای آزمایش شده با راندمان بالا
۲۶۴	شکل شماره ۱۶-۵: مصرف قدرت واقعی در موتورهای استاندارد و موتورهای با راندمان انرژی بالا
۲۶۵	شکل شماره ۱۷-۵: مقایسه عملکرد موتور استاندارد ۷/۵ کیلوواتی با کنترل‌کننده و بدون کنترل‌کننده
۲۶۶	شکل شماره ۱۸-۵: مقایسه عملکرد موتور استاندارد ۷/۵ کیلوواتی با کنترل‌کننده و بدون کنترل‌کننده
۲۶۶	شکل شماره ۱۹-۵: میزان صرفه‌جویی ناشی از کاربرد کنترل‌کننده موتور در موتورهای استاندارد
۲۶۸	شکل شماره ۲۰-۵: تقسیمات سیستم‌های سرعت متغیر
۲۶۹	شکل شماره ۲۱-۵: فشار تخلیه پمپ کنترل‌کننده یک محرک دور متغیر

فصل ۱

روش‌های مدیریت و صرفه‌جویی انرژی الکتریکی

۱- ضرورت مدیریت انرژی الکتریکی

۱-۱- مقدمه

یکی از اهداف استراتژیک بخش انرژی الکتریکی کشور، مصرف انرژی به شکل بهینه و مناسب آن می‌باشد. از آنجائیکه ظرفیت تولید انرژی الکتریکی با توجه به هزینه سنگین سرمایه‌گذاری در آن محدود می‌باشد، لذا افزایش میزان بهره‌وری از ظرفیت موجود در کشور تأثیر بسیار مطلوبی در زمینه هزینه و سرمایه‌گذاری در بخش تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی را بدنبال خواهد داشت.

یکی از ابزارهای مطرح در این بخش، استفاده از روش‌های مدیریت بار و انرژی است. لذا معرفی مدیریت بار و اهداف آن با استفاده از بررسی‌های انجام شده در صنایع مختلف کشور ضرورت دارد. منافع ناشی از اقدامات صرفه‌جویی، در عین حال که به سود صنایع کشور است در ارتقاء اقتصاد ملی و امکان بهره‌گیری از فرصت‌های اقتصادی ناشی از عدم سرمایه‌گذاری‌های کلان در بخش عرضه انرژی مفید خواهد بود. در مورد انرژی الکتریکی شامل توان مصرفی در اوقات پرباری ویژه پیک بار (اوج مصرف) و همچنین کاهش انرژی واحد تولید با توجه به شرایط فنی و نوع فناوری در بخش صنعت کشور، بدلیل مدیریت پذیری بهتر در قالب اقدامات کوتاه مدت و میان مدت می‌تواند مؤثر بوده و باعث کاهش اختلاف بار پیک و پایه شود.

۱-۲- شناخت امکانات و محدودیت‌های بار و انرژی الکتریکی

انرژی الکتریکی به دلیل قابلیت اندازه‌گیری و کنترل بهتر و همچنین به دلیل محدودیت ناشی از عدم امکان ذخیره‌سازی از سایر انواع انرژی متمایز است. سرمایه‌گذاری انرژی در تأسیسات تولید برق برحسب نیروگاه‌های مختلف از ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ دلار برای هر کیلووات قدرت اسمی منصوبه متفاوت است و بالاخره در شرایط کشور

ما برای تولید، انتقال و توزیع یک کیلووات قدرت الکتریکی در حدود ۱۴۰۰ دلار و ۲۸۰۰۰۰ ریال سرمایه‌گذاری اولیه و صرف دوره زمانی نسبتاً طولانی (۴ تا ۱۰ سال) ضروری است.

در یک سیستم برق، برنامه‌ریزی توسعه، اساساً بر محور اقدامات زیر صورت می‌گیرد:

- ۱- شناخت و ارزشیابی وضع موجود (شامل تأسیسات و میزان درآمد حاصله از عملیات)
- ۲- پیش‌بینی تقاضای بار (MW) و انرژی (MWh) دوره‌های زمانی آینده
- ۳- بررسی و انتخاب بهترین حالت فنی و اقتصادی توسعه تأسیسات تولید، انتقال و توزیع بمنظور حصول به اهداف پیش‌بینی شده با توجه به قابلیت آمادگی و ضریب اطمینان سیستم
- ۴- ارزیابی منابع مالی مورد نیاز برای توسعه تأسیسات و تعیین هزینه تمام شده که بر این اساس، تدوین ساختار تعرفه‌های مناسب برق با لحاظ کردن سیاست‌های اجتماعی و اقتصادی انجام می‌گیرد.
- ۵- ویژگی سیستم قدرت ایجاد می‌کند تا به منظور امکان ارائه خدمات به مصرف‌کنندگان، علاوه بر میزان توان عملی تولید، ظرفیتی (در شرایط مناسب حداقل ۱۰٪) نیز به عنوان ذخیره در دسترس باشد. سیستم برق بایستی در هر لحظه از زمان آمادگی تأمین تقاضا را داشته باشد و همین محدودیت است که اهمیت صرفه‌جویی در آن را اولویت ویژه می‌بخشد.

در زمینه عرضه نیروی برق، تا به حال سیاست‌های توسعه‌ای اجرا شده و مسلماً ادامه خواهد یافت. در سال ۱۳۸۲ قدرت نامی نیروگاه‌های وزارت نیرو بالغ بر ۳۳۴۱/۴ مگاوات گردید که حدوداً ۹/۲ درصد نسبت به سال قبل افزایش داشته است. از مجموع قدرت نامی نیروگاه‌های نصب شده وزارت نیرو ۴۳/۴۸ درصد سهم نیروگاه‌های بخاری، ۲۱/۳۶ درصد سهم نیروگاه‌های گازی ۲۰/۴۴ درصد سهم نیروگاه‌های چرخه ترکیبی، ۱/۴۷ درصد سهم نیروگاه‌های دیزلی و ۱۳/۲۴ درصد سهم نیروگاه‌های برق‌آبی می‌باشد.

در سال ۱۳۸۲ تولید انرژی نیروگاه‌های وزارت نیرو از مرز ۱۴۶ میلیارد کیلووات ساعت گذشت که در مقایسه با سال قبل از آن معادل ۸/۷ درصد رشد داشته است. در این سال قدرت سرانه به ۵۱۲ وات و تولید سرانه به ۲۲۳۴ کیلووات ساعت رسید که نسبت به سال گذشته به ترتیب از رشدی معادل ۶/۴ و ۶/۲ برخوردار بوده است.

حداکثر بار همزمان تأمین شده به ۲۶۲۱۶ مگاوات و حداکثر نیاز مصرف همزمان و هم روز اصلاح شده به ۲۶۱۴۰ مگاوات رسید که نسبت به سال قبل به ترتیب معادل ۱۰/۳ و ۵/۶ درصد رشد را نشان می‌دهد. طی سال‌های اخیر رشد بار در شبکه برق کشور نزدیک به ۱۰٪ (در سال) و رشد انرژی در حدود ۸٪ بوده است. که این امر بین این نکته مهم است که اکثر مصارف ایجاد شده طی سالهای اخیر در بخش‌های غیر مولد (از قبیل خانگی - تجاری) تمرکز داشته که معمولاً دارای ضریب بار خوس نیستند. سهم مصارف برق بخش صنعت (که دارای ضریب بار مناسب است) در سال ۸۲ به حدود ۳۲٪ رسیده است. در حالیکه بخش خانگی و تجاری ۴۰ درصد کل مصرف برق کشور را بخود اختصاص می‌دهد.

بالا بودن سهم مصارف خانگی و تجاری، اولویت این بخش‌ها در صرفه‌جویی بیشتر را مطرح می‌نماید ولی مشکلات عمده این بخش‌ها ناشی از کثرت تعداد مصرف‌کنندگان و وجود الگوهای رفتاری است که طبعاً طرح مسائل فرهنگی را نیز می‌طلبد. در بخش خانگی و تجاری توجه به موضوع روشنائی اهمیت اساسی دارد.

۱-۳- ضرورت مدیریت مصرف برق در صنایع کشور

در برابر رشد سریع مصرف برق (به ویژه توان الکتریکی) عموماً دو راه حل پیش پای ما است. راه حل اول افزایش بیش از پیش ظرفیت‌ها است، این امر به مفهوم مصرف بیشتر منابع مالی در بخش‌های ناهمگن با نیازهای واقعی اقتصادی کشور است که با توجه به محدودیت منابع مالی عملاً امکانپذیر نمی‌باشد. راه حل دوم عبارت است از تصحیح الگوی مصرف برق و به عبارتی دیگر حذف مصارف غیر ضروری یا جابه‌جایی زمانی مصرف و... که هم به سود مصرف‌کننده بوده و در عین حال به توزیع عادلانه‌تر منابع کشور منتهی می‌گردد.

یکی از روش‌های مدیریت مصرف برق به مفهوم تغییر و بهینه‌سازی الگوی مصرف با حفظ سطح رفاه یا تولید است. بنابراین کنترل رشد بار، تغییر شکل منحنی بار، استفاده از منابع اختصاصی (مثلاً تأسیسات برق داخلی صنایع)، صرفه‌جویی در برق مصرفی برای واحد تولید و... همه در این مقوله‌اند. همچنین از دیدگاه بهبود سیستم عرضه، ضروری است تا راندمان نیروگاه‌ها افزایش، میزان تلفات سیستم کاهش و ضریب بار و ضریب قدرت شبکه بهبود پذیرد و در این راستا توجه به فناوری جدید از قبیل کاربرد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به منظور افزایش راندمان نیروگاه‌های گازی، بررسی امکان استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر نیز باید مورد توجه قرار گیرند.

نتایج مدیریت مصرف برق که از دیدگاه مصرف‌کننده کاهش هزینه برق است از دیدگاه سیستم برق و اقتصادی عمومی کشور به مفهوم: تقلیل مخارج سرمایه‌گذاری، رفع محدودیت از ظرفیت‌های موجود، فراهم کردن زمینه‌های بخش اقتصادی قدرت^۱، کاهش قیمت تمام شده برق و افزایش کارایی و ضریب اطمینان سیستم برق می‌باشد.

مدیریت مصرف برق در بلندمدت می‌تواند به یک سیاست توسعه اقتصادی منتهی گردد.

مدیریت مصرف برق در بخش صنایع کشور به عواملی از قبیل سطح فناوری، عمر ماشین‌آلات، ارزش افزوده در صنایع و قیمت نهاده‌های صنعتی و... وابسته است.

مدیریت مصرف برق را بر اساس دوره اجرای تصمیمات، می‌توان به کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت تقسیم‌بندی کرد و از دیدگاه نوع مصرف نیز این گروه بندی را می‌توان به شکل: مدیریت مصرف در روشنائی، سرمایش، گرمایش، تجهیزات موتوری و فرایند دسته‌بندی نمود.

۲- اصول مدیریت بار

راحتی و سهولت کنترل، یکی از دلایل رشد سریع در مصرف الکتریسیته است. پس منطقی است اولین زمینه‌ای که برای کاوش در یک برنامه مدیریت انرژی انتخاب می‌گردد، کنترل‌های بهینه باشد. مثالی در این زمینه، تایمرها و کلیدهایی هستند که در زمان و مکان مورد لزوم، چراغ‌ها را روشن می‌کنند و یا مثالی دیگر، بکارگیری محرک‌های موتوری جدید یا سرعت متغیر (SCR^۱ یا VSD^۲) خواهد بود. ریز پردازنده‌ها (کنترل‌های هوشمند) با قیمت مناسب، امروزه بقدری در دسترس هستند که می‌توان گستره وسیع‌تری از عملیات کنترلی را نسبت به آنچه در گذشته مقدور بود، فراهم کرد.

دومین زمینه کلی، بهینه‌سازی ظرفیت است. بخصوص در موتورهای الکتریکی، اضافه ظرفیت باعث دوگونه عدم کارایی می‌گردد. اول اینکه، راندمان موتورهای در بارهای کمتر از بار نامی کاهش می‌یابد و دوم اینکه ضریب قدرت در بارهای اندک، کمتر می‌شود و در نتیجه موجب وارد شدن تلفات بیشتر در سیستم توزیع الکتریکی می‌شود.

قدم سوم این است که در صورت امکان، بارها را کاهش دهیم، بعنوان مثال می‌توان از بارهای روشنایی نام برد. در ساختمان‌های اداری مدرن، به جزانهایی که اخیراً کارهایی را جهت اصلاح انجام داده‌اند، تقریباً همیشه روشنایی‌های اضافی وجود دارند. این عمل به دو طریق انرژی را تلف می‌کند: اول در الکتریسیته‌ای که این نور را تأمین می‌کند و دوم انرژی‌ای که صرف تهویه هوای گرم اضافی در تابستان می‌شود.

چهارمین قدم، استفاده از فرآیندهای کارآمد است. مثال آن استفاده از گرمایشهای مایکروویو یا دی الکتریک (که مستقیماً گرما را به جسم مورد نظر اعمال می‌کنند) بجای استفاده از روش‌های دیگر گرمادهی است.

قدم پنجم، بررسی امکان استفاده بیشتر از تجهیزات کارآمدتر است. موتورهای با راندمان بالا، لامپ‌های با راندمان بالا، پمپ‌های حرارتی (بجای گرمایش مقاومتی)، و بسیاری دستگاههای الکترونیکی حالت جامد که انرژی کمی مصرف می‌کنند، در دسترس می‌باشند.

قدم ششم، بکارگیری روش‌های مخصوص جهت کاهش تلفات است، همچون تصحیح ضریب قدرت^۳ یا اصلاح سیستم‌های توزیع برای کاهش تلفات اهمی (RI^۴).

هفتمین قدم، نگهداری انرژی بصورت مؤثر و تقلیل تلفات است. این مسأله را می‌توان با عایق‌بندی بهتر ساختمانها و لوازمی که دمای بالا دارند، انجام داد. بازیافت گرمای حاصل از موتورها، مبدل‌ها یا تجهیزاتی مانند کمپرسور هوا نیز در این دسته جای می‌گیرند.

قدم هشتم، جستجوی موقعیتهایی برای تولید و مصرف متوالی^۴ انرژی می‌باشد. بارزترین نمونه آن تولید

1. SCR: Static Control System

2. VSD: Variable Speed Drives

3. Power Factor

4. Cascading

مشترک برق و حرارت^۱ است که اغلب در اماکنی که مقدار زیادی حرارت و الکتریسته مصرف دارند، امکانپذیر و اقتصادی است. در صنعت، تدابیری که بتواند هم از توربین گازی و هم از توربین بخار به این منظور استفاده کنند، وجود دارد.

قدم نهم، آزمودن فرصت‌هایی برای تبدیل انرژی است. به‌کارگیری یک موتور با سرعت متغیر می‌تواند سیستم متحرک مکانیکی را که برای تغییر سرعت به‌کار می‌رود حذف کند، که منجر به کاهش تلفات می‌گردد- یا تجهیزات پنوماتیک^۲ را می‌توان با محرک‌های برقی جایگزین کرد.

۲-۱- انگیزه‌های مدیریت بار

الف- از دیدگاه تولید

نیروگاه‌ها و شبکه‌های انتقال و توزیع بعنوان تأمین کنندگان انرژی الکتریکی برای مشترکین می‌باشند، بنابراین توجه به مدیریت انرژی در آنها، به دلایل زیر مورد لزوم است:

- ۱- کاهش مصرف برق در ساعات پیک شبکه و در نتیجه کند شدن روند احداث نیروگاه
- ۲- کاهش و به تعویق انداختن سرمایه‌گذاریهای لازم جهت احداث شبکه انتقال و توزیع
- ۳- بهربرداری بهینه از ظرفیت‌های موجود شبکه تولید، انتقال و توزیع
- ۴- کاهش مسأله ناپایداری احتمالی و در نتیجه بهبود قابلیت اطمینان شبکه
- ۵- کاهش تلفات داخلی نیروگاه‌ها

ب- از دیدگاه مصرف‌کنندگان

زمینه فعالیت در همه بخش‌های صنعتی، تجاری، خانگی و کشاورزی جهت اعمال مدیریت مصرف برق وجود دارد که برخی از مزایای آن عبارتند از:

- ۱- کاهش سرمایه‌گذاریهای اولیه به جهت طراحی و انتخاب مناسب تجهیزات مانند ترانسفورماتورها، الکتروموتورها و اجزاء تأسیسات الکتریکی
- ۲- افزایش راندمان و کاهش تلفات برق با استفاده از ظرفیت کامل ماشین‌آلات
- ۳- کاهش هزینه‌های برق حاصل از اصلاح مصرف و انتخاب تعرفه مناسب

ج- از جنبه محیط زیست

مصرف بهینه برق منجر به کاهش مصرف انرژی اولیه شده و در نهایت انتشار آلاینده‌های زیست محیطی کمتر می‌شود. آلودگی هوا، سلامتی جامعه را تهدید می‌کند و هزینه اجتماعی مضاعفی را ایجاد می‌نماید.

1. CHP-Combined Heat & Power

2. Pneumatic

۲-۲- تکنیک‌های اجرای مدیریت بار

در جدول (۱) تکنیک‌های موفق در بخش‌های مختلف بمنظور اصلاح منحنی بار خانگی- تجاری و صنعتی معرفی شده است.

جدول ۱- ۱: روش‌های اصلاح منحنی بار

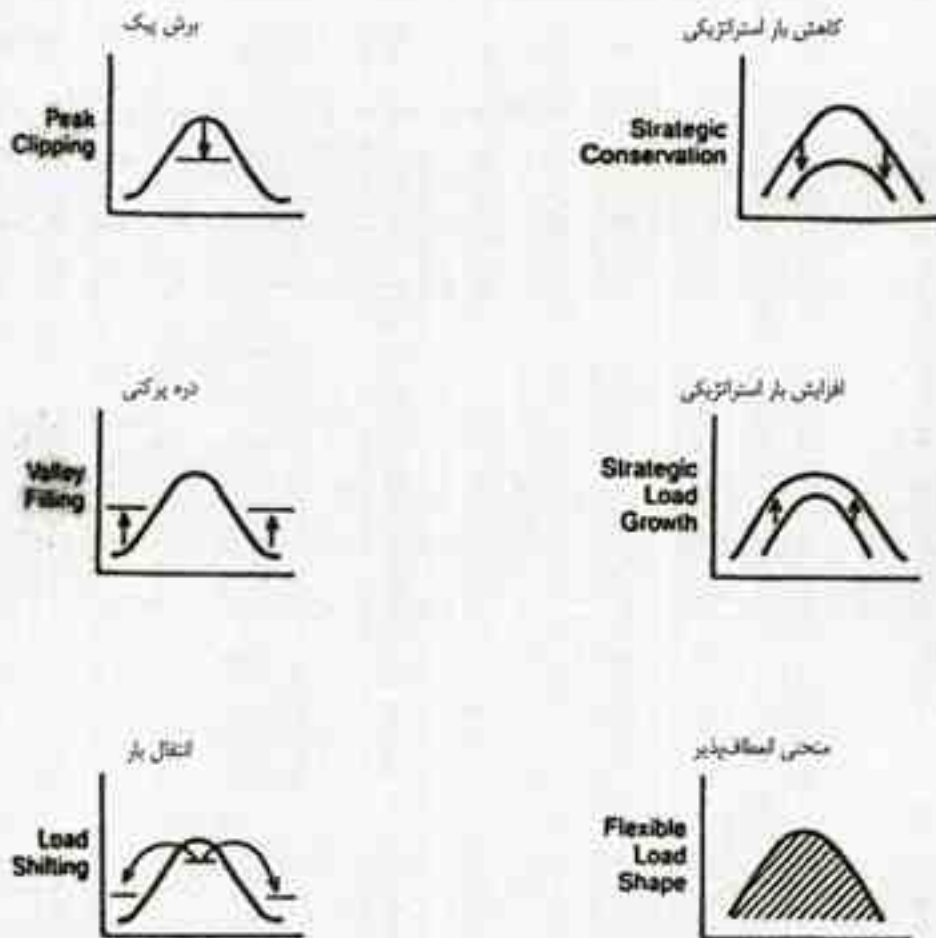
روش اصلاح منحنی بار	خانگی	تجاری	صنعتی
روش پیک	کنترل مستقیم سیستم‌های تهویه	کنترل سیستم تهویه مرکزی	قطع مصارف غیر ضروری
پیرگردن دره	کاربرد سیستم گرمایش الکتریکی	ذخیره‌سازی سیستم‌های حرارتی	ایجاد شیفت کار شب
جایجایی بار پیک	برنامه‌ریزی مصرف	کاربرد سیستم‌های ذخیره‌ساز حرارتی	انتقال شیفت روز به شب
صرفه‌جویی استراتژیک	بهبود عایق حرارتی ساختمان‌ها	کاهش شدت روشنایی	کاربرد فرایندهای با راندمان بالا
افزایش بار استراتژیک	کاربرد انرژی الکتریکی به جای فسیلی	کاربرد پمپ حرارتی	کاربرد انرژی الکتریکی بجای فسیلی
تعطاف پذیری بار	کنترل سیکلی	کنترل سیکلی	کنترل سیکلی

پس از شناخت منحنی بار واحد صنعتی و در پی آن، منحنی بار مطلوب و مطالعه مدیریت پذیری فرایند، لازم است روش‌های فوق در جهت اصلاح منحنی بار مورد استفاده قرار گیرد.

سه روش اول نشان داده شده در شکل شماره (۱-۱)، تکنیک‌های قدیمی و سه روش دیگر، روش‌های نسبتاً جدیدتری را معرفی می‌نمایند. در روش اول پیک سابی توسط کنترل مستقیم بارهای غیر ضروری در هنگام زمان پیک صورت می‌پذیرد. به همین ترتیب در روش دوم، بارهای مورد نیاز و غیر ضروری در زمان غیر پیک وارد شبکه می‌شوند. جایجایی پیک بار نیز بدون اختلال در امر تولید پروسه توسط برنامه‌ریزی‌های بهینه صورت می‌پذیرد. در این بخش استفاده از تأسیسات ذخیره‌سازی انرژی آثار بسیار مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. روش چهارم (صرفه‌جویی استراتژیک) با تغییر الگوی مصرف در بخش‌های مختلف، مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

در این روش مصرف کنندگان انرژی الکتریکی با استفاده از روش‌هایی نظیر تشویق مالی و غیره، کاهش مصرف انرژی الکتریکی را بدون اعمال کنترل و برنامه خاص انجام می‌دهند.

در این حالت رشد فناوری تجهیزات مصرف کننده‌های انرژی الکتریکی نیز به طور طبیعی باعث کاهش مصرف می‌گردد. در روش پنجم نیز رشد مصرف انرژی در کنار روش دوم (پیر کردن دره منحنی بار) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت تعطاف پذیری مصرف کننده انرژی الکتریکی بعنوان یک روش مدیریت بار مطرح شده است. در این روش نیز قابلیت اعتماد در بهره‌برداری انرژی الکتریکی مصرف‌کننده توسط بکارگیری برخی از تجهیزات مدرن محدود می‌گردد، به‌طوری که میزان انرژی مصرف کننده توسط تولید کننده تحت کنترل و برنامه‌ریزی قرار می‌گیرد. روش مزبور به فناوری پیشرفته و هزینه بالا نیاز دارد. در عوض، اثرات اصلاح منحنی بار در آن بسیار، مؤثرتر از سایر روش‌ها می‌باشد.



شکل شماره ۱-۱: روش‌های اصلاح منحنی بار

۳-۲- پارامترهای لازم برای مدیریت بار

الف- منحنی بار و توزیع تداوم بار

نمایش تغییرات توان الکتریکی هر مصرف کننده برق در یک بازه زمانی مشخص منحنی بار گفته می‌شود. تغییرات زمان بر حسب ثانیه، دقیقه، ساعات، شبانه‌روز، هفته و ماه قابل تعیین است. بررسی توانانات مصرف برق از شبکه به منظور تعیین حدود ساعات پیک و غیر پیک، حداکثر و حداقل توان تولیدی نیروگاه‌ها و تعیین ضریب بار در قالب منحنی بار شبکه قابل بررسی است.

به منظور بررسی توزیع بار بر حسب زمان در یک مجموعه مصرف کننده برق، لازم است در فیدرهای^۱

1. Feeder

اصلی توسط دستگاه آنالیزور اندازه‌گیری بعمل آید. برای بررسی جزئی‌تر تجهیزات مصرف کننده برق با فرایندها و بخشهای مختلف کار باید فیدر توزیع برق بعد از فیدر اصلی با نصب دستگاه مورد اندازه‌گیری قرار گیرند. با توجه به سیکل فرایند تولید مدت اندازه‌گیری بر حسب یک شیفت کاری یک شبانه‌روز یا یک هفته تعیین می‌شود. نمودارهای استخراج شده از دستگاههای اندازه‌گیری که بیانگر تغییرات توان مصرفی بر حسب زمان می‌باشد. منحنی بار مربوط به هر فیدر می‌باشد. تعیین تراز انرژی الکتریکی، ضریب بار، وضعیت دیماند در ساعات پیک و غیر پیک، حداکثر و حداقل توان مصرفی با مشخص شدن زمان وقوع، پارامترهایی هستند که از منحنی بار قابل استخراج و بهره‌برداری است.

ب- ضریب تقاضا (D.F)

شرکت‌های تولید و توزیع برق به حداکثر مصرف برق روزانه مشترکین نیاز دارند. چرا که این عامل ظرفیت نیروگاهی را که آنها باید نصب کنند تا پاسخگوی نیازهای توانی مصرف کنندگان باشد را تعیین می‌کند. این مقدار به وسیله ضریب تقاضا بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$DF = \frac{D_{max}}{CL} \quad \text{رابطه شماره (۱-۱)}$$

که در آن:

D_{max} : تقاضای حداکثر (KW)

CL : بار متصل شده (KW)

ضریب تقاضا در حالت عادی کمتر از واحد است، محدوده نمونه مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۹ می‌باشد. عموماً دیماند (توان درخواستی) خریداری شده توسط مشترکین برق از وزارت نیرو بیشتر از دیماند مصرفی است. در برخی موارد این اختلاف بسیار زیاد می‌باشد. این در حالی است که اضافه بودن دیماند موجب افزایش هزینه برق می‌شود. افزایش هزینه اولیه باعث خرید انشعاب با قدرت بالا و از طرفی افزایش هزینه جاری بدلیل پرداخت ماهیانه بهای دیماند ناشی از عدم برآورد مناسب می‌باشد. جدول پیشنهادی زیر در تعیین دیماند واقعی و کم کردن اختلاف دیماند قراردادی با دیماند مصرفی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

مصرف‌کننده	شیفت		
	اول (KW)	دوم (KW)	سوم (KW)
A_1	P_1	P_1	
A_2		P_2	P_2
A_3	P_3		P_3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
جمع	D_1	D_2	D_3

دیماند مورد نیاز برابر است با بیشترین مقدار از بین D_1, D_2, D_3 ($D = D_{\max}$)

دیماند: خریداری شده (دیماند قراردادی یا شرکت برق)

دیماند مصرفی (دیماند واقعی که معمولاً متغیر می‌باشد)

دیماند محاسباتی (حداقل ۹۰ درصد دیماند خریداری شده)

ج- ضریب بار^۱

ضریب بار پارامتر دیگری است که توانایی کارخانه را برای استفاده مؤثر از الکتریسته اندازه‌گیری می‌کند. در عمل این ضریب، نسبت بار متوسط برای دوره زمانی داده شده به حداکثر باری را که در خلال همان دوره زمانی رخ می‌دهد را اندازه می‌گیرد. مؤثرترین شکل مصرف، زمانی رخ می‌دهد که ضریب بار در زمانی که E حداقل شده است، در بالاترین مقدار ممکن باشد (همیشه کمتر از یک می‌باشد) ضریب بار به این شکل تعریف می‌شود:

$$LF = \frac{E}{(D_{\max})(P)} \quad \text{رابطه شماره (۲-۱)}$$

که در آن:

LF: ضریب بار (بدون بعد)

E: انرژی مصرف در دوره زمانی P (KWh)

$D_{\max}$: حداکثر تقاضا در طی دوره زمانی P (KW)

P: دوره زمانی که در آن ضریب بار تعیین می‌شود (برای مثال یک روز، یک ماه، یک سال)

راههای افزایش ضریب بار

عدم راهاندازی همزمان موتورهای الکتریکی

کاهش ضریب همزمانی ماشین آلات هر مصرف

کاهش دیماند اضافی واحد صنعتی

د- توان اکتیو و توان راکتیو

توان اکتیو مقدار توان مفیدی است که در تجهیزات برق به مصرف می‌رسد، و از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

- مصرف کنندگان تک فاز:

$$P = VI \cos \phi$$

رابطه شماره (۳-۱)

- مصرف کنندگان سه فاز:

$$Q = \sqrt{3} VI \sin \phi$$

رابطه شماره (۴-۱)

بنابراین هر مصرف کننده برق غیر اهمی به مجموع توان‌های اکتیو و راکتیو نیاز دارد البته با توجه به ماهیت تغییرات جریان و ولتاژ به صورت شکل موج سینوسی توان کل یا توان ظاهری (S) از جمع برداری توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) بدست می‌آید.

$$\bar{S} = \bar{P} + \bar{Q}$$

رابطه شماره (۵-۱)

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

رابطه شماره (۶-۱)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

کسینوس زاویه بین S و P (ϕ) را ضریب قدرت ($\cos \phi$) گویند.

ه- ضریب توان P.F.

همانطور که ذکر شد در حالت عمومی، توان ظاهری بر حسب KVA که باید برای بار تأمین شود، جمع برداری توان اکتیو بر حسب کیلووات (KW) و توان راکتیو بر حسب (KVAR) است:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

که در آن:

S: توان ظاهری (KVA)

P: توان حقیقی (اکتیو) (KW)

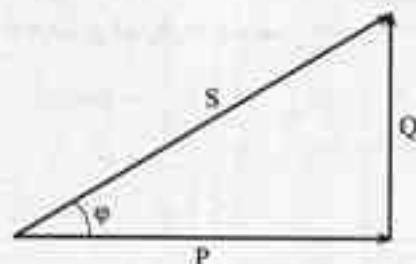
Q: توان راکتیو (KVAR)

پارامتر مفید دیگر، ضریب توان است که از این رابطه بدست می‌آید:

$$P.F. = \frac{P}{S} = \cos \phi$$

رابطه شماره (۷-۱)

این روابط در شکل زیر ترسیم شده‌اند.



ضریب توان همیشه کوچکتر یا مساوی یک است. مقادیر بالاتر (نزدیک به یک)، برای ضریب توان مطلوب می‌باشند. زیرا حاکی از آن است که مؤلفه راکتیو بار کوچکتر است. مقدار کم آن به معنی بزرگ بودن مؤلفه راکتیو است.

اهمیت ضریب توان مربوط به مؤلفه راکتیو بار است. اگر چه مؤلفه راکتیو توان تلف شده نیست (این مؤلفه در میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی ذخیره می‌شود)، تجهیزات پست‌های فشار قوی و سیستم توزیع باید به اندازه‌ای باشند که از عهده جریان مورد نیاز توان ظاهری با جمع‌برداری مؤلفه‌های توان اکتیو و راکتیو برآیند. این کار مستلزم سرمایه و هزینه‌های عملیاتی عظیمی است. هزینه‌های عملیاتی به دلیل تلفاتی که هنگام تأمین مؤلفه راکتیو بار بوجود می‌آید، افزایش پیدا می‌کند.

ضریب توان را می‌توان با افزودن خازن‌هایی به بار، به منظور جبران بخشی از راکتانس القایی بهبود بخشید. سودمندی این روش بستگی به جنبه‌های اقتصادی هر مورد خاص دارد و عموماً نیازمند بررسی و تحلیل دقیق است.

تأثیرات منفی پائین بودن ضریب قدرت

افزایش هزینه برق

افزایش هزینه تجهیزات به لحاظ بزرگتر شدن اندازه آنها

(مانند: کلیدها- فیوزها- کابل‌ها- ترانسفورماتورها)

ایجاد تلفات انرژی الکتریکی در خطوط انتقال و توزیع

کاهش راندمان ترانسفورماتورها

روش‌های اصلاح ضریب قدرت

- ♦ استفاده از موتورهایی که خوب طراحی شده‌اند
- ♦ حتی الامکان استفاده از موتورهای که با سرعت زیاد به جای موتورهای با سرعت کم
- ♦ پرهیز از انتخاب موتور با توان نامی بزرگتر از بار
- ♦ نصب خازن
- ♦ در صورت امکان استفاده از موتور سنکرون

۲-۴- روش‌های اندازه‌گیری قدرت و انرژی الکتریکی

روش‌های اصلی اندازه‌گیری انرژی، ابزار مهمی برای مدیران انرژی به شمار می‌روند. اندازه‌گیری انرژی است که می‌توان به کمک آن داده‌های اضافی (برای تکمیل بررسی انرژی و پایش داده‌ها) را به دست آورد همچنین پایش گاهی اوقات مشکلات بالقوه‌ای را آشکار می‌سازد که آنها را می‌توان توسط اندازه‌گیری تعریف و اصلاح نمود.

جنبه دیگر اندازه‌گیری انرژی حسابرسی است و در هر برنامه کارآمد مدیریت انرژی، حسابرسی، یک امر اساسی می‌باشد. حسابرسی معمولاً به عنوان مسئولیت فروشنده انرژی شناخته می‌شود. اما وظیفه فروشنده انرژی کاملاً با مدیریت انرژی متفاوت است. وظیفه فروشنده انرژی این است که بر میزان انرژی تحویل شده به یک مشتری نظارت کند و با گرفتن نرخهای مناسب برای صورت حسابها، هزینه مشتری را محاسبه کند. ولی مدیر انرژی می‌خواهد بداند که انرژی در کجا و چگونه مصرف می‌شود و معمولاً به جزئیات آن علاقه‌مند است. در این رابطه، حسابرسی، سه وظیفه اصلی را برآورده می‌سازد.

۱- اطلاعاتی راجع به نرخ مصرف انرژی به دست می‌دهد و لذا می‌تواند برای ارزیابی کارایی روش‌های

مدیریت انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- می‌تواند اطلاعاتی فراهم آورد که برای کنترل مصرف انرژی و باقی ماندن در محدوده مرزها یا حدود مشخص شده مفید باشد.

۳- اطلاعاتی راجع به کیفیت اجرای برنامه مدیریت به مدیران انرژی باز می‌گرداند.

یکی از دلایل اساسی لزوم حسابرسی این است که اطلاعات حاصل از آن می‌تواند به خودی خود به استفاده کارآمدتر از انرژی کمک کند. تجربه نشان می‌دهد که اگر مدیران انرژی اطلاعات حسابرسی شده برای مجموعه خود را دریافت کنند و آن را بازرینی نمایند، صرفاً اطلاع از میزان انرژی مصرفی می‌تواند به صرفه‌جویی در هزینه و انرژی منجر شود.

اندازه‌گیری را می‌توان هم با استفاده از دستگاههای موقتی و هم دستگاههای دائمی انجام داد. تجهیزات می‌توانند قابل حرکت یا ثابت باشند. اصولاً ابزارهای دقیق را می‌توان به سه گروه تقسیم نمود:

♦ ابزارهای قابل حرکت و دستی

♦ دستگاههای ثابت موقتی که قابلیت ثبت یا نشان دادن کمیت را به مدت چندین ساعت، روز و یا هفته دارا می‌باشند.

♦ دستگاههای ثابت دائمی

کلیه دستگاههایی که برای اندازه‌گیری انرژی به کار می‌روند، این کار را به طور غیر مستقیم انجام می‌دهند. به عنوان مثال، دستگاه سنجش کیلووات ساعت مقدار متوسط جریان الکتریکی را اندازه‌گیری کرده و از روابط معلوم ولتاژ و ضریب قدرت برای تعیین انرژی کل بهره می‌گیرد.

الف - کتور وات ساعت

واحد اصلی انرژی الکتریکی، وات ساعت می‌باشد و آن عبارت است از انرژی مصرف شده در مدت یک ساعت هنگامی که توان یک وات باشد. انرژی معمولاً بر حسب کیلووات ساعت (۱۰۰۰ وات ساعت) به وسیله کتور کیلووات ساعت (KWh) اندازه‌گیری می‌شود. توجه گردد که هر ۳۶۰۰ کیلو ژول معادل یک کیلو وات ساعت می‌باشد ($1 \text{ KWh} = 3600 \text{ KJ}$).

کتورهای کیلووات ساعت موتورهای کوچکی می‌باشند که سرعت آنها متناسب با قدرت مصرفی است. اجزای اصلی یک کتور کیلووات ساعت عبارتند از:

- ۱- یک سیم پیچ مولاری (یا ولتاژ)
- ۲- یک سیم پیچ سری (یا جریان)
- ۳- یک سیم پیچی جبرانی
- ۴- یک جزء دوار
- ۵- یک مکانیزم ثبت‌کننده

جزء (دیسک) دوار یک مکانیزم ثبت‌کننده را به کار می‌اندازد که مصرف انرژی بر روی آن نشان داده می‌شود. کتورهای جریان متناوب از اصل میدان مغناطیسی دوار موتور القایی استفاده می‌کنند. شار مغناطیسی متناوب حاصله از قطبها، جریانهایی را در دیسک به وجود می‌آورد. نتیجتاً گشتاوری به وجود می‌آید که متناسب است با حاصلضرب لحظه‌ای جریانهای گردابی در دیسک و شار حاصله از قطبی که جریان حول آن جاری است. این گشتاور باتوان مصرفی در مدار متناسب است. عمل به تأخیر انداختن لازم یا گشتاور شمارنده یا استفاده از تأثیر آهن رباهای دائمی بر همان دیسک حاصل می‌شوند.

سیستم‌های چهار سیمه به جز در حالتی که متوازن شده باشند نیاز به سه کتور تک فاز دارند. کتورهای سه جزئی با سه دیسک محرک - ترمز بر روی یک محور ساخته می‌شوند و از آنها می‌توان به جای سه کتور تک فاز استفاده نمود.

در صورتی که ظرفیت مدار بالاتر از ۲۰۰ آمپر باشد، معمولاً از ترانسفورماتورهای جریان استفاده می‌شود تا جریان به ۵ آمپر کاهش یابد. در ولتاژهای بالاتر از ۲۸۰ ولت از ترانسفورماتورهای ولتاژ نیز استفاده می‌گردد تا ولتاژ به ۱۲۰ ولت کاهش یابد.

بسیاری از اعداد تعیین‌کننده دقت را می‌توان از سازندگان به دست آورد. اما برای تعیین شرایط دقیق کتورها اطلاعات زیادی مورد نیاز است. با فرض یک سری شرایط خاص معمولاً فرض می‌شود که کتورهای کیلووات ساعت مقدار الکتریسته مصرفی را با خطای دو درصد یا کمتر ثبت می‌کنند. نصب کتور KWh به عواملی بستگی دارد که عبارتند از: محل نصب کتور، نوع و ظرفیت کاری، و نیز نوع فعالیت‌های مجموعه.

ب- کنتورهای حداکثر دیماند (تقاضا)

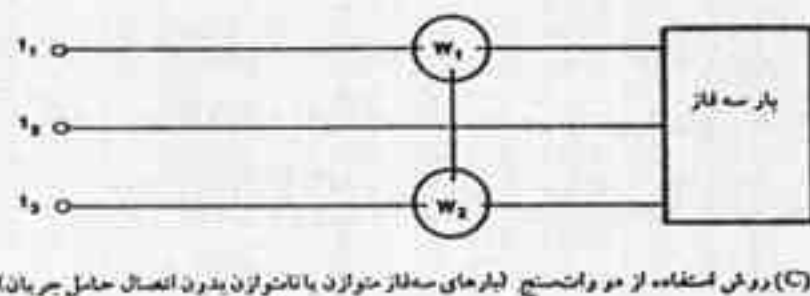
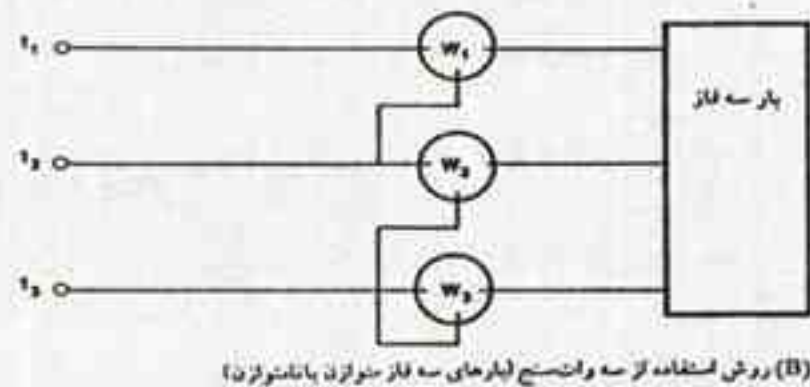
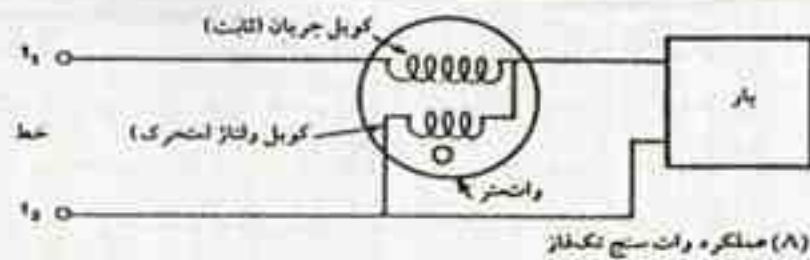
از آنجائی که کنتور KWh اصولاً یک وات سنج کلی است می‌توان از آن برای تعیین توان نیز استفاده نمود و این کار با اندازه‌گیری KWh ثبت شده در یک مدت خامن انجام می‌شود. برخی از کنتورهای KWh دارای یک نشان دهنده و درجه‌بندی اضافی می‌باشند. این نشان‌دهنده متناسب با سرعت دیسک کنتور به بالای درجه‌بندی حرکت داده شده است. بدین ترتیب این دستگاه اوج نیاز حاصل از بار را نشان می‌دهد. این نوع کنتور را باید به صورت دوره‌ای بر روی صفر تنظیم نمود.

ج- وات‌سنج

وات سنج معمولاً شبیه کنتور وات ساعت است. این دستگاه دارای دو سیم پیچ است. یکی ثابت که سیم پیچ جریان می‌باشد و یک سیم پیچ دیگر که قابلیت دوران دارد (سیم پیچ ولتاژ) شکل شماره (۲-۱) این کنتور را نشان می‌دهد که به یک بار تک فاز وصل شده است.

جریان ایجاد شده در سیم‌پیچ جریان، یک میدان مغناطیسی را ایجاد می‌کند که متناسب با شدت جریان است و سیم‌پیچ دوار (که یک عقربه یا درجه نشان دهنده را به کار می‌اندازد) را بحرکت در می‌آورد که مقدار آن با حاصلضرب این میدان در زاویه فاز بین این دو کمیت متناسب است. نتیجتاً این دستگاه میانگین توان را نشان می‌دهد.

برای دستگاه‌های سه فاز از اتصالات نشان داده شده در شکل (۲-۱) استفاده می‌شود. در روش استفاده از سه کنتور، توان کل مدار برابر است با مجموع مقادیر خوانده شده توسط سه کنتور. دستگاه‌هایی ساخته شده‌اند که دارای دو سری سیم‌پیچ جداگانه هستند که بر روی یک محور مشترک نصب شده‌اند و دو وات سنج نشان داده شده در شکل (۲-۱) را ترکیب نموده و به یک دستگاه تبدیل می‌کنند.



شکل شماره ۱-۳: اندازه‌گیری توان الکتریکی

د- دستگاه‌های قابل حمل برای توان الکتریکی

د-۱- آمپرسنج چنگکی

دستگاه‌های رایج برای اندازه‌گیری جریان به صورت سری با مدار اندازه‌گیری بسته می‌شوند. اما در بعضی از موارد اتصال سری در مدار برای نصب آمپر سنج امکانپذیر نمی‌باشد. در این موارد آمپرسنج چنگکی به صورت القایی به مدار اتصال می‌یابد. این آمپرسنج از یک یکسو کننده استفاده می‌کند که به ثانویه یک ترانسفورماتور جریان اتصال می‌یابد این ترانسفورماتور به گونه‌ای ساخته شده است که هسته آن را می‌توان به طرز مناسبی دور یک هادی حامل جریان بست تا سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور جریان را تشکیل دهد.

سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور جریان و نیز سیم پیچ متحرک نشان دهنده دارای اتصال چندگانه هستند تا نسبت‌های جریان گوناگونی حاصل شود.

۵-۲- وات متر جنگکی

وسیله دیگری که در داخل خود یک ترانسفورماتور با هسته جداشدنی دارد وات متر جنگکی است. برای اندازه‌گیری توان در مدارهای تک فاز و چند فاز به کار می‌رود. این وسیله که ظاهراً آن شبیه آمپرسنج فوق‌الذکر است از یک وات سنج فرودبنامیک تشکیل شده است که میدان آن توسط هادی حامل جریان از طریق هسته تحریک می‌شود. با استفاده از یک سیستم متحرک فنر دار، ظرفیت مقیاس حاصله مستقیماً با مقاومت مدار پتانسیل مناسب است. با استفاده از این طرح می‌توان انتخاب محدوده اندازه‌گیری را با قطع و وصل کردن مدار پتانسیل توسط دست انجام داد.

۵-۳- ضریب قدرت سنج جنگکی

وسیله دیگر از این نوع دستگاه جنگکی برای اندازه‌گیری ضریب قدرت است. این وسیله میزان پیش فاز یا پس فاز ضریب قدرت در هر مدار سه فاز متعادل از ۱۰۰ تا ۶۰۰ ولت و از ۱۵ تا ۶۰۰ آمپر را اندازه‌گیری می‌کند. این وسیله در اصل یک گالوانومتر است که سیم‌پیچ آن در میدان مغناطیسی حاصل از جریان جاری شده در هادی یک خطی حرکت می‌کند.

سیم‌پیچ توسط مدار پتانسیل تحریک می‌شود. رابطه فاز در ولتاژ سیم‌پیچ توسط پتانسیومتری کنترل می‌شود که بین دو فاز وصل شده است. عقربه پتانسیومتر آنقدر چرخانده می‌شود که گالوانومتر متعادل می‌گردد (نقطه صفر) و جابجایی ولتاژ نسبت به جریان ۹۰° شود. در این شرایط می‌توان ضریب قدرت را مستقیماً از روی درجه بندی پتانسیومتر قرائت نمود.

۵-۴- دستگاه‌های A.C چند محدوده‌ای (آنالیزورهای توان)

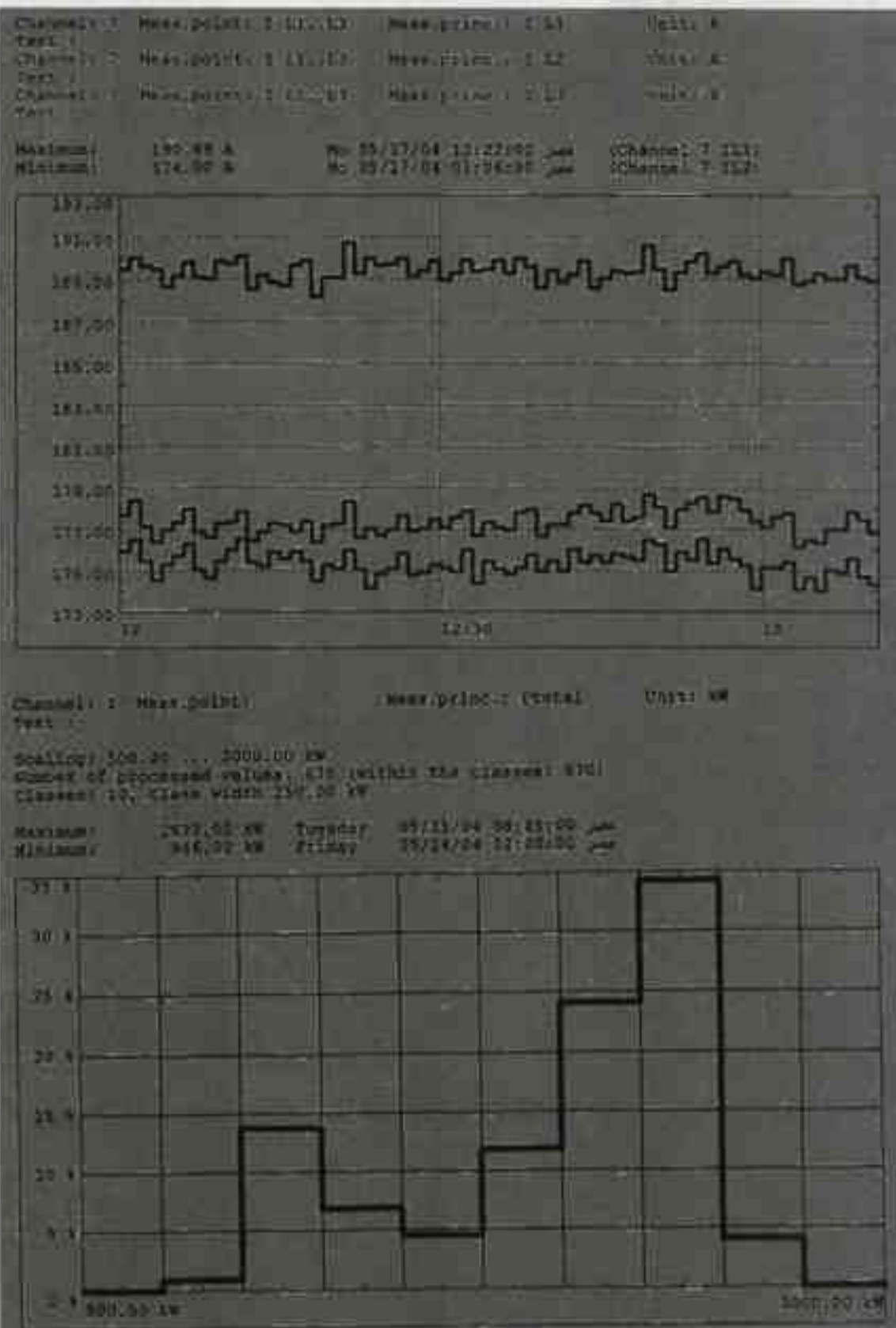
فیدرهای تغذیه بخش‌های اصلی کارخانه و فیدر اصلی در طی مدت حداقل ۲۴ ساعت و در بعضی موارد به مدت طولانی‌تر مورد اندازه‌گیری آنالیزورهای برق قرار می‌گیرند. پارامترهای مورد سنجش عبارتند از توان مصرفی (اکتیو- راکتیو)، ضریب قدرت و جریانهایی سه فاز می‌باشد. تغییرات منحنی بار مصرف کنندگان در قالب نمودار و شامل ماکزیمم و مینیمم دیماند مصرفی و همچنین مقدار انرژی الکتریکی مصرف شده بر حسب KWh در مدت اندازه‌گیری ارائه می‌گردد.

نمودار ضریب قدرت ($\cos\phi$) بیانگر تغییرات ضریب قدرت، حداکثر و حداقل آن طی مدت اندازه‌گیری است. در مقایسه این نمودار با نمودار منحنی بار نشان می‌دهد که با افزایش توان مصرفی مقدار ($\cos\phi$) افزایش و با کاهش ضریب قدرت مقدار ($\cos\phi$) کاهش می‌یابد. به عبارتی بهره‌برداری از حداکثر ظرفیت تجهیزات موجب بهبود ضریب توان می‌شود.

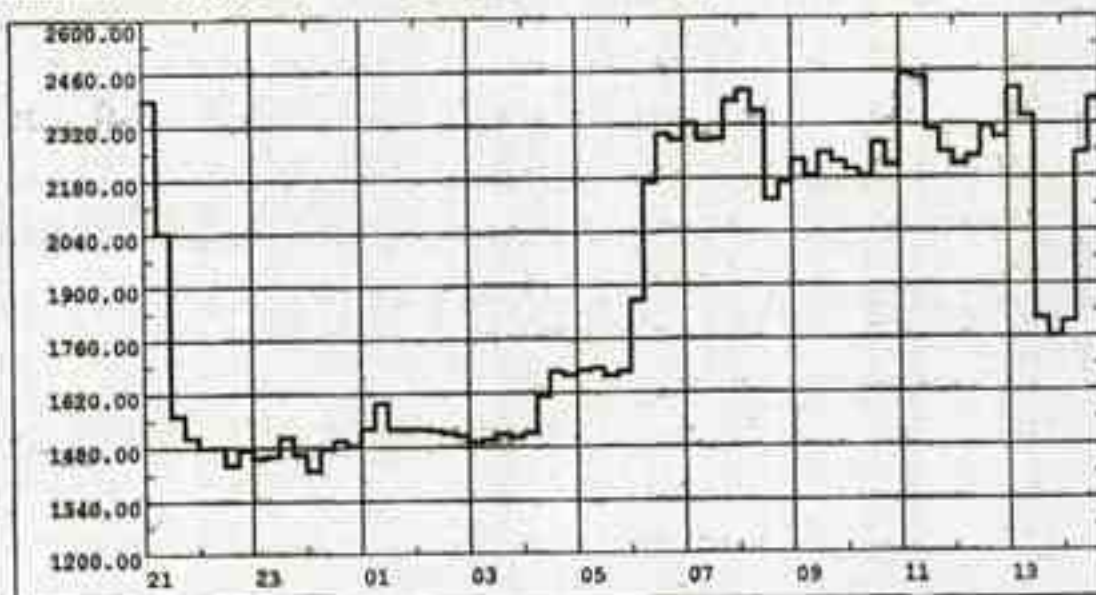
نمودار جریانهایی سه فاز که به سه رنگ مختلف برای هر فیدر قابل ترسیم است، تعادل مقدار جریان بین سه فاز را نشان می‌دهد. منطبق شدن هر سه نمودار روی هم بیانگر تعادل فاز کامل می‌باشد، و فاصله گرفتن

نمودارها از یکدیگر عدم تعادل مقدار جریان فازها را نشان می‌دهد. البته تطبیق کامل هر سه فاز معمولاً وجود ندارد چرا که مقدار جریانهای سه فاز در هر صورت تفاوت جزئی با هم دارند. لذا سهم درصدی مقدار جریان هر فاز بین ۳۲ تا ۳۴ درصد می‌باشد که در اینصورت گفته می‌شود تقارن جریان فازها برقرار است.

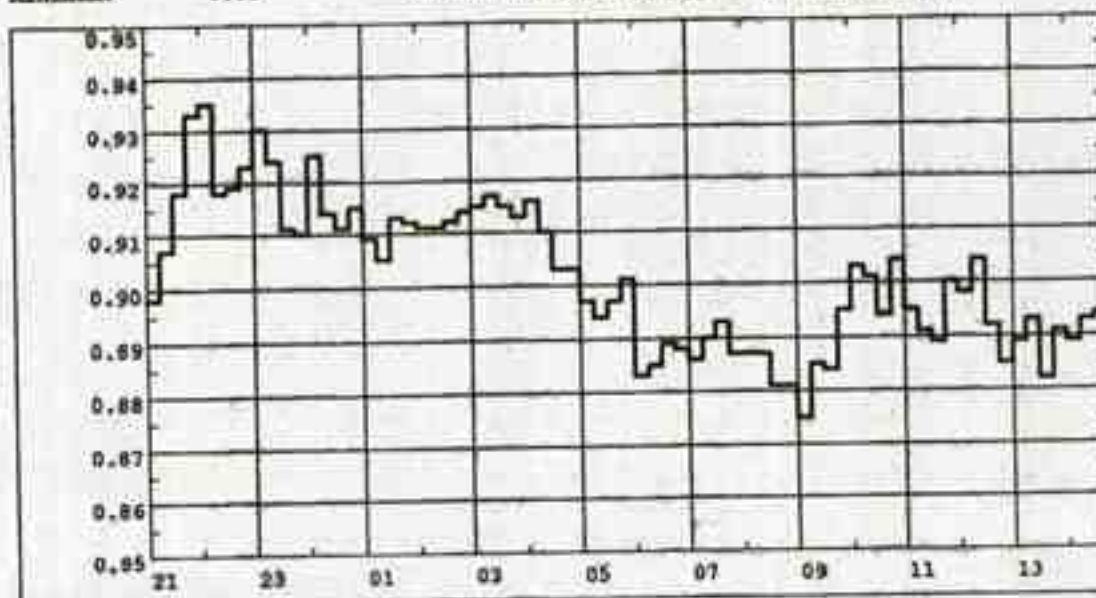
نمودار دیگری که در مدیریت انرژی قابل استفاده است نمودار هیستوگرام می‌باشد. در نمودار هیستوگرام، مصرف توانها بین حداکثر و حداقل مقدار مصرف شده در مدت اندازه‌گیری بر حسب درصدی از زمان بررسی شده بصورت نمودار ترسیم گردیده است. با یک نگاه به نمودار کاملاً مشخص می‌شود که بیشترین زمان بهره‌برداری از توان و یا ظرفیت یک الکتروموتور، ترانسفورماتور و یا یک دستگاه و همچنین دیماتد کارخانه در چه محدوده‌ای توان بوده است. به عبارتی نمودار نشان می‌دهد که آیا از ظرفیت نامی و یا نزدیک ظرفیت اسمی از یک مصرف‌کننده بهره‌برداری شده است یا خیر، که در صورت امکان اقدامات لازم باید صورت گیرد. نمونه‌ای از منحنی بار یک واحد صنعتی اندازه‌گیری شده در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



Channel: 1 Meas.point: Meas.princ.: Ptotal Unit: kW
 Text :
 Active energy: +33612.00 kWh -0.00 kWh
 Maximum: 2451.00 kW Tu 05/11/04 11:15:00 صبح (Channel 1 Pt)
 Minimum: 1419.00 kW Tu 05/11/04 12:15:00 صبح (Channel 1 Pt)



Channel: 5 Meas.point: Cos Phi Meas.princ.: Cos total Unit:
 Text :
 Maximum: 0.94 Mo 05/10/04 10:15:00 صبح (Channel 5 Cos)
 Minimum: 0.88 Tu 05/11/04 09:15:00 صبح (Channel 5 Cos)



شکل شماره ۱-۳: نمونه‌ای از منحنی بار یک واحد صنعتی اندازه‌گیری شده

۲-۵- اصلاح منحنی بار

منحنی بار شبکه سراسری طی مدت شبانه‌روز دارای وضعیت حداکثر و حداقل مصرف می‌باشد. حداکثر مصرف تقریباً دو برابر حداقل مصرف می‌باشد. مدت زمان حداکثر بار، ساعات اوج یا پیک مصرف شبکه و مدت زمان حداقل بار، ساعات کم باری شبکه نامیده می‌شود. ساعات پیک مصرف پس از غروب آفتاب و تاریک شدن هوا تا نزدیک نیمه شب اتفاق می‌افتد. در تعرفه‌های برق مدت تعیین شده برای ساعات پیک ۲ ساعت و زمان آن در شش ماهه اول سال با شش ماهه دوم، یک ساعت متفاوت است. در شش ماهه اول سال بین ساعات ۱۹ الی ۲۳ و در شش ماهه دوم سال بین ساعات ۱۸ الی ۲۲ می‌باشد. ساعات کم باری بعد از نیمه شب و یا کم شدن شدید مصرف‌کنندگان شروع می‌شود و تا اوایل صبح ادامه دارد. مدت تعیین شده برای ساعات کم باری بطور متوسط ۸ ساعت و زمان آن در شش ماهه اول از ساعت ۲۳ الی ۶ و در شش ماهه دوم از ساعت ۲۲ الی ۷ است. بقیه مدت شبانه‌روز، ساعات عادی تلقی می‌شود.

تفاوت زیاد مصرف بین ساعات پیک و غیر پیک از لحاظ تولید و عرضه برق، افزایش تلفات، ناپایداری و غیر اقتصادی بودن تأمین انرژی الکتریکی در نیروگاه‌ها را به دنبال دارد. لذا اصلاح منحنی بار شبکه و افزایش ضریب بار (L-F) مستقیماً متأثر از منحنی بار مصرف‌کنندگان است. تأمین توان در نیروگاه بستگی به دیماند مصرفی مشترکین دارد. مطالعه و انجام ممیزی در فرایندهای صنعتی، مدیریت در بخش‌های خانگی و تجاری راهکارهای افزایش ضریب بار و کاهش تقاضا در ساعات پیک را مشخص خواهد کرد.

همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید اقدامات کلی در تغییر و اصلاح منحنی بار عبارتند از:

۱- پیک شائی^۱

۲- دره پر کنی^۲

۳- انتقال بار^۳

۱- پیک شائی (حذف بار در ساعات پیک شبکه)- این روش در مورد بارهایی می‌تواند اعمال شود که به صورت غیر ضروری در ساعات پیک استفاده می‌شود و قطع آنها صدمه‌ای بر روند تولید از نظر کیفی و کمی ندارد.

۲- پر کردن دره (افزایش بار در ساعات غیر پیک شبکه)- در صورتی که در ساعات غیر پیک خصوصاً شب، مصرف پائین باشد، با افزایش آن باعث پر کردن دره در منحنی بار شبکه و در نتیجه بالا بردن ضریب بار شبکه می‌شویم. برنامه‌ریزی جهت ایجاد مصرف جدید در راستای افزایش تولید و یا طرح توسعه.

۳- انتقال پیک (انتقال بار از ساعات پیک به غیر پیک)- در واقع مهم‌ترین عامل در اجراء مدیریت بار و تأثیر آن بر روی منحنی بار انتقال بار از ساعات پیک به غیر پیک می‌باشد.

1. Peak Shaving

2. Valley Filling

3. Load Shifting

۳- تعرفه‌های برق و مدیریت تقاضا

۳-۱- تعرفه‌های برق بخش صنعت

اجزای تشکیل‌دهنده بهای برق بر اساس تعرفه‌های وزارت نیرو که در هر دوره قرائت کنتور در قبوض برق اعمال می‌شود به شرح ذیل است:

۱- بهای انرژی اکتیو: قیمت مصرف اکتیو به ازاء یک کیلووات ساعت (KWh/ریال)

۲- بهای دیماند: قیمت توان مصرفی به ازای یک کیلووات (KW/ریال)

۳- بهای انرژی راکتیو: هزینه مصرف انرژی راکتیو بیش از مقدار مجاز

۴- ضریب فصلی: افزایش ۲۰ درصد بهای برق در فصل تابستان

۵- اعمال ضرایب ساعات پیک و کم بازی طی مدت شبانه‌روز

موارد فوق و اعمال هر یک در تعیین کل هزینه برق یک واحد یا مشترک صنعتی، بهای برق در قالب دو گزینه ۱ و ۲ طبق تعرفه‌های تعیین شده از طرف وزارت نیرو، مورد محاسبه قرار می‌گیرد. مصرف کنندگان برق در ابتدای هر سال با توجه به شرایط مصرف برق کارخانه و وضعیت تولید، می‌توانند یکی از گزینه‌ها را انتخاب نمایند. لذا بهای برق برای هر دو گزینه در جداول ذیل آورده شده است.

قابل ذکر است قیمت در اینجا بر مبنای تعرفه‌های سال ۸۷ می‌باشد.

الف- بهای انرژی اکتیو

گزینه		فشار قوی (انشعاب روی ولتاژ ۶۳ کیلووات و بیشتر)		فشار متوسط (انشعاب روی ولتاژ ۱۱ کیلووات تا کمتر از ۶۳ کیلووات)		فشار ضعیف (انشعاب‌های روی فشار ضعیف ۳۰ کیلووات و بیشتر)	
		۱	۲	۱	۲	۱	۲
انرژی (kwh/ریال)	میان بازی	۱۳۲,۵۱	۱۵۰,۳۱	۱۲۲,۴۶	۱۴۲,۱۹	۱۶۱,۵۳	۱۸۲,۶۸
	اوج بار	۲۴۳,۹۶	۲۹۶,۱۷	۲۷۰,۰۱	۵۳۵,۳	۵۳۳,۱۲	۶۰۲,۷۷
	کم بازی	۳۳,۶۸	۳۷,۶۱	۳۵,۶۴	۲۰,۵۵	۴۰,۴۴	۲۵,۶۷

ارقام در جدول فوق به ریال می‌باشد (قیمت یک کیلووات ساعت انرژی اکتیو)

انشعاب فشار قوی شامل کلیه انشعاب‌های بیش از ۶۳ کیلووات می‌باشد.

انشعاب فشار متوسط شامل کلیه انشعاب‌ها با ولتاژ بیش از ۱۱ کیلووات و کمتر از ۶۳ کیلووات می‌باشد.

انشعاب فشار ضعیف شامل کلیه انشعاب‌ها با ولتاژ کمتر از ۱۱ کیلووات تا قدرت بیش از ۳۰ کیلووات می‌باشد.

ب- بهای دیماند

بهای یک کیلووات دیماند قراردادی (KW/ریال)

گزینه		۱	۲
دیماند (kwh/ریال)		۱۱۸۷۰,۱	۵۹۳۵,۰۵

نحوه محاسبه هزینه دیماند

دیماند	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
مصرفی	کمتر از ۹۰ درصد دیماند قراردادی	بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد دیماند قراردادی	بیش از ۱۰۰ درصد دیماند قراردادی
محاسبی	۹۰ درصد دیماند قراردادی	دیماند خوانده شده	۱۰۰ درصد دیماند قراردادی و جریمه

دیماند قراردادی، مقدار توان بر حسب کیلووات (KW) که از وزارت نیرو توسط مشترک خریداری شده است. دیماند مصرفی، مقدار حداکثر توان مصرفی یک واحد صنعتی در یک دوره قرائت کتور که توسط ماکسیمتر ثبت شده است.

دیماند محاسبی، مقدار توان مورد محاسبه بر مبنای جدول فوق برای دریافت کل هزینه دیماند می‌باشد.

ج- بهای انرژی راکتو

با توجه به محدوده ضریب قدرت ($\cos \phi$) که حداقل مجاز آن ۰/۹ می‌باشد، اعمال هزینه انرژی راکتو (KVAR) در قبوض برق نیاز به محاسبه ضریب قدرت ($\cos \phi$) مصرف‌کننده می‌باشد. ضریب زیان تعیین‌کننده هزینه راکتو است که از روابط زیر بدست می‌آید.

$$\text{رابطه شماره (۸-۱)} \quad \text{مصرف اکتو} = \sqrt{\text{ضریب قدرت } (\cos \phi) + (\text{مصرف انرژی راکتو})^2}$$

$$\text{رابطه شماره (۹-۱)} \quad \text{ضریب زیان} = \frac{0.9}{\cos \phi} - 1$$

هزینه انرژی راکتو در یک دوره مشخص قرائت کتور یا یک مرحله صدور قبض برق، برابر است با حاصل ضرب عدد ضریب زیان در مجموع هزینه دیماند و هزینه انرژی.

حداکثر بهای انرژی راکتو در بخش تولید صنعت و معدن ۱۳۷/۲۹ ریال به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد.

د- ضریب فصلی

به علت افزایش مصرف برق در فصل تابستان بهای برق شامل بهای انرژی، بهای دیماند و هزینه راکتو به میزان ۱۵ درصد در ماه‌های تیر و شهریور و به میزان ۳۰ درصد در ماه مرداد نسبت به سایر فصول سال بیشتر است.

با احتساب ۳۰٪ ضریب فصلی ماه مرداد

نوع مصرف		نوع متوسط		نوع قوی		نوع	
انرژی‌های دوی قمار حریف ۳۰ (کیلووات و بیشتر)		انرژی‌های دوی قمار حریف ۳۰ (کیلووات و بیشتر)		انرژی‌های دوی قمار حریف ۳۰ (کیلووات و بیشتر)		انرژی‌های دوی قمار حریف ۳۰ (کیلووات و بیشتر)	
۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱
۲۳۷,۲۸	۲۰۹,۹۸	۲۱۰,۸۴	۱۸۵,۱۹	۱۹۵,۲۰	۱۷۴,۸۶	۱۷۴,۸۶	۱۷۴,۸۶
۷۸۳,۶۰	۶۹۳,۰۵	۶۹۵,۸۹	۶۱۱,۰۱	۶۲۵,۰۲	۵۷۷,۱۴	۵۷۷,۱۴	۵۷۷,۱۴
۵۹,۳۷	۵۲,۵۷	۵۲,۷۱	۴۶,۳۳	۴۸,۸۹	۴۳,۷۸	۴۳,۷۸	۴۳,۷۸

با احتساب ۱۵٪ ضریب فصلی ماه‌های تیر و شهریور

فشار ضعیف (استانهای روی فشار ضعیف ۳۰ کیلوولت و بیشتر)		فشار متوسط (استان روی ولتاژ ۱۱ کیلوولت تا کمتر از ۳۳ کیلوولت)		فشار قوی (استان روی ولتاژ ۶۳ کیلوولت و بیشتر)		میزان انرژی (kWh)	
۲	۱	۲	۱	۲	۱		
۲۱۰,۰۸	۱۸۵,۷۵	۱۸۶,۵۱	۱۶۳,۸۲	۱۷۳,۸۵	۱۵۴,۶۸	میان باری	
۶۹۳,۱۸	۶۱۳,۰۸	۶۱۵,۵۹	۵۴۰,۵۱	۵۷۰,۵۹	۵۱۰,۵۵	اوج بار	
۵۲,۵۲	۴۶,۵۰	۴۶,۶۳	۴۰,۹۸	۴۳,۲۵	۳۸,۷۳	کم باری	

ه- ضرایب ساعات پیک و کم باری

به منظور افزایش ضریب بار شبکه سراسری برق کشور و کاهش مصرف برق در ساعات پیک (مدت ۴ ساعت) و توزیع مناسب تر تقاضای توان، ضرایب افزایش و کاهش بهای برق در قالب کتورهای دو تعرفه و سه تعرفه مطابق جدول زیر می‌باشد.

ساعات عادی		ساعات پیک		ساعات کم باری	
۷-۱۹		۱۹-۲۳		۲۳-۷	
۶-۱۸		۱۸-۲۲		۲۲-۶	
شش ماهه اول		شش ماهه دوم		مدت	
نوع کنتور		ضرایب محاسبه -			
دو تعرفه		۱/۸			
سه تعرفه		۰/۲۵			

تعیین ضریب قدرت و ضریب زیان

اطلاعات واقعی استخراج شده از یک دوره قبض برق صنعتی در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است.

نوع کتور: سه تعرفه

مصرف اکتیو ساعات عادی (معمولی): ۲۸۳۲۰۰ (KWh)

مصرف اکتیو ساعات پیک (اوج بار): ۷۵۲۰۰ (KWh)

مصرف اکتیو ساعات کم باری: ۱۶۷۲۰۰ (KWh)

مصرف انرژی راکتیو: ۵۲۲۰۰۰ (KVAR)

محاسبات جهت تعیین ضریب قدرت، ضریب زیان، هزینه راکتیو و هزینه کل برق:

$$(KWh) 525600 = 283200 + 75200 + 167200 = \text{کل مصرف اکتیو}$$

$$\cos \phi \text{ ضریب قدرت} = \frac{525600}{\sqrt{(525600)^2 + (522000)^2}} = 0.71$$

$$\text{ضریب زیان} = \frac{0.9}{0.71} - 1 = 0.2712$$

(هزینه دیماند + هزینه انرژی اکتیو) $\times 0.2712$ = هزینه راکتیو

هزینه دیماند + هزینه اکتیو + هزینه راکتیو = کل هزینه برق

۲-۳- توصیه‌های مدیریت بار در دو کارخانه

- مدیریت در کارخانه شماره ۱

جابجایی بار^۱

پیک سایی را می‌توان از طریق مهار مستقیم بخشی از مصارف انجام داد، با توجه به سه شیفت بودن بخش‌های مختلف کارخانه، امکان پیک‌سایی در این قسمت‌ها مستقیماً امکان‌پذیر است اما تغییر ساعات کاربری ماشین‌آلات و دستگاه‌های ناپیوسته^۲ و انتقال آنها به ساعات غیر پیک صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را در پی خواهد داشت.

با بررسی‌های بعمل آمده در واحدهای سنگ‌شکن و بالمیل‌های دوغاب معمولی، این واحدها را می‌توان در زمان اوج بار خاموش کرده تولید این واحدها را به ساعات غیر پیک منتقل نمود.

با توجه به ظرفیت مخزن بالمیل‌های دوغاب و ظرفیت تولید واحد خشک کن افشانه‌ای^۳ امکان خاموش نمودن دستگاهها در ساعات اوج بار وجود دارد. در این صورت میزان صرفه‌جویی بعمل آمده به شرح زیر خواهد بود:

میانگین توان مصرفی واحد سنگ شکن در ساعات اوج بار 7 KW

میانگین توان مصرفی ۱۲ واحد بالمیل‌های دوغاب در ساعات اوج بار 375 KW

ظرفیت مخزن بالمیل‌های دوغاب $190 \text{ m}^3 \times 1.6 = 304 \text{ Ton}$

میزان صرفه‌جویی بعمل آمده حاصل از جابجایی پیک

$$148.8 \times (\text{روز}) \times 300 \times (\text{ساعت}) \times 4 (\text{KW}) = 382$$

$$= (\text{تفاوت ضریب عادی با اوج بار}) \times 0.82 \times (\text{قیمت پایه انرژی در سال ۸۷ برای کتورهای دو تعرفه به ریال})$$

$$\text{ریال در سال } 560000000$$

با نصب کتور سه تعرفه صرفه‌جویی هزینه حاصل از جابجایی پیک به شرح ذیل خواهد بود:

$$\text{ریال } 1070000000 = (\text{ریال } 270.8 - 37.2) \times \text{روز } 300 \times \text{ساعت } 4 \times 382 \text{ KW}$$

در مجموع جابجایی پیک با کتور دو تعرفه معادل ۵۶ میلیون ریال و با کتور سه تعرفه ۱۰۷ میلیون ریال در سال صرفه‌جویی هزینه برق خواهد داشت.

با بررسی بعمل آمده بر روی قبوض برق مربوط به سالهای ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ مشخص گردید که بهای برق محاسباتی کارخانه در قالب گزینه ۲ انجام می‌شود. با تجزیه و تحلیل قبوض ۵ ماه که شامل مصرف برق ۱۷۰ روز می‌باشد، مجموع بهای برق این تعداد روز ۱۵۷۲۰۰۰۰۰۰ ریال بوده که با انتخاب گزینه ۱ مجموع بهای برق

1. Load Shifting
2. Batch Instruments
3. Spray Drier

برای همین تعداد روز یا همان مصارف ۱۴۸۷۰۰۰۰۰۰ ریال خواهد شد.
لذا انتخاب گزینه ۱ بجای گزینه ۲ حدوداً به میزان ۸۷ میلیون ریال طی ۱۷۰ روز معادل ۱۸۰ میلیون ریال (یک صد و هشتاد میلیون ریال) در طول سال کاهش هزینه برق بدنبال خواهد داشت. محاسبات در جدول صفحه بعد ارائه شده است.

انتخاب گزینه ۱:

ریال $180000000 = 170 + 870000000 \times 360$ صرفه جویی اقتصادی برای کارخانه در طول یکسال

جایگزینی کتور سه تعرفه

در کتورهای سه تعرفه ساعات عادی، اوج بار، کم باری به ترتیب ۱۲ ساعت، ۴ ساعت و ۸ ساعت می باشد که البته این زمانبندی برای کتورهای دو تعرفه ۲۰ ساعت برای ساعات عادی و ۴ ساعت برای اوج بار تعیین شده است.

کتور سه تعرفه		عادی	اوج بار	کم باری
ساعات فصل	زمستان	۶-۱۸	۱۸-۲۲	۲۲-۶
	تابستان	۷-۱۹	۱۹-۲۳	۲۳-۷
سهم زمانی تعرفه ها (درصد)		۵۰	۱۶/۷	۳۳/۳
ضریب محاسبه قیمت برق		۱	۳/۳	۰/۲۵

کتور دو تعرفه		عادی	اوج بار
ساعات فصل	زمستان	۲۲-۱۸	۱۸-۲۲
	تابستان	۲۳-۱۹	۱۹-۲۳
سهم زمانی تعرفه ها (درصد)		۸۳/۳	۱۶/۷
ضریب محاسبه قیمت برق		۱	۱/۸۲

با بررسی قبوض برق سالهای ۱۳۸۱-۲ و با توجه به اندازه گیری های انجام شده در طول دوره معین انرژی انرژی توسط دستگاههای آنالیزور توان و یا عنایت به اینکه استفاده از کتور سه تعرفه برای کلیه کارخانجات تا پایان سال ۱۳۸۳ اجباری گردیده است. لذا بررسی وضعیت انرژی مصرفی و هزینه برق کارخانه با استفاده از کتورهای سه تعرفه الزامی می باشد.

در صورت استفاده از کتور سه تعرفه و با عنایت به اندازه گیری های روزهای یکشنبه ۸۳/۲/۲۷ تا روز شنبه ۸۳/۳/۲ و با احتساب ضرایب ۱ برای ساعات عادی، ۳/۳ برای ساعات اوج بار و ۰/۲۵ برای ساعات کم باری سالانه در حدود ۱۵ میلیون ریال صرفه جویی اقتصادی شامل خواهد شد.
صرفه جویی اقتصادی حاصل از تعویض کتور ۱۵/۰۰۰/۰۰۰ ریال
هزینه نصب کتور سه تعرفه ۵/۰۰۰/۰۰۰ ریال
بازگشت سرمایه ۴ ماه می باشد.

استفاده از تعرفه جمعه

با توجه به اینکه برخی از تجهیزات و ماشین‌آلات کارخانه مانند کوره‌ها و... در روزهای جمعه نیز مشغول به کار می‌باشند استفاده از کتورهای تعرفه جمعه علاوه بر ثبت مصرف این بخشها، باعث کاهش هزینه برق نیز خواهد شد.

در روزهای جمعه، بهای انرژی ساعات اوج بار در مورد اشتراک‌های دارای کتور سه تعرفه با ضریب ۰/۷۶ محاسبه می‌شود و در مورد اشتراک‌های دارای کتور دو تعرفه بهای انرژی ساعات اوج بار و کم‌باری معادل بهای انرژی ساعات عادی می‌باشد.

مثال زیر را در نظر بگیرید:

انرژی مصرفی در ساعات اوج بار در روزهای جمعه در سال	۲۳۰۰۰۰ KWh/year
هزینه اوج بار مصرفی روزهای جمعه در کتور دو تعرفه در سال	۶۲۳۰۰۰۰۰ ریال
کاهش هزینه انرژی با استفاده از کتور تعرفه جمعه در سال	۱۲۹۰۰۰۰۰ ریال
هزینه نصب کتور تعرفه جمعه	۳۰۰۰۰۰۰ ریال
بازگشت سرمایه ۳ ماه می‌باشد.	

لازم به ذکر است هزینه‌های انرژی بر مبنای سال ۱۳۸۲ محاسبه گردیده است و هزینه نصب کتور سه تعرفه و جمعه جمعاً در حدود ۸۰۰۰۰۰۰ ریال می‌باشد.

- مدیریت بار در کارخانه شماره ۲

پیک سانی در آسیاب‌های دوغاب

(بالمیل‌های تهیه بدنه)

تولید سالانه بر اساس آمار دریافتی در مدت سه روز اندازه‌گیری از ۶ صبح مورخ ۷۷/۱۱/۲۷ الی ۶ صبح مورخ ۷۷/۱۱/۳۰ برابر است با:

$$12475 \text{ m}^2 = 37424 + 3 = \text{متوسط تولید روزانه}$$

$$4179013 \text{ m}^2 / \text{year} = 12475 \text{ m}^2 / \text{day} \times 335 \text{ day / year} = \text{متوسط تولید سالانه}$$

با توجه به ظرفیت تولید اسمی کارخانه، ۴/۰۰۰/۰۰۰ متر مربع در سال، تولید کاشی طی سه روز اندازه‌گیری مصرف برق در حد ظرفیت اسمی بوده است. مصرف انرژی الکتریکی سالانه بر اساس اندازه‌گیری برابر است با:

$$7313 \text{ KWh} = \text{میانگین مصرف انرژی الکتریکی روزانه}$$

$$2449855 \text{ KWh} = 7313 \times 335 = \text{میانگین مصرف انرژی الکتریکی سالانه}$$

درصد سهم مصرف و ضرایب هزینه برق در ساعات شبانه روز

نوع بار	اوج بار	معمولی	درصد سهم مصرف واقعی
۴۰/۵	۱۷/۵	۲۲	درصد سهم مصرف واقعی
۳۳	۱۷	۵۰	درصد سهم مصرف یکنواخت
۰/۴	۲/۵	۱	ضریب هزینه (K)

با توجه به جدول فوق و مصرف سالیانه 2449855 KWh در این واحد، هزینه سالیانه برق یا وضعیت فعلی طبق جدول زیر می‌باشد: محاسبه هزینه‌ها طبق رابطه زیر انجام شده است:

$$63.5 \times 1.05 \times K \times (\text{درصد سهم مصرف واقعی}) \times (\text{KWh سالیانه}) = \text{هزینه سالیانه هر نوبت (ریال)}$$

هزینه (میلیون ریال)	عادی	اوج بار	کم بار	جمع کل
۶۷/۲	۷۱	۲۶/۳۲	۱۶۴/۵	

جهت کاهش هزینه برق این واحد با مصرف سالیانه 2449855 KWh سه طرح مدیریت مصرف پیشنهاد می‌گردد. با توجه به مصرف 7313 KWh طی ۲۴ ساعت حاصل از اندازه‌گیری و توان هر بالملیل برابر 90 KW ، بالملیل ساعت مورد نیاز برابر است با:

$$7313 \div 90 = 81.3$$

با در نظر گرفتن مدت ۸ الی ۹ ساعت (میانگین ۸/۵ ساعت) برای هر دوره کار بالملیل، بطور متوسط تعداد بالملیل‌های مورد نیاز طی ۲۴ ساعت برابر است با:

$$81.3 \div 8.5 = 9.6$$

پس طی ۲۴ ساعت تعداد ۱۰ بالملیل موجود، بطور متوسط هر کدام تنها یکبار مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند:

ظرفیت مخازن ذخیره دوغاب با حجم 260 m^3 برابر است با:

$$260 \text{ m}^3 \times (1.57 \text{ ton} / \text{m}^3) = (408.2 \text{ ton})$$

مقدار دوغاب تولیدی از ۱۰ بالملیل در یک دوره کاری برابر است با:

$$10 \times 23 = 230 (\text{ton})$$

بنابراین مخازن موجود، گنجایش ذخیره‌سازی دوغاب، تا ۱/۵ برابر مقدار مورد نیاز را دارند.

با فرض اینکه عنوان ضریب رزرو بالملیل‌ها $(0 < r < 1)$ و $(r-1)$ ۱۰ تعداد بالملیل‌های مورد بهره‌برداری طی

۲۴ ساعت، سه طرح پیشنهادی به شرح زیر است:

پیک‌سائی در آسیاب‌های لعاب

متحتی بار طی ۴ روز مصرف برق دریافتی از فیدر این واحد، نشان می‌دهد که بالمیل‌ها تقریباً بطور یکنواخت در طول شبانه‌روز و بدون توجه به ساعات پیک مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در صورتی که با برنامه‌ریزی و باتوجه به ۱۱ ساعت کارکرد هر بالمیل در یک شارژ، ۲۸۰۰۰ لیتر مصرف روزانه لعاب، یا بکارگیری بالمیل‌ها در ۸ ساعت کم باری و ۳ ساعت از بار عادی تأمین می‌گردد.

- محاسبه هزینه فعلی مصرف برق:

$$4 \times 22 + 4 \times 15 = 148 \text{ (KW)} \quad \text{توان مورد نیاز:}$$

$$148 \text{ kw/day} \times 11 \text{ hr} \times 335 = 545400 \text{ (KWh)} \quad \text{مصرف سالیانه برق:}$$

$$12 + 8 \times 0.4 + 4 \times 2.5 + 24 \times 63.5 = 66.67 \text{ (ریال)} \quad \text{میانگین هزینه یک کیلووات ساعت:}$$

$$545400 \times 66.67 \times 1.05 = 38.18 \text{ (میلیون ریال)} \quad \text{هزینه فعلی مصرف برق:}$$

با اعمال مدیریت مصرف و انتخاب یکی از سه حالات ممکن پیشنهادی در جدول زیر ضمن پیک‌سائی شبکه، صرفه‌جویی در هزینه مصرف برق این واحد نیز حاصل خواهد شد.

در این جدول هزینه هر کیلووات ساعت مصرف برق بر اساس فعال بودن بالمیل‌ها در ۸ ساعت کم باری و ۳ ساعت از بار عادی محاسبه شده است که برابر است با:

$$8 \times 0.4 + 3 \times 1 + 11 \times 63.5 = 35.7 \text{ (ریال)}$$

کاهش هزینه مصرف برق نسبت به هزینه فعلی (۱۸/۲۸ میلیون ریال)

حالات ممکن	توان (KW)	حجم روزانه تولید لعاب	کیلووات ساعت سالیانه	هزینه سالیانه (میلیون ریال)	صرفه‌جویی نسبت به هزینه فعلی (میلیون ریال)
اول	$4 \times 4 \times 22 \times 15$	۸۰۰۰۰۲۰۰۰۰	۵۲۵۴۰۰	۲/۲۰	۸/۱۲
دوم	$5 \times 2 \times 22 \times 15$	۴۰۰۰۰۲۵۰۰۰	۵۱۵۹۰۰	۲/۱۹	۸/۱۸
سوم	$5 \times 5 \times 7 \times 15 \times 22$	۵۰۰۰۰۲۰۰۰۰۲۵۰۰۰	۴۸۸۳۰۰	۳/۱۸	۸/۱۹

۴- تلفات در سیستم‌های قدرت و راهکارهای کاهش آن

انرژی تولیدی در نیروگاه‌های برق پس از کسر مصرف داخلی نیروگاه‌ها بعنوان انرژی الکتریکی خالص به شبکه‌های انتقال تحویل می‌گردد و پس از طی مسیر خطوط، پست‌های انتقال، فوق توزیع و توزیع، بخشی از آن در سطوح انتقال و فوق توزیع و مانعی در سطح ولتاژ فشار متوسط و فشار ضعیف در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد.

در مسیر یاد شده، بخشی از انرژی تولیدی به دلایل ذیل تلف می‌شوند.

♦ خصوصیات ذاتی تجهیزات شبکه

- ♦ نامناسب بودن تجهیزات
- ♦ وجود مشکلاتی در شبکه
- ♦ استفاده غیرمجاز توسط برخی از مصرف‌کنندگان

آنچه که به مشترکین برق جهت استفاده در وسایل برقی تحویل می‌گردد، نسبت به انرژی تولید شده در نیروگاه‌ها و انرژی تحویل شده در ابتدای شبکه‌های انتقال تفاوت دارد که تحت عنوان مصرف داخلی نیروگاه و تلفات شبکه خوانده می‌شود و به غیر از بخشی از آن که ناشی از خصوصیات ذاتی تجهیزات شبکه است، بقیه قابل بررسی، کنترل و کاهش می‌باشد که البته بررسی اقتصادی هر فعالیت در راستای کاهش تلفات ضروری است تا هزینه و منافع آن تراز گردد.

عمده تلفات در ساعات اوج بار اتفاق می‌افتد که لازم است تأسیسات تولید، انتقال و توزیع برق متناسب با نیاز ساعات اوج بار احداث گردند و بدیهی است که این تأسیسات تنها چند ساعت در شبانه‌روز مورد استفاده کامل قرار خواهند گرفت. لذا با عنایت به این مسئله، باید سرمایه‌گذاری کلان برای تأمین حداکثر نیاز و کاهش تلفات انجام داد و با عدم سرمایه‌گذاری، معادل با اعمال خاموشی و حفظ تلفات در وضع روند فعلی آن خواهد بود.

بخشی از انرژی تولید شده توسط هر نیروگاه در همان نیروگاه به مصارف مختلف می‌رسد که تحت عنوان مصرف داخلی نیروگاه است. از این دیدگاه، هر نیروگاه بعنوان یک مصرف‌کننده بزرگ در نظر گرفته می‌شود که مقدار مصرف آن قابل محاسبه، کنترل و احتمالاً کاهش است. مصرف داخلی نیروگاه حدوداً ۵ درصد از انرژی تولید شده را بخود اختصاص می‌دهد. با کسر مصرف داخلی هر نیروگاه از مقدار انرژی ناخالص تولید شده آن، انرژی خالص تحویلی به شبکه بدست می‌آید که در طول شبکه‌ها دارای دو بخش تلفات می‌باشد.

بدلیل بالا بودن سطح ولتاژ و اتصالات کم در طول مسیر شبکه‌های "انتقال و فوق توزیع" تلفات در این سطح پایین و در حدود ۵ درصد می‌باشد ولی در "شبکه‌های توزیع" بدلیل پایین بودن سطح ولتاژ، اتصالات و انشعابات بسیار زیاد و پراکندگی و گستردگی این شبکه‌ها، تلفات آنها بالا و بیش از ۱۰ درصد است.

در سال ۱۳۸۱ تولید انرژی ناویژه در نیروگاه‌های کشور ۱۳۷۷۸۴ گیگاوات-ساعت بوده است که از این میزان ۶۳۶۷ گیگاوات-ساعت صرف مصارف داخلی نیروگاه‌ها شده است. انرژی تحویلی به شبکه انتقال نیز به ۱۲۸۳۲۴ گیگاوات-ساعت رسیده است که به میزان ۶۸۲۷ گیگاوات-ساعت آن صرف تلفات شبکه انتقال و فوق توزیع شده است (۵/۳ درصد) و انرژی تحویلی به شبکه توزیع ۱۱۰۳۸۷ گیگاوات-ساعت بوده است که حدود ۱۶۶۲۲ گیگاوات-ساعت آن در سطح شبکه‌های توزیع تلف شده است (۱۴/۹۷ درصد) با احتساب ۱/۴ میلیون دلار برای نصب هر مگاوات ظرفیت نیروگاه و حداقل ۳۳۰ ریال قیمت تمام شده برای هر کیلووات-ساعت انرژی الکتریکی و ۲۰۰ گرم آلایندگی کربن به ازای هر کیلووات-ساعت انرژی برق می‌توان خسارات عظیم ناشی از تلفات قابل پیشگیری را در سطح شبکه برق محاسبه نمود.

چنانچه بتوان تلفات شبکه را از ۱۸ درصد به ۱۰ درصد رساند در این صورت سالانه به احداث ۲۲۰۰ مگاوات ظرفیت نیروگاهی نیاز نخواهد بود که ارزش معادل ۳/۴ میلیارد دلار خواهد داشت و علاوه بر این بیش از ۳۴۲۰ میلیارد ریال در هزینه تولید انرژی الکتریکی صرفه‌جویی می‌شود و بیش از ۲ میلیون تن آلاینده کربنی به جو کشور وارد نخواهد شد. به عبارت دیگر هر نیم درصد کاهش تلفات سالانه بیش از ۲۲۰ میلیارد ریال صرفه‌جویی به‌مراه خواهد داشت.

۴-۱- انواع تلفات در سیستم قدرت

مؤلفه‌های عمده تلفات را می‌توان در قالب تلفات فنی و غیرفنی دسته‌بندی نمود که در اینجا ما فقط بر روی تلفات فنی تمرکز خواهیم کرد که به نوبه خود به سه بخش تلفات فنی در سیستم تولید، انتقال و توزیع دسته‌بندی می‌شود.

الف- تلفات فنی در سیستم تولید

در این بخش تلفات عمدتاً ناشی از خصوصیات ذاتی تجهیزات است و امکان کاهش آن و به عبارت دیگر پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در این بخش زیاد نیست. اجزاء اصلی تلفات در این سیستم عبارتند از:

- ♦ تلفات موتورهای الکتریکی و ترانسفورماتورها
- ♦ تلفات سیستم تأسیسات شامل تهویه مطبوع و روشنایی
- ♦ تلفات ناشی از سیستم خنک‌کننده ژنراتور

ب- تلفات فنی در سیستم انتقال فوق توزیع

عمده تلفات در این بخش شرح زیر می‌باشد.

- ♦ تلفات ناشی از مقاومت خطوط
- ♦ تلفات ناشی از صحیح نبودن اتصالات
- ♦ تلفات ناشی از عدم تقارن فازها
- ♦ تلفات ذاتی تجهیزات از قبیل ترانسفورماتورها، کلیدها، وسایل اندازه‌گیری و...
- ♦ تلفات ناشی از پخش بار نامناسب
- ♦ تلفات ناشی از افزایش بار در ساعات پیک و ضریب بار نامناسب
- (با ضریب بار ۶۵/۷ درصد تلفات در ساعات پیک حدوداً ۲/۳ برابر می‌شود)
- ♦ تلفات ناشی از اضافه بار کابل‌ها و ترانسفورماتورها
- ♦ تلفات کرونا
- ♦ تلفات عایقی (جریان نشتی و تلفات هیستریزس)
- ♦ تلفات ناشی از فرسودگی تجهیزات

- ♦ تلفات ناشی از عبور توان راکتیو
- ♦ تلفات ناشی از انتشار امواج الکترومغناطیسی و القای مغناطیسی

ج- تلفات فنی در سیستم توزیع

در سیستم توزیع تلفات فنی بدلیل گستردگی سیستم و تعدد مشترکین به عوامل بسیار زیادی وابسته است که عوامل اصلی آن شرح زیر می‌باشد.

- ♦ تلفات ناشی از مقاومت خطوط (تلفات ذاتی، صحیح بودن اتصالات)
- ♦ تلفات ناشی از عدم تعادل بار و تقارن خطوط (تلفات سیم تول، افزایش تلفات فازها)
- ♦ تلفات ناشی از سیستم زمین نامناسب
- ♦ تلفات ذاتی ترانسفورماتورها، ماشین‌های الکتریکی و تجهیزات اندازه‌گیری (تلفات مسی، آهنی و عایقی)
- ♦ تلفات ناشی از اضافه بار کابل، ترانسفورماتورها و ماشین‌ها
- ♦ تلفات عایقی تجهیزات
- ♦ تلفات ناشی از عبور توان راکتیو
- ♦ تلفات ناشی از ضریب بار پایین
- ♦ تلفات ناشی از کمبود ولتاژ
- ♦ تلفات ناشی از هارمونیک‌ها (اتر پوستی، افزایش تلفات آهنی و عایقی)

۴-۲- عوامل افزایش تلفات در شبکه

تلفات فنی شبکه، با افزایش مشترکین و در نتیجه افزایش بار و انرژی مصرفی و جریان عبوری از شبکه‌ها افزایش می‌یابد و چنانچه توسعه شبکه‌ها نیز با همان سرعت و روند صورت نپذیرد، در نتیجه درصد تلفات با روند سریعی رشد خواهد داشت.

تلفات ناشی از عبور جریان خطوط فشار متوسط به نسبت توسعه شبکه و افزایش قدرت مصرفی هر سال نسبت به سال گذشته از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\text{رابطه شماره (۱-۱)} \quad \text{ضریب افزایش تلفات} = \frac{L_{\text{new}}}{L_{\text{old}}} \times \left(\frac{P_{\text{new}}}{P_{\text{old}}} \right)^2$$

که در آن L طول شبکه و P توان مصرفی شبکه می‌باشد. بر اساس این رابطه چنانچه رشد بار شبکه را ۷ درصد فرض کنیم و در صورتی که شبکه هیچگونه توسعه‌ای نداشته باشد، ضریب افزایش تلفات تقریباً ۱/۱۵ است یعنی مقدار تلفات سالانه ۱۵ درصد نسبت به سال قبل رشد خواهد داشت با توجه به روند فروش انرژی برق و افزایش تأسیسات شبکه در طول سالان گذشته به این نتیجه می‌رسیم که یکی از عوامل افزایش تلفات می‌تواند این موضوع باشد.

یکی دیگر از عوامل عمده افزایش تلفات، عمر تأسیسات است که بر اثر استهلاک، تلفات آنها افزایش می‌یابد و با وجود حجم بالای شبکه‌های انتقال، فوق توزیع و توزیع برق در کشور، همه ساله سرمایه‌گذاری کلانی به منظور توسعه و جایگزینی شبکه‌ها نیاز می‌باشد. بطور متوسط قریب ۳۰ درصد از تأسیسات پستها و خطوط دارای عمر بالای ۲۰ سال می‌باشند.

یکی دیگر از عوامل افزایش تلفات، طول مسیر خطوط توزیع خصوصاً در برق‌رسانی به روستاها می‌باشد که موجب افزایش تلفات اهمی سیستم و افت ولتاژ انتهای خطوط شده است.

۴-۳- اجزاء تلفات الکتریکی

الف- تلفات ژول در خطوط انتقال و توزیع نیرو

بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی به صورت تلفات ژولی ($R I^2$) در خطوط انتقال و توزیع نیرو به هدر می‌رود. مقدار این تلفات تابعی است از مقاطع هادیها و جریان عبوری از آنها، البته مقاومت و جریان الکتریکی خود به عوامل بسیار متعدد دیگری بستگی دارند. در تمامی شبکه‌های برق‌رسانی، درصد عمده تلفات سیستم، مربوط به این بخش است که عمدتاً در خطوط انتقال، خطوط فوق توزیع و خطوط توزیع به هدر می‌روند، ضمن اینکه در تجهیزات الکتریکی بخصوص ترانسفورماتورها نیز این نوع تلفات قابل توجه می‌باشد. گرچه با افزایش قطر هادیها امکان تقلیل تلفات اهمی میسر می‌باشد اما اجرای این شیوه در جهت کاهش تلفات، همواره موجه و اقتصادی نمی‌باشد.

ب- تلفات در ترانسفورماتورها

بخش دیگری از انرژی الکتریکی در ترانسفورماتورهای شبکه‌های انتقال و توزیع نیرو به هدر می‌رود که سهم این بخش از تلفات نیز قابل توجه می‌باشد. تلفات در ترانسفورماتورها در مقایسه با سایر تجهیزات الکتریکی بسیار زیاد است بطوریکه در شبکه‌های انتقال و توزیع نیرو می‌توان سهم سایر تجهیزات در میزان تلفات را در مقابل آن ناچیز فرض کرد. این بخش از تلفات به مشخصات فنی ترانسفورماتورهای موجود در شبکه وابسته می‌باشد که طبعاً با حفظ آنها امکان تقلیل یا تعدیل تلفات میسر نمی‌باشد مگر اینکه بتوان با مدیریت بهره‌برداری اصلاحاتی را انجام داد.

ج- تلفات در تجهیزات پست‌ها

علاوه بر ترانسفورماتورها، بخش قابل توجهی از تلفات در سایر تجهیزات پست‌ها از جمله راکتورها، کاپاسیتورها و... به هدر می‌روند که مقدار آنها تابعی از مشخصات فنی تجهیزات است و مسلماً با حفظ آنها نمی‌توان تغییر چندانی در میزان تلفات آنها بوجود آورد؛ بنابراین لازم است در ارزیابی تلفات به این عوامل نیز توجه داشت.

حسناً مصارف داخلی اطاق فرمان، روشنایی محوطه و ساختمان‌های اداری یا دیگر تأسیساتی که در محوطه پست‌ها قرار دارند نیز مصرف کننده انرژی الکتریکی می‌باشند که اگر مقادیر آنها اندازه‌گیری نشوند به حساب تلفات منظور می‌شوند.

د- تلفات کتورها

گرچه مصارف داخلی یا تلفات در لوازم اندازه‌گیری کم می‌باشد اما با توجه به تعداد بسیار زیاد کتورها مقدار آن قابل توجه می‌باشد. مصارف داخلی کتورها چیزی در حدود یک تا دو وات می‌باشد اما بدلیل تعداد بسیار زیاد آنها که در حدود چندین میلیون می‌باشند، این بخش از تلفات نیز قابل توجه می‌باشد که باید در تجزیه و تحلیل تلفات به آنها توجه گردد. البته این بخش از تلفات مربوط به شبکه‌های توزیع می‌باشد که تشخیص میزان آن باید بر اساس آزمایشات و مشخصه فنی اولیه تعیین گردد.

علاوه بر مصارف داخلی کتورها که می‌تواند سبب افزایش تلفات در شبکه‌های برق‌رسانی گردد، خطای اندازه‌گیری نیز می‌تواند باعث بروز اشتباهاتی در میزان انرژی مبادله شده گردد. این سری مشکلات می‌توانند ارزیابی تلفات را با مشکل مواجه سازند چون اگر لوازم اندازه‌گیری میزان انرژی مبادله شده را کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی نشان دهند، ممکن است مقدار تلفات را بیشتر یا کمتر از مقادیر واقعی بیان کند. به عنوان مثال اگر تلفات انرژی در شبکه‌ای مثلاً ۱۲ درصد و متوسط خطای لوازم اندازه‌گیری نیز حدود دو درصد باشد، ممکن است تلفات واقعی ۱۰ الی ۱۴ درصد باشد که اختلاف زیادی است. خطای لوازم اندازه‌گیری ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله موارد زیر بوجود آید:

- ♦ خطای مجاز مربوط به سازنده
- ♦ ایجاد خطا در اثر استهلاک
- ♦ ایجاد خطا در اثر اضافه بار
- ♦ ایجاد خطا در اثر تغییرات درجه حرارت محیط
- ♦ ایجاد خطا در اثر نصب نادرست
- ♦ بروز خطا در اثر تغییرات ولتاژ و فرکانس
- ♦ بروز خطا در اثر رطوبت هوا
- ♦ بروز خطا در اثر نفوذ گرد و غبار در داخل کتور
- ♦ بروز خطا در اثر خرابی کتور

مسلماً در طول بهره‌برداری از کتورها عوامل فوق‌الذکر می‌توانند میزان واقعی انرژی عبوری را با اشتباه اندازه‌گیری نمایند. گرچه خطای برخی از آنها در جهت مثبت و برخی دیگر در جهت منفی است، اما دلیلی وجود ندارد که این خطاها هماهنگ باشند و به احتمال زیاد برآیند آنها سبب می‌شود تا میزان انرژی مبادله شده

با دقت لازم اندازه‌گیری نگردد و در نتیجه احتمال بروز خطائی در محدوده $\pm 0.5\%$ درصد وجود دارد.

ه- تلفات در ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان

ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ نیز از تجهیزات مهم دیگری هستند که می‌توانند در افزایش خطای اندازه‌گیری نقش داشته باشند. در این رابطه چند عامل زیر می‌تواند در افزایش این اشتباهات دخالت داشته باشند:

- ♦ خطای ناشی از معیوب بودن دستگاه
- ♦ خطای ناشی از اتصالات غلط مدارها
- ♦ خطای ناشی از بکارگیری ضرایب تبدیل

در برخی از خطوط انتقال و توزیع نیرو وجود این اشکالات سبب می‌شود، تا لوازم اندازه‌گیری انرژی دریافتی را بیش از انرژی ارسالی نشان دهند که مسلماً وجود این سری اشکالات می‌تواند ارزیابی تلفات در شبکه‌های برق‌رسانی را مواجه با اشکال سازد.

و- تلفات کرونا

تلفات کرونا عمدتاً در شبکه‌های انتقال وجود دارد و مقدار آن ضمن اینکه به سطح ولتاژ، مشخصات فنی تجهیزات و قطر هادی‌ها (در خطوط انتقال نیرو) وابسته می‌باشد به شرایط آب و هوایی منطقه از جمله رطوبت هوا، درجه حرارت محیط، میزان آلودگی و ریزش باران وابسته می‌باشند به همین دلیل مقدار تلفات کرونا با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه در دامنه بسیار وسیعی تغییر می‌کند.

ز- نشی جریان

بخشی از انرژی الکتریکی به صورت نشی جریان در تجهیزات، کابل‌ها، خطوط هوایی به هدر می‌روند. میزان این بخش از انرژی هدر رفته نیز تابعی است از شرایط آب و هوایی منطقه، در خطوط انتقال و توزیع نیرو آلودگی محیط، رطوبت هوا و نزدیکی شاخه‌های درختان به خطوط از عوامل مؤثر در ایجاد تلفات نشی می‌باشد، ضمناً نامناسب بودن اتصالات در کابل‌ها می‌تواند، بخشی از انرژی الکتریکی را به صورت گرما هدر دهد.

ح- طراحی نادرست

انتخاب و طراحی نادرست ظرفیت تجهیزات، مقاطع کابل‌ها، هادی‌ها، پالین بودن سطح ولتاژ و همچنین آرایش نامناسب شبکه‌های برق رسانی عوامل دیگری هستند که در میزان تلفات دخالت دارند، میزان و درصد این بخش از تلفات، بستگی به مشخصات فنی تجهیزات و شرایط شبکه‌های انتقال و توزیع نیرو دارد، اما امکان کاهش آنها در یک شبکه مشخص و با حفظ تجهیزات موجود موقعی عملی است که امکان اجرای اصلاحاتی از دیدگاه مدیریت بهره‌برداری میسر باشد.

۴-۴- محاسبه تلفات انرژی و توان

مقدار تلفات انرژی در یک خط انتقال یا در یک مصرف کننده مشخص، از مجموع تلفات لحظه‌ای توان به دست می‌آید، اگر مقاومت هادیها و جریان عبوری از آنها را به ترتیب با I_n و R_n نشان دهیم، مقدار تلفات انرژی از رابطه صفحه بعد قابل محاسبه است:

$$EL = R_1 \left(\frac{P_1}{U_1 \cos \varphi_1} \right)^2 + \dots + R_n \left(\frac{P_n}{U_n \cos \varphi_n} \right)^2 \quad \text{رابطه شماره (۱۱-۱)}$$

همانطور که این رابطه نشان می‌دهد تغییر هر یک از سه عامل P (توان اکتیو)، U (ولتاژ فاز با فاز) و $\cos \varphi$ (ضریب قدرت) می‌تواند تلفات توان را تغییر دهند. از آنجا که این عوامل در طول شبانه‌روز، هفته، ماه و فصل در حال تغییر می‌باشند محاسبه تلفات انرژی بدون دسترسی به آن ارقام میسر نمی‌باشد. در محاسبات تلفات انرژی اگر ارقام لحظه‌ای با مقادیر متوسط ساعتی جایگزین گردند، نیاز به ۲۸۷۶۰ عدد آنها برای مقادیر $P, U, \cos \varphi$ و R می‌باشد. اگر پارامترهای مؤثر در مقادیر R هم به آن اضافه گردد. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه تلفات انرژی خط انتقال در یک دوره یکساله دشوار می‌گردد. برای رفع این مشکل یکی از شیوه‌های مناسب محاسبه تلفات انرژی در شبکه‌های برق‌رسانی، بکارگیری مدل‌های متداول می‌باشد.

همانطور که رابطه (۱) نشان می‌دهد تلفات توان در هر لحظه به حاصلضرب چند متغیر وابسته می‌باشد که ساده‌سازی آن بدون اعمال بعضی از فرضیات و تقریب‌ها میسر نمی‌باشد. لذا در این قسمت به این نکات اشاره می‌گردد.

الف- تغییرات ولتاژ

گرچه تلاش مسئولین شبکه بر این است که ولتاژ سیستم را در محدوده مقادیر استاندارد تثبیت نمایند اما عملاً این اقدام میسر نمی‌باشد و در یک دوره شبانه‌روزی مقدار ولتاژ در محدوده استاندارد نوسان خواهد داشت بطوریکه در ساعات کم‌باری افزایش و در ساعات پرباری کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی اگر توان اکتیو انتقالی ثابت فرض شود تغییرات ولتاژ سبب کاهش بیشتر جریان عبوری و در نتیجه تغییرات تلفات انرژی می‌گردد. اگر ولتاژ نرمال را با U_n نشان دهیم در صورتی که ولتاژ به U تغییر نماید مقدار تلفات توان به اندازه K_u برابر کم یا زیاد می‌گردد.

$$K_u = \left(\frac{U_n}{U} \right)^2 \quad \text{رابطه شماره (۱۲-۱)}$$

گرچه در عمل ممکن است تغییرات ولتاژ، تغییرات توان را نیز به همراه داشته باشد اما در صورتی که توان انتقالی ثابت بماند، تلفات با مجذور نسبت ولتاژ افزایش می‌یابد. به بیان ساده‌تر اگر ولتاژ از مقدار نرمال به ۹۵ درصد

مقدار اسمی خود تقلیل باید مقدار تلفات توان ۱۱ درصد افزایش و اگر ولتاژ به ۱۰۵ درصد مقدار اسمی افزایش یابد. تلفات توان ۹ درصد کاهش می‌یابد.

ب- تغییرات ضریب قدرت

خطوط انتقال یا توزیع نیرو که انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین برق را منتقل می‌نمایند، علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو آنها را نیز تأمین می‌نمایند. ضریب قدرت که در حقیقت ارتباط توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد در طول ساعات مختلف شبانه‌روز یا دوره‌های بلند مدت دیگر در حال تغییر می‌باشد که همین تغییرات می‌توانند باعث تغییرات جریان و در نتیجه تلفات انرژی گردند.

برای انتقال میزان معینی از توان اکتیو، ضریب قدرت می‌تواند ارقام متفاوتی را دارا باشد. اگر ضریب قدرت از مقدار نرمال $\cos \phi_n$ به مقدار $\cos \phi$ تغییر نماید، تلفات برای انتقال توان اکتیو برابر به اندازه K_p برابر کم یا زیاد می‌گردد، در این حالت مقدار K_p را می‌توان از رابطه زیر بدست می‌آورد.

$$K_p = \left(\frac{\cos \phi_n}{\cos \phi} \right)^2 \quad \text{رابطه شماره (۱-۱۳)}$$

بر این مبنا برای انتقال توان معین اگر ضریب قدرت از ۰/۹ به ۰/۸ تقلیل یابد تلفات حدود ۲۷ درصد افزایش می‌یابد که نشان دهنده اهمیت ضریب قدرت در تلفات سیستم می‌باشد.

ج- ضریب تلفات

ضریب تلفات از نسبت تلفات انرژی در یک دوره مشخص T ، بر T برابر تلفات در بار پیک (حداکثر تلفات توان) به دست می‌آید به عبارت دیگر ضریب تلفات $^{1}(LSF)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$LSF = \frac{EL}{T.PL} \quad \text{رابطه شماره (۱-۱۴)}$$

در این رابطه EL انرژی تلف شده در دوره T و PL تلفات در بار پیک^۱ می‌باشد، این رابطه را می‌توان به صورت زیر نیز نشان داد.

$$EL = T.PL.LSF \quad \text{رابطه شماره (۱-۱۵)}$$

حال اگر روابط بالا را با هم مقایسه کنیم LSF یا ضریب تلفات را می‌توان به صورت تابعی از بار لحظه‌ای (متوسط ساعتی) نشان داد

$$LSF = \frac{1}{T} \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P} \right)^2 + \left(\frac{P_2}{P} \right)^2 + \dots + \left(\frac{P_n}{P} \right)^2 \right] \quad \text{رابطه شماره (۱-۱۶)}$$

1. Loss Factor

2. Peak Loss

در رابطه فوق، با جایگذاری بار نسبی به جای بار ساعت به ساعت به رابطه زیر می‌رسیم:

$$LSF = \frac{1}{T} \cdot (L_1^2 + L_2^2 + \dots + L_n^2) \quad \text{رابطه شماره (۱۷-۱)}$$

$$L_i = \frac{P_i}{P} \quad \text{رابطه شماره (۱۸-۱)}$$

در رابطه بالا مقدار L_i بار نسبی در ساعات مختلف مطالعه می‌باشد، همانطور که از این رابطه پیداست ضریب تلفات، متوسط مجذور بار نسبی در پربود مورد مطالعه می‌باشد.

د- تلفات کرونا^۱

گرچه مهمترین آثار سوء پدیده کرونا، تولید اغتشاشات رادیویی، تلویزیونی، مخابراتی و نویز شتوانی است اما باعث ایجاد تلفات الکتریکی در خطوط انتقال نیرو نیز می‌گردد. در خطوط انتقال نیرو در یک هوای خوب، مقدار تلفات کرونا ناچیز و کمتر از یک درصد تلفات ژول می‌باشد که بهمین دلیل در اکثر محاسبات اقتصادی، از آن صرفنظر می‌گردد، اما در هوای بارانی یا برفی ممکن است تلفات کرونا دهها برابر افزایش یابد که ضمن اینکه اثرات سوء اقتصادی، ناشی از تلف شدن انرژی الکتریکی را به‌همراه دارد آثار سوء آن در محیط زیست نیز افزایش می‌یابد، بهمین دلیل میزان تلفات کرونا می‌تواند به عنوان یکی از شاخص‌های مهم کنترل طراحی خطوط انتقال نیرو مورد استفاده قرار گیرد.

برای محاسبه تلفات کرونا در هوای آفتابی و صاف روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مدل‌های معتبر توسط آقای پیک ارائه گردید که در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$P_C = 0.545(V - V_C)^2 \cdot \frac{\sqrt{r/D}}{\delta} \quad V > V_C \quad \text{رابطه شماره (۱۹-۱)}$$

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد وقتی مقدار تلفات کرونا کم باشد این رابطه دارای دقت خوبی نیست و در چنین موارد استفاده از روش پیترسون که به صورت رابطه زیر تعریف گردیده است دارای دقت بهتری است:

$$P_C = 0.00314 \cdot F \cdot \left(\frac{V}{\log_{10} D/r} \right)^2 \quad V < 1.8V_C \quad \text{رابطه شماره (۲۰-۱)}$$

در این روابط:

P_C : تلفات کرونا در هر کیلومتر از خط سه فاز، برحسب کیلووات

V : ولتاژ مؤثر فازی، برحسب کیلوولت

D : فاصله متوسط هندسی فازها، برحسب سانتیمتر

r : شعاع هادی‌ها، برحسب سانتیمتر

F: ضریبی است مشخص و تابعی از مقادیر ولتاژ مؤثر و بحرانی خط انتقال

اما برای محاسبه ولتاژ بحرانی^۱ در سطح هر هادی می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$V_C = g_p \cdot m \delta \cdot r \cdot \log_e(D/r) \quad \text{رابطه شماره (۲۱-۱)}$$

در برخی از مراجع، رابطه بالا را به صورت زیر نشان می‌دهند، تفاوت این رابطه با رابطه قبل در توان δ (دانسته نسبی هوا) می‌باشد.

$$V_C = g_p \cdot m \delta^{2.3} \cdot r \cdot \log_e(D/r) \quad \text{رابطه شماره (۲۲-۱)}$$

مقدار g_p حداکثر می‌تواند برابر ۲۱/۲ باشد اما در عمل مقدار آن کمتر از رقم فوق در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که ولتاژ فازی خط انتقال به حد ولتاژ بحرانی برسد، یونیزاسیون هوای اطراف آن آغاز می‌گردد، اما این حد از ولتاژ نمی‌تواند هاله روشن بنفش رنگ را در اطراف هادی پدیدار نماید، مگر آنکه گرادیان ولتاژ از مقدار g_p تا حد مقدار g_v که از رابطه زیر به دست می‌آید، افزایش یابد. در چنین حالتی مقدار ولتاژ بحرانی در سطح هادی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$g_v = g_p \cdot \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad \text{رابطه شماره (۲۳-۱)}$$

$$V_v = g_p \cdot m \delta \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \cdot \log_e(D/r) \quad \text{رابطه شماره (۲۴-۱)}$$

انرژی تلف شده از طریق کرونا

در خطوط انتقال نیرو آنچه در رابطه با تلفات کرونا مطرح می‌باشد، مقدار آن در هوای بارانی و مرطوب است. گرچه یکی از معیارهای طراحی خطوط انتقال نیرو تعیین مقطع مناسب هادی در هوای خوب می‌باشد، اما در رابطه با تلفات کرونا این معیار نمی‌تواند اصولی باشد چون در عمل مقدار تلفات کرونا در هوای صاف و تمیز قابل صرف نظر کردن می‌باشد اما در روزهای ابری و بارانی یا برفی مقدار آن شدیداً افزایش می‌یابد و ممکن است به بیش از یکصد برابر هم برسد.

با توجه به اینکه مقدار تلفات کرونا در روزهای غیر آفتابی مطرح می‌باشد بنابراین مقدار انرژی الکتریکی که از این طریق به هدر می‌روند تابعی است از تعداد روزهای ابری، بارانی، برفی، یخ‌بندان، مه‌آلود، رطوبتی یا به عبارت دیگر در مناطقی که روزهای بارانی آن زیاد است تلفات کرونا نیز به مراتب بیشتر از سایر مناطق می‌باشد.

ه- نشی جریان

بررسی‌های انجام شده در چند نمونه از خطوط انتقال نشان می‌دهد که مقدار نشی جریان در یک هوای تمیز

ممکن است به بیش از یک کیلووات بر کیلومتر برسد. جدول (۲-۱) چند نمونه خاص از این خطوط انتقال، نیرو را نشان می‌دهد. در این جدول توان تلف شده در یک کیلومتر از مسیر خط انتقال از حاصلضرب توان تلف شده در هر زنجیره در تعداد زنجیره مقروها و تعداد برج‌ها به دست آمده است.

به طور کلی اگر جریان ناشی از هر زنجیره مقره ۱ باشد کل انرژی تلف شده در یک کیلومتر از مسیر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_L = N_f \cdot N_t \cdot V \cdot I$$

رابطه شماره (۲۵-۱)

در این رابطه:

P_L : توان تلف شده در یک کیلومتر از طول خط انتقال از طریق ناشی جریان

V = ولتاژ فاز با زمین، بر حسب کیلوولت

I = جریان ناشی در هر زنجیره مقره

N_f = تعداد برج در هر کیلومتر از طول خط انتقال

N_t = تعداد زنجیره مقروها در هر برج

بر مبنای یک میلی آمپر ناشی جریان از هر زنجیره مقره که معمولاً سازندگان به عنوان حد ناشی مقروها در هوای خشک در نظر می‌گیرند و با احتساب ۳ برج در هر کیلومتر و در نظر گرفتن مقروهای ۷ شکل (۶ زنجیره مقره برای سه فاز) توانی که از طریق ناشی در یک کیلومتر از خط انتقال ۱۲۰ کیلوولت به هدر می‌رود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_L = 6 \times 3 \times \frac{1200}{\sqrt{3}} \times 10^{-3} = 12.5 \text{ کیلووات}$$

از آنجا که جریان ناشی شدیداً به میزان املاح آلوده موجود در سطح هادی بستگی دارد، لذا هر چه درجه آلودگی افزایش یابد، جریان ناشی بیشتر می‌شود. بررسی‌های انجام شده در کشور روسیه برای یک خط ۱۱۰ کیلوولت میزان ماکزیمم جریان ناشی را بر حسب درجه آلودگی بشرح جدول (۳-۱) ارائه نموده است.

نظر به اینکه در مناطق آلوده کشور امکان نشستن مواد نمکی در روی مقروها وجود دارد در نتیجه مقدار تلفات ناشی از ناشی جریان می‌تواند تا حد بسیار بالائی افزایش یابد. همانطور که جدول (۲-۱) نشان می‌دهد تلفات ناشی از ناشی جریان در مناطقی با آلودگی خیلی سنگین و مرطوب ممکن است به ۱/۲ کیلووات در هر زنجیره مقره افزایش یابد که برای این سطح از ولتاژ مقدار آن در برخی موارد بیش از تلفات اهمی می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری است که عبور جریان‌های زیاد از روی سطوح مقروها باعث تولید گرما و در نتیجه تقلیل رطوبت شده که در نهایت منجر به کاهش ناشی جریان می‌گردد، به عبارت دیگر گرچه آلودگی و رطوبت افزایش ناشی جریان را به همراه دارند اما تداوم جریان‌های زیاد که حتی ممکن است به صورت جرقه ظاهر گردد کم می‌باشد.

تلفات خطوط انتقال نیرو ترکیبی است از تلفات ژول، کرونا و ناشی جریان، در مناطق آلوده کشور که هر سه عامل تلفات وجود دارند. گاهی ممکن است تفکیک این سه عامل تلفات به سادگی میسر نباشد. در چنین موارد لازم است ابتدا تلفات ژول که با دقت خوبی قابل محاسبه می‌باشد تعیین و از مجموع تلفات جدا گردد تا مجموع تلفات کرونا و ناشی جریان به دست آید.

برای جداسازی تلفات کرونا و ناشی جریان از یکدیگر، لازم است تلفات در یک دوره بلند مدت و در شرایط آب و هوایی مختلف مسیر اندازه‌گیری گردد. سپس با آگاهی از شرایط محیط اطراف می‌توان نسبت به تجزیه و تحلیل اقدام نمود. ضمن اینکه برای جداسازی دقیق‌تر بهتر این است که میزان ناشی جریان با مشابه‌سازی شرایط محیطی در آزمایشگاه نیز اندازه‌گیری و محاسبه گردد.

جدول ۱-۲: تلفات ناشی از ناشی جریان در سه خط مشخص در هوای تمیز و خشک

سطح ولتاژ کیلوولت	تعداد مقرونه در زنجیره	تلفات هر زنجیره، کیلووات	تعداد برج در هر مایل	کل تلفات Kw/Mile
۳۴۵	۱۸	۶۰	۷	۱/۷
۵۰۰	۲۲	۹۵	۴/۵	۱/۷
۷۳۵	۳۲	۱۵۰	۴/۵	۲/۷

جدول ۱-۳: ناشی جریان در هر زنجیره مقرونه بر حسب درجه آلودگی منطقه

درجه آلودگی		هدایت سطح زنجیره مقرونه‌ها	جریان سطحی میلی آمپر
سبک	۱	۲	۶/۸
متوسط	۲	۵	۱۷
	۳	۱۰	۳۴
سنگین	۴	۲۰	۶۸
	۵	۳۰	۱۰۲
	۶	۵۰	۱۷۰
	۷	۸۰	۲۹۰

جدول ۱-۴: تلفات ناشی از جریان در هر زنجیره از یک خط انتقال ۱۱۰ کیلوولت، بر حسب کیلووات با توجه به درجه آلودگی محیط

درجه آلودگی	تلفات در هر زنجیره
۱	۰/۵۰
۲	۱/۲۵
۳	۲/۵۰
۴	۵/۰۰
۵	۷/۴۰
۶	۱۲/۴۰
۷	۲۱/۲

۴-۵- تلفات در پست‌های فشار قوی

در پست‌های فشار قوی نیز انرژی الکتریکی بصورت گوناگونی به هدر می‌رود، که بخشی از این انرژی هدر رفته صرف مصارف داخلی تأسیسات و تجهیزات منصوبه در پست‌ها می‌گردد و بخشی دیگر تحت عناوین مختلفی به مصرف می‌رسد. با توجه به اینکه در برخی موارد این مصارف در انرژی فروخته شده به حساب نمی‌آیند، عملاً به عنوان تلفات منظور می‌گردند که ممکن است در ارزیابی‌ها اشتباهاتی را بوجود آورد.

گرچه یکی از عوامل مهم اتلاف انرژی در پست‌های فشار قوی ترانسفورماتورها می‌باشد اما علاوه بر آن انرژی الکتریکی به شکل‌های مختلف دیگری نیز به مصرف می‌رسد که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد.

الف- مصارف داخلی پست‌ها

پست‌های فشار قوی نیز همانند یک مصرف‌کننده عمده برای انجام وظایف خود نیاز به انرژی الکتریکی دارند که در قسمت‌های مختلف آن اعم از تجهیزات الکتریکی یا تأسیسات داخلی آن به مصرف می‌رسند. بنابراین لازم است در ارزیابی تلفات انرژی اینگونه مصارف که ذیلاً به آنها اشاره می‌گردد مورد توجه قرار گیرند، چون در غیر اینصورت در گروه تلفات قرار می‌گیرند که عملاً سهم عوامل ناشناخته تلفات در پست‌ها را افزایش می‌دهند.

الف-۱- مصارف اطاق فرمان

در پست‌های انتقال، اطاق فرمان همانند یک مرکز مصرف انرژی الکتریکی مطرح است که بخشی از مصارف آن مشابه یک ساختمان اداری و بخش دیگر خاص مصارف لوازم و تجهیزات منصوبه در اطاق فرمان می‌باشد که ذیلاً به اختصار به آنها اشاره می‌گردد.

سیستم سرمایش و گرمایش - بخشی از مصارف اطاق فرمان مربوط به سیستم‌های سرمایش و گرمایش می‌باشد، که مقدار آن با توجه به منطقه‌ای که پست در آن واقع شده است، متفاوت می‌باشد. در مناطق گرمسیری که حدود ۹ ماه از سال از سیستم سرمایش استفاده می‌شود مسلماً مصرف این بخش از انرژی به مراتب بالاتر از مناطق معتدله و سردسیر می‌باشد، اما بعکس در مناطق سردسیر اگر از انرژی الکتریکی به عنوان گرمایش استفاده گردد میزان این مصرف زیاد می‌باشد که باید با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه مورد توجه قرار گیرد.

مصارف عمومی - بخش دیگری از انرژی الکتریکی مصرفی در پست‌ها صرف مصارف عمومی نظیر روشنایی اطاق‌ها یا سایر لوازم الکتریکی رفاهی مورد نیاز کارکنان شاغل در پست‌ها می‌گردد. میزان این مصرف، ناهمی است از مساحت ساختمان‌های داخلی پست‌ها که بر حسب مورد ممکن است ارقام مختلفی را بخود اختصاص دهند.

مصرف تابلوهای فرمان - گرمکن‌های داخل تابلوها و سایر تجهیزات و لوازم منصوبه نیز مصرف‌کننده انرژی الکتریکی می‌باشند که در محاسبات باید مد نظر قرار گیرند.

الف-۲- روشانی محوطه

بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی در پست‌های فشار قوی صرف روشانی محوطه و غیابان‌های داخلی می‌گردد، که مقدار آن تابعی است از ابعاد پست‌ها، تعداد لامپ‌ها و همچنین شیوه طراحی سیستم روشانی. با توجه به اینکه پارامترهای متعددی در مقدار این نوع مصرف دخالت دارند، بهمین دلیل میزان آن در پست‌های مختلف متفاوت است که بهرحال قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

الف-۳- تأسیسات داخل پست‌ها

در محوطه برخی از پست‌های فشار قوی که در سطح شبکه سراسری نصب شده‌اند، ساختمان‌های اداری، انبار یا تأسیسات دیگر که ربطی به وظایف اصلی پست‌ها ندارد وجود دارند که طبیعتاً مصرف‌کننده انرژی الکتریکی می‌باشند. ممکن است در تعدادی از پست‌ها، این سری مصارف اندازه‌گیری نشوند و در نتیجه مصرف این قبیل تأسیسات که واقعاً تلفات نمی‌باشد به حساب تلفات پست‌ها منظور گردد. به عبارت دیگر در ارزیابی تلفات باید تلاش گردد کلیه عوامل مصرف‌کننده برق که قابل اندازه‌گیری می‌باشند مشخص و محاسبه شوند تا مهندسین ارزیاب در بررسی تلفات دچار خطا و اشتباه نشوند.

ب- مصارف تجهیزات

بخش دیگری از انرژی الکتریکی در پست‌ها به صورت تلفات یا مصارف داخلی تجهیزات منصوبه به هدر می‌رود، که قسمتی از آن صرف گرداندن موتورها، پمپ‌ها و کمپرسورها می‌گردد و مسلماً مقدار آن نیز تابعی است از تعداد تجهیزات و شرایط بهره‌برداری و عملکرد آنها، در این رابطه نیز به اختصار به آنها اشاره می‌گردد.

ب-۱- کلیدها و سکسیونرها

کلیدها و سکسیونرها بر حسب اینکه از چه نوعی باشند، دارای کمپرسور یا موتورهایی هستند که برای تنظیم فشار هوا، گاز، یا عملکرد آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند، که مسلماً نیاز به توان الکتریکی دارند. در عمل، انرژی مورد نیاز این نوع تجهیزات الکتریکی صرف راه‌اندازی آنها یا تنظیم فشار در سیستم‌های مختلف آنها می‌گردد، اما در عمل بدلیل پایین بودن زمان بهره‌برداری آنها، مقدار انرژی یا تلفات در مقایسه با دیگر تجهیزات منصوبه در پست‌ها، کم می‌باشد.

ب-۲- راکتورها

در بسیاری از نقاط شبکه به دلایل مختلفی، از راکتورها استفاده می‌شود که این تجهیزات ممکن است در سیم‌پیچ سوم ترانسفورماتورهای قدرت، ابتدا یا انتهای خطوط انتقال نیرو نصب شوند.

راکتورها نیز یکی از اجزاء تشکیل‌دهنده تلفات انرژی الکتریکی در پست‌های فشار قوی می‌باشند، گرچه تعداد راکتورها در مقایسه با تعداد ترانسفورماتورها بسیار کمتر می‌باشد، اما میزان تلفات آنها در پست‌هایی که از آنها استفاده می‌گردد بالا و قابل ملاحظه می‌باشد.

راکتورهای موازی وقتی به مدار وصل می‌شوند در حالت کار عادی با توان کامل مورد بهره‌برداری قرار

می گیرند و در نتیجه تلفات آنها برخلاف ترانسفورماتورها در اثر نوسانات بار دچار تغییر نمی شود بلکه کل تلفات شامل تلفات مدار مغناطیسی و سیم پیچ ها همواره وجود دارند. در راکتورها نیز تلفات از عوامل مختلفی تشکیل می گردد، که اهم آنها بشرح زیر می باشند:

♦ تلفات آهنی

♦ تلفات مسی

♦ تلفات عایقی

تلفات مسی در اثر عبور جریان از سیم پیچ ها بوجود می آید و تلفات عایقی نیز مربوط به قسمت های عایقی است که مقدار آن در مقایسه با سایر عوامل کم می باشد. گرچه میزان تلفات راکتورها به پارامترهای متعددی بستگی دارد ولی مقدار آنرا می توان تقریباً ۵۰ تا ۶۰ درصد مجموع مقادیر نامی تلفات بارداری و بی یاری ترانسفورماتورها هم ظرفیت در نظر گرفت. مقدار تلفات راکتورها حدود ۲/۳ تا ۰/۳ قدرت نامی آنها می باشد. بنابراین در بررسی تلفات پست ها، باید به تلفات راکتورها نیز توجه نمود چون در مقایسه با مصارف داخلی پست ها، تلفات آنها قابل توجه می باشد.

برای محاسبه میزان تلفات انرژی راکتورها در یک دوره مشخص زمانی T می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$EL = T \cdot Of \cdot RL \quad \text{رابطه شماره (۱-۲۶)}$$

که در این رابطه:

EL: تلفات انرژی در راکتور

T: دوره مطالعه

Of: ضریب بهره برداری از راکتور

RL: تلفات اسمی راکتور

به این ترتیب هر چه ساعات بهره برداری از راکتورها بیشتر باشد انرژی تلف شده در آنها نیز افزایش می یابد.

ب-۳- خازن ها

خازن ها در بسیاری از نقاط شبکه، بخصوص در پست های توزیع نیرو مورد استفاده قرار می گیرند. این سری تجهیزات، گرچه مولد بار راکتیو هستند اما دارای مصارف انرژی اکتیو نیز می باشند. تلفات داخلی خازن ها در مقایسه با راکتورها کمتر می باشد اما با توجه به تعدد این تجهیزات در سیستم، مقدار آن قابل توجه می باشد. میزان تلفات خازن ها به پارامترهای متعددی وابسته است که بهر حال امکان تخمین آن با توجه به تعداد و مشخصات فنی بانک های خازنی میسر می باشد.

گرچه میزان تلفات داخلی خازن ها به پارامترهای متعدد از جمله نوع عایق بکار گرفته شده بستگی دارد، اما در محاسبات تقریبی، می توان مقدار آنرا بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد توان نامی آنها در نظر گرفت که البته خازن های یا

فناوری جدید، رقمی کمتر و مناسب‌تر دارند. در شبکه‌های توزیع نیرو، خازن‌ها درصد قابل توجهی از تلفات را به خود اختصاص می‌دهند. برای محاسبه تلفات انرژی خازن‌ها در یک دوره مشخص T می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$EL = T \cdot OF \cdot CL \quad \text{رابطه شماره (۱-۲۷)}$$

در این رابطه CL تلفات نامی خازن‌ها و بقیه پارامترها مطابق تعاریف قبل می‌باشند. در محاسبه تلفات خازن‌ها باید به این نکته اساسی توجه داشت که مقدار تلفات باید با توجه به درصدی از ظرفیت بانک خازنی که وارد مدار می‌شود محاسبه گردد، چون برخلاف راکتورها، خازن‌ها با توجه به سیستم کنترلی خود، می‌توانند بر حسب نیاز مصرف، به صورت بخش بخش وارد شبکه شوند و در نتیجه همواره مقدار تلفات توان برابر مقدار اسمی تلفات ماکزیمم بانک خازنی نمی‌باشد.

ب-۴- ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ

این نوع تجهیزات نیز دارای مصارف داخلی کمی برای انجام وظایف خود می‌باشند. ضمناً در صورتی که طراحی مقره‌های یکار گرفته شده در آنها به درستی انجام نگیرد در مناطق آلوده، مقداری از انرژی الکتریکی به صورت نشی نیز در آنها به هدر می‌رود.

ب-۵- کابل‌ها و بایس بارها

گرچه تلفات در بایس بارها و کابل‌های ارتباطی داخل پست‌ها، کم می‌باشند اما بدلیل تعداد کابل‌ها و قابل توجه بودن طول آنها، لازم است این بخش از تلفات نیز مورد بررسی و محاسبه قرار گیرند، گرچه ممکن است مقدار آنها در مقایسه با دیگر عوامل کم باشد. اما بهرحال رقم کوچکی نمی‌باشد. لذا در صورتی که از این عامل صرف نظر گردد در کنار سایر اجزاء بحساب نیامده، ارقام تلفات ناشناخته را افزایش می‌دهد.

ج- سایر موارد

در داخل هر پست، علاوه بر موارد فوق‌الذکر ممکن است مصرف‌کنندگان برقی دیگری نیز وجود داشته باشند که تعداد و مقدار تلفات آنها بر حسب نوع و طراحی پست‌ها متفاوت باشد که باید مورد توجه و ارزیابی قرار گیرند. این مصرف‌کنندگان در برخی موارد ممکن است با وظایف اصلی پست ارتباط مستقیم نداشته باشند.

۶-۴- راهکارهای موجود برای کاهش تلفات

الف- راهکارهای کاهش تلفات فنی در سیستم تولید

اولین قدم در راه کاهش تلفات فنی در سیستم تولید، اعمال مدیریت مصرف بر کلیه مصارف داخلی نیروگاه‌ها اعم از تأسیسات و روشنایی می‌باشد. در حقیقت در اینجا با نیروگاه همانند یک مؤسسه مصرف کننده انرژی برخورد می‌شود که فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی در تأسیسات الکتریکی و سیستم روشنایی آن وجود دارد.

عدم استفاده از انرژی الکتریکی جهت سرمایش و گرمایش ساختمان‌های اداری، سالن‌های تولید و کارگاه‌های نیروگاه یکی دیگر از راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در نیروگاه می‌باشد. نهایتاً تعویض و یا اصلاح ترانسفورماتورها و الکتروموتورهای کم بازده نیز می‌تواند موجب کاهش مصرف داخلی نیروگاه شود.

ب- راهکارهای کاهش تلفات فنی در سیستم انتقال و فوق توزیع

یکی از راهکارهای اصلی و البته پر هزینه در سیستم انتقال و فوق توزیع انتخاب محل مناسب پست‌های انتقال و احداث این پست‌ها در مناطق مورد نیاز جهت اعمال مانور و کنترل بر سیستم می‌باشد.

سایر راهکارهای کاهش تلفات فنی در سیستم انتقال را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

- اعمال جابجانی فاز بر روی خطوط جهت متعادل نمودن امپدانس فازها
- جبران‌سازی توان راکتیو (نصب خازن سری، بانک خازنی، راکتور و ادوات FACTS)
- جایگزینی تجهیزات فرسوده
- اعمال پخش بار و توزیع بار اقتصادی
- استفاده از سطوح بالاتر ولتاژ در سیستم انتقال انرژی
- افزایش تعداد باندل‌ها
- حذف هارمونیک‌های سیستم انتقال به طرق مختلف
- کلید زنی جهت تغییر توپولوژی شبکه به وضعیت بهینه

ج- راهکارهای کاهش تلفات فنی در سیستم‌های توزیع

در سیستم‌های توزیع یکی از مهمترین راهکارها، اعمال مدیریت مصرف جهت کاهش تقاضا در ساعات پیک می‌باشد که لازمه آن فرهنگ‌سازی و بکارگیری روش‌های تشویقی و تنبیهی برای مشترکین است. علاوه بر این راهکارهای ذیل نیز در کاهش تلفات سیستم‌های توزیع مؤثر می‌باشد.

- عدم استفاده از فیدرهای طولانی
- احداث پست‌های فوق توزیع و توزیع در مناطق مورد نیاز
- استفاده از کابل‌های با تلفات پایین و جایگزینی کابل‌های فرسوده
- جبران‌سازی توان راکتیو
- جایگزینی تجهیزات فرسوده
- استفاده از روش‌های نوین کلید زنی جهت رفع مشکلات کیفیت توان
- اعمال پخش بار و توزیع بار اقتصادی
- استفاده از سطوح بالاتر ولتاژ در سیستم توزیع انرژی
- حذف هارمونیک‌ها

♦ کلید زنی جهت تغییر توپولوژی شبکه به وضعیت بهینه

۵- کنترل توان راکتیو

توان راکتیو، یکی از مهمترین عواملی است، که در طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های نیرو در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر بارها، عناصر شبکه نیز اغلب مصرف کننده توان راکتیو می‌باشند. بنابراین توان راکتیو باید در بعضی از نقاط شبکه تولید شود و سپس به محل‌های مورد نیاز منتقل شود.

در عمل، تمام تجهیزات شبکه نیرو برای ولتاژ نامی طراحی می‌شوند. اگر ولتاژ برابر مقدار نامی خود نباشد، ممکن است باعث آسیب دیدن تجهیزات شبکه و یا کاهش عمر آنها شود. برای نمونه گشتاور موتور القایی با توان دوم ولتاژ نرمیال‌های آن متناسب است و نیز شار نوری یک لامپ با ولتاژ آن تغییر می‌کند. بنابراین تثبیت ولتاژ در نقاط مختلف شبکه کاملاً ضروری است. توان راکتیو مصرفی بارها در ساعات مختلف در حال تغییر است. بنابراین ولتاژ و توان راکتیو دائماً باید کنترل شوند. در ساعات پر بار، بارها قدرت راکتیو بیشتری مصرف می‌کنند. از این رو قدرت راکتیو زیادی می‌باید در شبکه تولید شود. اگر قدرت راکتیو مورد نیاز شبکه تأمین نشود، ولتاژ نقاط مختلف شبکه به ناچار کاهش می‌یابد و ممکن است از حدود مجاز خود خارج شود. نیروگاه‌ها بوسیله سیستم کنترل ولتاژ، کاهش ولتاژ را متوجه می‌شوند و فرمان افزایش تحریک ژنراتور و نتیجتاً افزایش ولتاژ ژنراتور تا سطح ولتاژ نامی را صادر می‌کنند. ولی قدرت راکتیو تولیدی ژنراتورها به خاطر مسائل حرارتی سیستم‌ها محدود است و ژنراتورها در ساعات پر بار، به تنهایی نمی‌توانند قدرت راکتیو مورد نیاز کل شبکه را تأمین کنند. بنابراین در این ساعات به وسایلی نیاز است، که بتوان قدرت راکتیو را به شبکه تزریق کرد تا سطح ولتاژ در محدوده مجاز قرار گیرد. بارها و عناصر شبکه در ساعات کم بار، قدرت راکتیو کمی مصرف می‌کنند و ظرفیت خازنی یا کاپاسیتانس خطوط انتقال باعث می‌شود، که قدرت راکتیو تولیدی در شبکه افزایش یابد. در این حالت، ژنراتورها به صورت زیر تحریک^۱ بکار می‌افتند و مقداری از قدرت راکتیو اضافی سیستم را مصرف می‌کنند. ولی به خاطر ملاحظات پایداری، قدرت راکتیو مصرفی ژنراتورها نیز محدود است و ژنراتورها نمی‌توانند به تنهایی مسئله اضافه تولید قدرت راکتیو و افزایش ولتاژ ناشی از آن را حل کنند. بنابراین به وسایلی نیاز است، که بتوانند در این ساعات، قدرت راکتیو اضافی سیستم را مصرف کنند. وسایلی را که برای کنترل توان راکتیو و ولتاژ بکار می‌برند کمپانژاتور می‌نامند. تعادل قدرت راکتیو در شبکه، متضمن ثابت بودن ولتاژ است و کنترل قدرت راکتیو به منزله کنترل ولتاژ است.

۵-۱- روش‌های کنترل قدرت راکتیو و ولتاژ

۱- با تزریق قدرت راکتیو به شبکه بوسیله کمپانژاتورهای، که به صورت موازی وصل می‌شود (مانند: خازن،

1. Under Excit

راکتور، ماشین سکرون و ^۱SVC).

- ۲- با جابجایی قدرت راکتیو در شبکه بوسیله ترانسفورماتورهای متغیر^۲ (ترانسفورماتورهای متغیر بیشتر برای تنظیم دامنه ولتاژ یکار می‌رود در این صورت، قدرت راکتیو به شبکه تزریق نمی‌شود و فقط قدرت‌های راکتیو موجود در خطوط و دیگر عناصر شبکه جابه‌جا می‌شود).
- ۳- از طریق کاهش راکتانس القایی خطوط انتقال با نصب خازن سری (نقش اصلی خازن سری در بهبود پایداری خطوط طویل است، هنگامی که در خطوط بسیار بلند خازن سری یکار برده می‌شود، از راکتور موازی نیز به طور همزمان برای کنترل ولتاژ حالت‌های کم بار و بی‌بار استفاده می‌شود).

در جبران بار راکتیو اهداف اصلی سه گانه زیر مورد نیاز است:

- ۱- اصلاح ضریب توان
 - ۲- بهبود تنظیم ولتاژ
 - ۳- متعادل کردن بار
- اصلاح ضریب توان و متعادل کردن بار حتی در مواقعی که ولتاژ تغذیه ثابت و مستقل از بار است، مطلوب خواهد بود.
- اصلاح ضریب توان به این معناست که توان راکتیو مورد نیاز بار به جای آنکه از نیروگاه دور تأمین شود، در محل نزدیک بار تولید شود. اغلب بارهای صنعتی دارای ضریب توان پس فاز هستند، یعنی توان راکتیو جذب می‌نمایند. بنابراین مقدار جریان بار از آنچه که برای تأمین توان واقعی ضروری است، بیشتر خواهد بود. علاوه بر پرداخت هزینه توان واقعی، مشتری باید بهای هزینه اضافی کابلی که آن را انتقال می‌دهد و هزینه تلفات ژولی اضافی ایجاد شده در کابل تغذیه را نیز بپردازد.
- مؤسسات تولید کننده همچنین دلیل کافی برای عدم ضرورت انتقال توان راکتیو غیر ضروری از ژنراتورها به بار را دارند و این است که ژنراتورها و شبکه‌های توزیع قادر نخواهند بود در ضریب بهره کامل کار کنند و کنترل ولتاژ در سیستم تغذیه بسیار مشکل خواهد شد. تعرفه‌های برق همواره مشتریان صنعتی را به واسطه بارهای با ضریب توان کم آنها جریمه می‌نمایند و این عمل سالیان متمادی انجام گرفته و در نهایت منجر به توسعه کاربرد سیستم‌های اصلاح ضریب توان در مراکز صنعتی شده است.
- تنظیم ولتاژ در حضور بارهایی، که توان راکتیو مصرفی آنها تغییر می‌کند، یک موضوع مهم و در مواردی یک مسئله بحرانی خواهد بود. توان راکتیو مصرفی کلیه بارها تغییر می‌کند، اگر چه مقدار و میزان تغییرات آنها کاملاً

1. SVC: Static Var Compensator

2. Tap-changing transformers

متفاوت است. این تغییرات توان راکتور در تمامی موارد منجر به تغییرات ولتاژ (یا تنظیم ولتاژ) در نقطه تغذیه می‌شود و این تغییرات ولتاژ بر عملکرد مفید و مؤثر کلیه وسایل متصل به نقطه تغذیه مداخله نموده و منجر به امکان تداخل در بارهای مصرف‌کننده‌های مختلف می‌شود. به منظور جلوگیری از این مسئله، مؤسسات تولیدکننده برق معمولاً موظف می‌شوند، که ولتاژ تغذیه را در یک حد مجاز نگاه دارند. امکان دارد این حد از مقدار مثلاً $\pm 5\%$ میانگین در یک فاصله زمانی چند دقیقه یا چند ساعت، تا یک مقدار بسیار محدودتر تغییر نماید. این مقدار محدودتر از ناحیه بارهای بزرگ و دارای تغییرات سریع که منجر به ایجاد فرورفتگی در ولتاژ و اثر نامطلوب بر عملکرد وسایل حفاظتی یا چشمک زدن لامپ و آزار چشم می‌شود، تحمیل می‌شود. وسایل جبران‌کننده، نقش اساسی را در ثابت نگه‌داشتن ولتاژ در محدوده مورد نظر ایفا می‌کنند. مسئله سوم که در جبران بار، مدنظر است متعادل کردن بار است. اکثر شبکه‌های نیرو AC سه فاز بوده و برای عملکرد متعادل طراحی می‌شوند. عملکرد نامتعادل منجر به ایجاد مؤلفه‌های جریان توالی صفر و منفی می‌شود. اینگونه مؤلفه‌های جریان اثر نامطلوبی چون ایجاد تلفات اضافی در موتورها و مولدها، گشتاور نوسانی در ماشین‌های AC، افزایش دندانی یا ریبیل^۱ در یکسوکننده‌ها، عملکرد غلط انواع تجهیزات، اشباع ترانسفورماتورها و جریان اضافی سیم زمین را به دنبال خواهد داشت. انواع خاصی از وسایل (از جمله تعدادی از انواع جبران‌کننده‌ها) در عملکرد متعادل، هارمونیک سوم را کاهش می‌دهند. در شرایط کار نامتعادل این هارمونیک نیز در شبکه ظاهر می‌شود.

هارمونیک‌ها معمولاً بوسیله فیلتر که دارای اصول طراحی متفاوتی با جبران‌کننده‌ها هستند، حذف می‌شوند. با وجود این، مشکل هارمونیک‌ها اغلب همراه با مسئله جبران پیش می‌آید، و لذا همواره مسئله هارمونیک‌ها و پالایش آنها مورد توجه خواهد بود. علاوه بر شمار زیادی از جبران‌کننده‌ها ذاتاً هارمونیک ساز هستند، که باید بوسیله فیلتر خارجی تضعیف شوند.

الف- جبران‌سازهای خازنی

استفاده از خازن به عنوان تولیدکننده بار راکتور به منظور تنظیم و کنترل ولتاژ و جلوگیری از نوسانات قدرت در شبکه‌ها و اصلاح ضریب توان ($\cos\phi$) در مصرف‌کننده‌ها به علت ارزانی و سادگی سیستم آن بسیار متداول است. از خازن‌ها می‌توان به دو صورت موازی و سری در شبکه و در کارخانه‌ها استفاده کرد. چنانچه خازن‌ها به طور سری در شبکه قرار گیرند، جریان گذرنده از خازن‌ها ثابت نبوده و همان جریان خط است. خازن‌های موازی باعث کاهش جریان خط می‌شوند و می‌توانند سطح ولتاژ را در محل مصرف به حد معینی افزایش دهند و در این حالت جریان گذرنده از اتصال خازن‌ها همواره مقدارثابتی است، یعنی معادل ظرفیت خازن‌های نصب شده است و اتصال کوتاه در شبکه، تأثیری در خازن موازی ندارد. به طور کلی از خازن‌های موازی می‌توان به صورت زیر استفاده کرد:

1. Ripple

- ۱- کاهش جریان خط
- ۲- افزایش ولتاژ مصرف‌کننده
- ۳- کاهش تلفات سیستم
- ۴- افزایش ضریب قدرت
- ۵- کاهش جریان در ژنراتورها و ترانسفورماتورها
- ۶- کاهش هزینه سرمایه‌گذاری برای مصرف یک کیلووات قدرت حقیقی

خازن موازی، جریان تصحیح‌کننده ثابتی در محل مصرف تولید می‌کند، که تمام مولفه راکتیو جریان بار مصرف‌کننده یا بخشی از آن را جبران می‌کند. این مقدار ممکن است بر اساس افزایش ضریب قدرت انتخاب شود. کاهش جریان و افزایش ضریب قدرت، افت ولتاژ را در قسمت‌های مختلف سیستم کاهش می‌دهد. افزایش مقدار ولتاژ نیز نتیجه این مسئله است.

خازن‌های سری، تولید‌کننده مقدار ثابت جریان نیستند، بلکه این مقدار جریان سیستم است، که همیشه از خازن عبور می‌کند. در حالتی که در سیستم، اتصال کوتاهی پیش آید ولتاژ دو سر خازن سری ممکن است تا ۱۵ برابر ولتاژ نامی آن افزایش یابد. به این دلیل خازن‌های سری باید در مقابل اتصال کوتاه سیستم محافظت شوند و احتیاج به تجهیزات کامل حفاظتی دارند. کاربرد خازن‌های سری در ولتاژهای زیاد و در اندازه‌های بزرگ است.

ب- جبران‌سازهای سلفی

جبران‌سازی موازی بوسیله راکتور، امدان‌س موجی را افزایش داده و در نتیجه باعث می‌شود، که بار خط کاهش یابد. همچنین در بی بارهای کم، باعث ثابت نگه‌داشتن پروفیل یا شکل موج ولتاژ می‌شود. راکتورها معمولاً در دو انتها و یا در وسط خطوط نصب می‌شوند. در خطوط خیلی بلند معمولاً چند راکتور به صورت ثابت برای حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از قطع ناگهانی بار و یا باز شدن خط نصب می‌کنند. در خطوط کوتاه‌تر با تغییر بار در ساعات مختلف، راکتورها کنترل و قطع و وصل می‌شوند. اگر خازن‌های موازی در خط نصب شده باشند، بر اثر قطع ناگهانی بار و یا باز شدن خط انتقال، خازن‌ها باید سریعاً قطع شوند تا از افزایش زیاد از حد ولتاژ، جلوگیری شود.

ج- موتور سنکرون

موتور سنکرون دارای این مزیت است، که می‌تواند قدرت راکتیو را تولید و یا مصرف کند و نیز مقدار تولید آن می‌تواند به صورت پیوسته در محدوده‌ای وسیع تغییر نماید. با این حال قیمت موتور سنکرون از خازن خیلی گرانتر است و فقط به منظور تنظیم ولتاژ در یک سیستم فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توسعه و پیشرفت روش ساخت خازن‌ها، قیمت آنها بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. همچنین با توجه به

قیمت ناچیز کارهای ساختمانی نصب خازن و همچنین هزینه کم نگهداری و راه‌اندازی آن، قیمت خازن به هیچ وجه با یک موتور سنکرون پر قدرت قابل مقایسه نیست. کنترل پیوسته قدرت راکتور راه که با موتور سنکرون می‌توان انجام داد، با انتخاب چند مجموعه خازن در هر محل که به طور اتوماتیک کنترل می‌شوند نیز می‌توان انجام داد.

برتری موتور سنکرون در تولید و مصرف قدرت راکتور است و در سیستم‌های فشار قوی، بویژه در شرایط بی‌بازی و یا کم باری کاربرد دارد و می‌توان آن را با خازن توأم با یک راکتور جانشین کرد. بیشترین بازده، از وسایل تولید کننده قدرت راکتور، در حالتی که در نزدیکی مصرف کننده بار راکتور نصب شده باشد، گرفته می‌شود و این یعنی استفاده از خازن‌های کوچک فشار ضعیف در شبکه توزیع و این مسئله تنها با استفاده از خازن صورت می‌پذیرد، نه با موتور سنکرون.

د- کندانسورهای سنکرون

کندانسور سنکرون، همان ماشین سنکرون است، که پس از راه‌اندازی با شبکه سنکرونیزه می‌شود. مدار کنترل ولتاژ این ماشین، وظیفه اندازه‌گیری انحراف ولتاژ و کنترل تحریک را به عهده دارد.

با کنترل تحریک، ماشین متناسب با کار مورد نیاز - فوق تحریک یا زیر تحریک - توان راکتور تولید یا جذب می‌نماید تا ولتاژ پایانه‌های کندانسور را در مقدار ثابتی تنظیم نماید.

کندانسورهای سنکرون به طور معمول برای بهره‌برداری در فضای باز طراحی می‌شوند. کندانسورهای پر قدرت اغلب با دور تقریبی ۱۰۰۰ rpm (۶ قطب) ساخته می‌شوند. تلفات این ماشین‌ها نزدیک به یک درصد قدرت نامی آنهاست. کندانسورهای کوچک سنکرون با هوا خنک می‌شوند و در قدرت زیاد خنک کنندگی اغلب با هیدروژن و گاهی با آب انجام می‌گیرد.

کندانسورهای سنکرون در هر دو سیستم فوق توزیع و انتقال بکار می‌روند، ولی در سیستم‌های توزیع و فوق توزیع، برای کنترل توان راکتور، خازن‌های موازی و تب چنجر^۱ ترانسفورماتورها کاربرد بیشتری دارند. کندانسور سنکرون، توانایی تحمل اضافه بار را دارد. کندانسور سنکرون کاملاً قابل کنترل است و هارمونیک ناچیزی تولید می‌کند. ولی در عوض، به نگهداری زیادی نیاز دارد. دیگر آنکه پاسخ کنترل آن " کند" است و رفتار نسبت به محل قرار گرفتن حساس است و همچنین به فونداسیون محکمی نیاز دارد. در جدول (۱-۵) ویژگی‌ها و کاستی‌های جبران‌سازها نشان داده شده است.

۱. Tap changer

جدول ۱-۵: ویژگی‌ها و کاستی‌های جبرانسازها

ویژگی‌ها	کاستی‌ها	وسایل جبران‌کننده
سادگی از نظر اصول کار و ساختمان	مقدار آن ثابت است.	راکتور مولاری
سادگی از نظر اصول کار و ساختمان	مقدار آن ثابت است. سوئیچ کردن آن همراه حالت گذرا است.	خازن مولاری
سادگی از نظر اصول کار، رفتار آن نسبت به محل قرار گرفتن حساس نیست.	در مقابل اضافه ولتاژ باید حفاظت شود و به فیلتر زیر هارمونیک نیاز دارد.	خازن سری
تولایی تحمل اضافه بار را دارد کاملاً قابل کنترل است.	به نگهداری زیادی نیاز دارد.	کندالسور سنکرون
کاملاً قابل کنترل است.	پسرخ کنترل آن کند است.	
چندان هارمونیک ساز نیست.	رفتارش نسبت به محل قرار گرفتن حساس است و نیاز به فونداسیون محکمی دارد.	خازن تیوسنور سوئیچ ^۱ (TSC)
وقتی خراب می‌شود به سرعت قابل تعمیر است.	تولایی ذاتی محدود کردن اضافه ولتاژ را ندارد.	
هارمونیک ساز نیست.	از نظر کنترل پیچیده است.	
	پسرخ فرکانس آن کند است.	
	رفتارش نسبت به محل استقرار حساس است.	

ه- استفاده از ژنراتور موجود کارخانه برای تعدیل بار راکتیو و صرفه‌جویی در هزینه برق

یکی از مشکلات بزرگی که در شبکه‌های پخش نیرو وجود دارد، مصرف زیاد بار اندوکتیو است، که سبب افت ولتاژ و تلفات می‌شود. بخش عمده این بار، ناشی از وجود موتورهای برق مستقیم و موتورهای القایی کارخانه‌های بزرگ و کوچک صنعتی است، که ضریب توانشان از ۰/۷ کمتر است. برای نمونه یکی از کارخانه‌های چوب، دارای بار اکتیو ۱۵ مگاوات و بار راکتیو حدود ۱۵ مگاوار است، که چنانچه این بار راکتیو زیاد به شبکه تحمیل شود، آثار سوء یاد شده در بالا- افت ولتاژ و تلفات و اشغال شدن ظرفیت تجهیزات و کابل‌های برق- به شبکه پخش نیرو اعمال خواهد شد.

بنابراین سزاوار است که این بار راکتیو زیاد به روشی اقتصادی در کارخانه تعدیل شود و با بهبود ضریب توان از افت ولتاژ، تلفات و اشغال شدن ظرفیت تجهیزات و کابل‌ها جلوگیری شود و پایداری شبکه توزیع نیز بهبود یابد.

این روش را می‌توان در بسیاری از کارخانه‌هایی، که دارای مولد برق هستند بطور جداگانه بررسی کرد و با توجه به نمودار توان (= دیگرام قدرت) ژنراتورها، بار راکتیو آن کارخانه را تأمین کرد.

چنانچه ژنراتور به صورت فوق تحریک کار کند، می‌تواند بار راکتیو تولید کند و اگر به صورت زیر تحریک کار کند می‌تواند از شبکه بار راکتیو جذب نماید.

یادآور می‌شود چنانچه جریان تحریک از مرز پایداری ژنراتور کمتر شود، ژنراتور به حالت ناپایدار در می‌آید.

۱. Thyristor Switched Capacitor

و باعث افزایش دما در ناحیه انتهای هسته استاتور و رتور می‌شود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر بنا به دلایلی، مولد با توانی کمتر از توان نامی اکتیو مورد بهره‌برداری قرار گیرد یا توجه به نمودار توان، می‌توان توان راکتیو مورد نظر را از مولد اخذ کرد و ضریب توان کارخانه را بهبود بخشید.

پرواضح است که هزینه نصب بانک یا مجموعه خازنی و رگولاتور و سایر تجهیزات برای اصلاح ضریب توان به مقدار زیاد، بسیار گران است و هزینه یازسازی و نگهداری تأسیسات خازنی مجهز به سیستم فرمان خودکار و کنتاکتور و کلیدهای بزرگ نیز زیاد است. بنابراین اصلاح ضریب توان بوسیله مولد موجود در کارخانه کاملاً اقتصادی و معقول است.

در کارخانه‌هایی، که مولدهایشان فقط هنگام قطع برق راه‌اندازی می‌شوند، پس از مطالعه و بررسی اقتصادی می‌توان آن مولدها را با شبکه موازی بست و در نقش تعدیل‌گر یا خنثی‌کننده توان راکتیو از آنها بهره‌برداری کرد.

۵-۲- بهبود ضریب توان

الف- محدود کردن توان راکتیو کارخانه‌ها

همانطور که می‌دانیم موتورهای آسکرون به علت جریان مغناطیسی که لازم دارند باعث تغییرات $\cos \phi$ شبکه می‌شوند و هر چه قدرت موتور بیشتر باشد، جریان مغناطیس کننده آن نیز بیشتر خواهد بود. در ضمن ضریب توان ($\cos \phi$) موتور به بار موتور بستگی دارد. مقدار ضریب توان بر حسب نوع و ساختمان در بار نامی بین ۰/۷۵ تا ۰/۸۸ است و در نیمه بار بین ۰/۴۵ تا ۰/۶ و در بی‌باری حتی به ۰/۲ نیز می‌رسد.

علت تغییرات ($\cos \phi$) نسبت به بار، این است که موتورها هنگام بی‌باری جریان مغناطیسی زیادی از شبکه می‌گیرند. بعلاوه توان موتورها بر حسب وات ناچیز است و فقط به اندازه‌ای است، که تلفات ماشین را بپوشاند. بدین جهت اگر بخواهیم مصرف راکتیو کارخانه‌ای را محدود کنیم، کافی است، که قدرت موتورها را متناسب با قدرت ماشین‌های افزار انتخاب کنیم. به عبارت دیگر قدرت موتور نباید از مقدار قدرت مکانیکی، که از موتور گرفته می‌شود و کاری که انجام می‌دهد بزرگتر باشد.

دیگر آنکه باید از حرکت بی‌بار ماشین‌ها حتی الامکان جلوگیری کرد و اگر نحوه کار ماشین‌ها طوری است، که موتورها مدت نسبتاً زیادی به صورت بی‌بار و یا نیمه بار کار می‌کنند، بهتر است که بویژه موتورهای بزرگ مجهز به کلید خودکار ستاره مثلث باشند و در صورتی که موتور زیر ۵۰ توان نامی کار می‌کند سیم پیچ آن به صورت ستاره و در بالای پنجاه درصد توان نامی، به صورت مثلث بسته شود. زیرا توان راکتیوی، که ماشین‌ها در بار کم دریافت می‌کنند در اتصال ستاره کمتر است. در ضمن بهتر است که هیچگاه کابل‌ها از تابلو قطع نشوند، بلکه مصرف کننده‌ها از کابل قطع شوند. این عمل باعث می‌شود، که کابلها در موقع بی‌باری به صورت خازن‌هایی در شبکه باقی بمانند و توان راکتیو سلفی شبکه را جبران کنند.

ب- محل نصب خازن

از دیدگاه مهندسی سزاوار است خازن ها در جوار مصرف کننده ها، که به توان راکتیو نیاز دارند، نصب شوند. در روش تعدیل تکی یا اختصاصی، انتقال توان راکتیو از بخش های زیادی از شبکه حذف می شود و چنانچه خازن و مصرف کننده بطور همزمان قطع شوند، اضافه توان راکتیو تولیدی نیز وجود نخواهد داشت.

از دیدگاه اقتصادی این شیوه نصب همیشه توصیه نمی شود. بیشتر مصارف صنعتی شمار زیادی مصرف کننده کوچک - به اندازه های متفاوت - دارند و بسیار مشکل است که برای هر مصرف کننده توان خازنی به اندازه صحیح بکار برده شود و علاوه بر آن، تمام بار همیشه در یک زمان وصل نمی شود و در نتیجه نصب خازن روی هر موتور برق بدون استفاده خواهد ماند. بعضی وقتها ممکن است نصب یک خازن مرکزی به نصب شمار زیادی خازن کوچک ترجیح داده شود. مزیت استفاده از مجموعه یا بانک خازنی به جای استفاده از خازن های موضعی برای هر موتور آن است که به لحاظ رعایت ترتیب همزمانی در روی کلیه بارهای متغیر، ظرفیت لازم برای مجموعه خازنی کاهش می یابد.

از سوی دیگر تجهیزات حفاظتی مخصوص هارمونیک های فرکانس زیاد نیز در شبکه محدود می شود. گفتنی است یافتن محل نصب خازن ها در شبکه نیاز به بررسی بخش بار هارمونیکی دارد. در حالت نصب بانک خازنی، ضریب بار کارخانه [نسبت متوسط بار به ماکزیمم بار] برای تعیین مقدار مجموعه خازن مورد نیاز، می باید مورد توجه قرار گیرد.

برای اصلاح ضریب توان نیاز به نصب خازن است. یکی از معایب کم بودن ضریب توان، جذب بی مورد قدرت راکتیو از شبکه خارجی است، که باعث پر شدن ظرفیت تجهیزات می شود. برای جلوگیری از پر شدن بی مورد ظرفیت تجهیزات، لازم است که قدرت راکتیو مورد نیاز، در محل کار تأمین شود. بر حسب اینکه خازن در کدام شینه نصب شود، وضعیت آزاد شدن ظرفیت تجهیزات فرق می کند.

۵-۳- انواع جبران سازی

از جبران سازی خازنی می توان به سه طریق زیر استفاده کرد:

الف) جبران سازی اختصاصی

ب) جبران سازی گروهی

ج) جبران سازی مرکزی

در ضمن ممکن است در یک مجتمع بزرگ صنعتی از هر سه نوع جبران سازی مشترکاً استفاده شود.

الف- جبران سازی اختصاصی

در جبران سازی اختصاصی توان راکتیو در همان محل که بوجود می آید جبران می شود، لذا خازن های جبران کننده توان راکتیو در همان محل یا موتور یا ترانسفورماتور موازی می شوند.

جیرانسازی اختصاصی باعث می‌شود، که حتی سیم‌های انتقال انرژی تا مصرف کننده نیز از جریان راکتیو خالی شود و در نتیجه مقطع سیم‌های رابط، کوچکتر، افت ولتاژ کمتر و بالاخره افت توان کمتری پیدا کند. اگر در تمام قسمت‌های کارخانه از جیرانسازی اختصاصی استفاده شود، تمام معایب انتقال جریان متناوب یکجا از بین می‌رود ولی متأسفانه همیشه و در همه جا نمی‌توان از جیرانسازی اختصاصی استفاده کرد، زیرا اغلب، تجمع آنها در یک محل و استفاده از واحدهای بزرگتر، از نظر اقتصادی بیشتر مقرون به صرفه خواهد بود.

در بیشتر مواقع نیز به خاطر نبودن محل مناسب و یا حرارت زیاد دستگاهها، نمی‌توان خازن را درست در همان محل نصب کرد. کاربرد جیرانسازی اختصاصی بیشتر در موتورهای است، که مدت زیادی از آنها بار گرفته می‌شود و یا در کوره‌های القایی، ترانسفورماتورهای جوشکاری، و ترانسفورماتورهای معمولی و لامپ‌های نئون و فلورسنت [شکل شماره (۴-۱)].

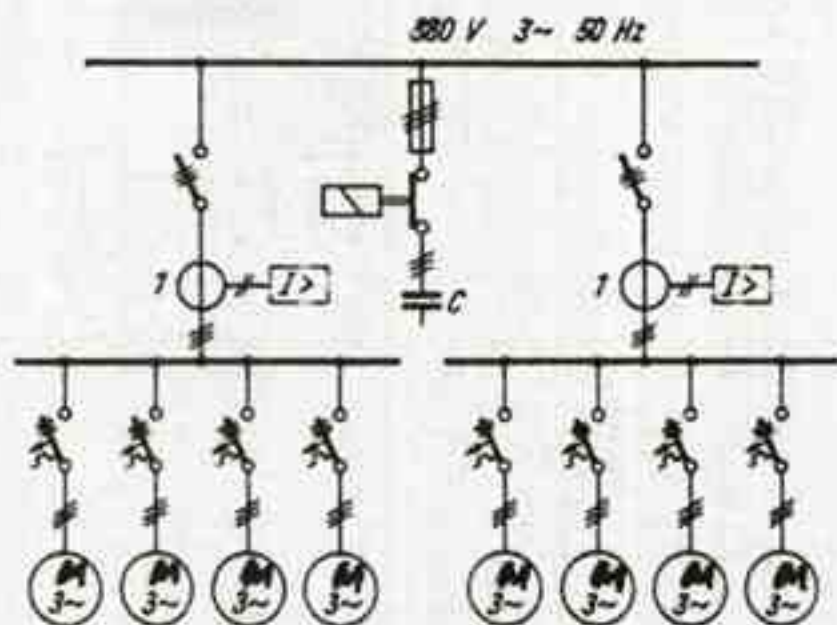


شکل شماره ۴-۱: جیرانسازی اختصاصی

ب- جیرانسازی گروهی

این روش کار، برای تأسیسات و کارخانه‌هایی، که چندین موتور کوچک دارند ولی همه آنها همزمان کار نمی‌کنند مناسب است.

در این روش خازن‌ها با کلید محافظ مخصوص به شین تابلوی اصلی وصل می‌شوند و قدرت راکتیو آن برای تعداد موتورهای که دائماً با هم کار می‌کنند محاسبه می‌شود. به طور مثال اگر فقط چهار موتور به طور دائم کار می‌کنند، خازن‌ها نیز برای قدرت اندوکتیو چهار موتور محاسبه می‌شوند و به محض اینکه دو موتور بکار افتاد خازن‌ها دستی و یا به طور خودکار وارد عمل می‌شوند. [شکل شماره (۵-۱)]



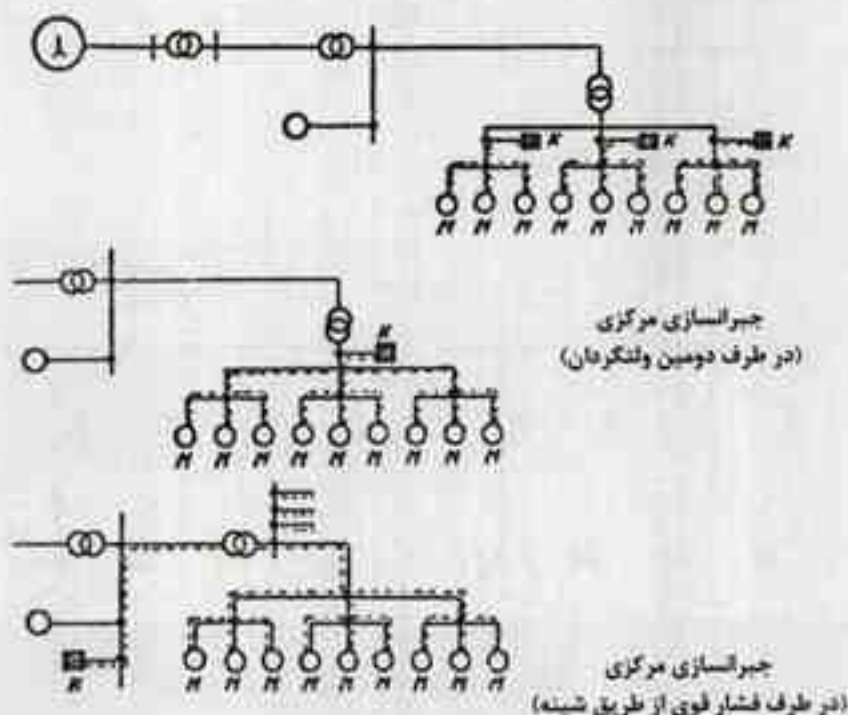
شکل شماره ۱-۵: جبرانسازی گروهی

ج۔ جبران سازی مرکزی

در این روش چند خازن در محل و در تابلوی مخصوصی نصب می‌شوند (بانک خازنی) و بر حسب احتیاج تعدادی از آنها به شبکه اصلی و یا در تابلو به شین اصلی وصل می‌شوند. در جبران سازی مرکزی معمولاً خازن‌ها دارای شینه و تابلوی جداگانه هستند و توسط کلید نیرو یا کلید قدرت مخصوصی به شینه اصلی کارخانه وصل می‌شوند.

در این روش تعدادی از خازن‌ها به طور دائم به شینه اصلی وصل هستند و تعداد دیگری متناسب با بار راکتیو به طور خودکار به شبکه اضافه می‌شوند. شکل (۱-۶) انواع جبرانسازی را به طور شماتیک با مسیر جریان راکتیو آنها نشان می‌دهد.

جبرانشازی گروهی



شکل شماره ۱-۶ انواع جبرانشازی

۵-۴- جبرانشازی در کارخانه‌ها

کارخانه‌ها عموماً دارای تأسیسات فشار ضعیف هستند حتی کارخانه‌های بزرگ صنعتی نیز، که دارای شبکه فشار متوسط (اغلب ۶ هزار ولت برای موتورهای سنگین و بزرگ) می‌باشند نیز دارای شبکه وسیع فشار ضعیف می‌باشند. انرژی این کارخانه‌های بزرگ اغلب توسط یک یا چند ترانسفورماتور یا ولنگردانی، که در اختیار دارند تأمین می‌شود. لذا کافی است برای بهبود $\cos \phi$ جریان کتنده‌ها در طرف فشار قوی و به طور مرکزی و یکجا نصب شوند (جبرانشازی مرکزی). ولی با توجه به اینکه در این روش، سیم‌های انتقال انرژی بعد از خازن‌ها و جبرانشازها از بار و جریان اندوکتیو خالی نمی‌شوند، لذا از مزایای دیگر جبرانشازی، که عبارت بود از کاهش قدرت ترانسفورماتور، کاهش مقاطع سیم‌های انتقال و توزیع انرژی و جلوگیری از افت ولتاژ و تلفات حرارتی بی‌مورد بار راکتیو، بهره گرفته نشده است.

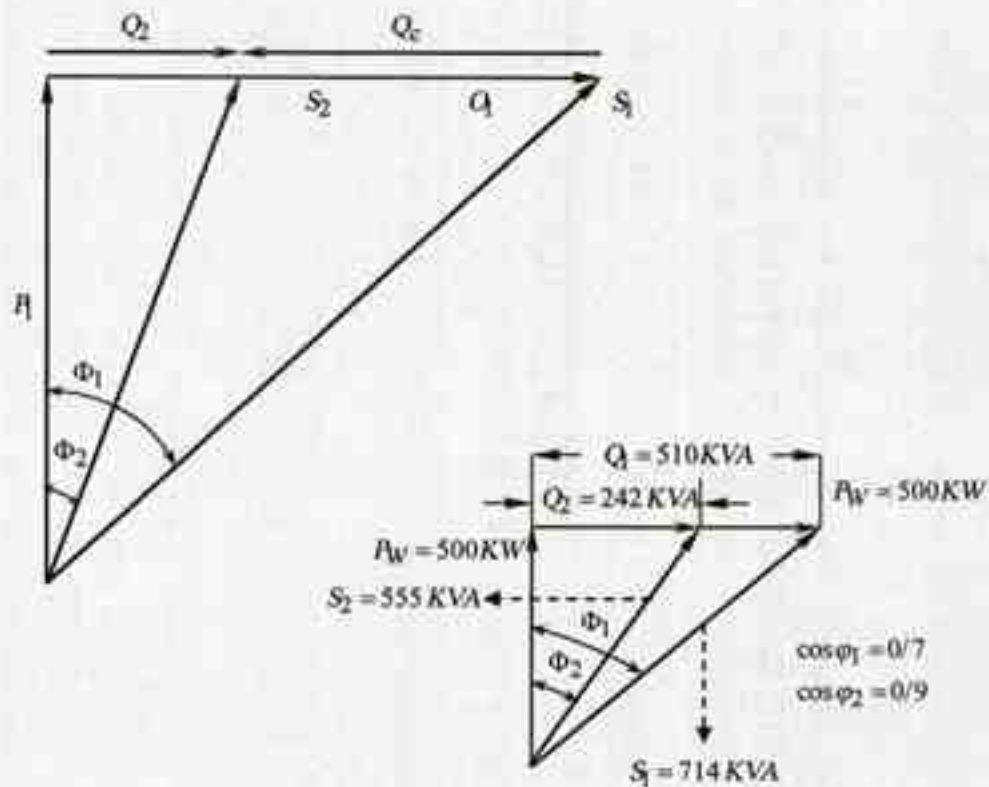
دیگر آنکه، جبرانشازی مرکزی در طرف فشار قوی احتیاج به کلیدهای فشار قوی بزرگ و گران قیمت دارد همچنین خود خازن‌ها نیز باید در مقابل اختلاف ولتاژ زیاد طرف اولیه ترانسفورماتور مقاوم باشند.

در کارخانه‌های بزرگ که دارای شبکه فشار قوی کارگاهی هستند، گاهی از جبرانشازی مرکزی در طرف فشار قوی شبکه محلی استفاده می‌شود و گاه موتورهای فشار قوی به طور اختصاصی تصحیح می‌شوند و بقیه دستگاه‌ها که با فشار ضعیف کار می‌کنند بر حسب نوع کار آنها از جبرانشازی اختصاصی، گروهی و یا مرکزی طرف فشار ضعیف بهره می‌گیرند.

۵-۵- تعیین قدرت خازن مورد نیاز

الف- کاهش قدرت ظاهری

هر گاه مقدار قدرت ظاهری مصرف کنندگی S_1 و ضریب قدرت آن $\cos \phi_1$ باشد، جهت رساندن ضریب قدرت فوق به ضریب قدرت مطلوب [با توجه به شکل شماره (۷-۱)] قدرت و ظرفیت خازن لازم محاسبه می‌شود:



شکل شماره ۷-۱: تعیین قدرت خازن مورد نیاز

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan \phi_1$$

رابطه شماره (۲۸-۱)

$$Q_2 = P_1 \cdot \tan \phi_2$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

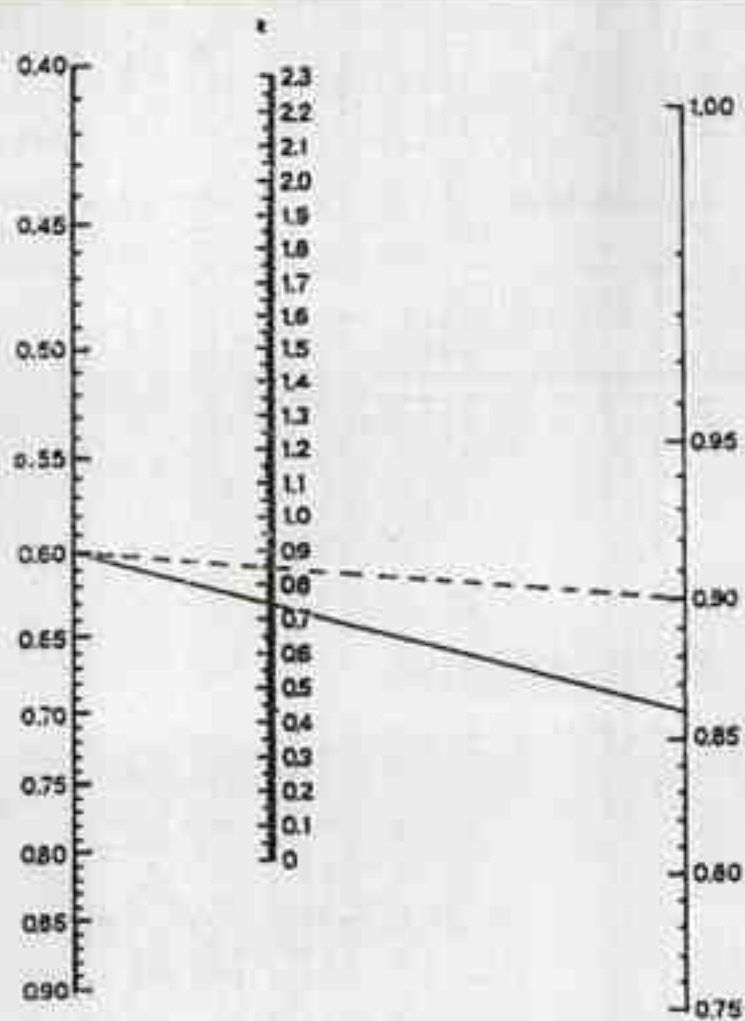
رابطه شماره (۲۹-۱)

$$Q_c = P_1 (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$Q_c = P_1 \cdot K$$

رابطه شماره (۳۰-۱)

مقدار ضریب K را می‌توان با استفاده از نمودار شکل شماره (۸-۱) نیز پیدا کرد.



شکل شماره ۱-۸: محاسبه مقدار K

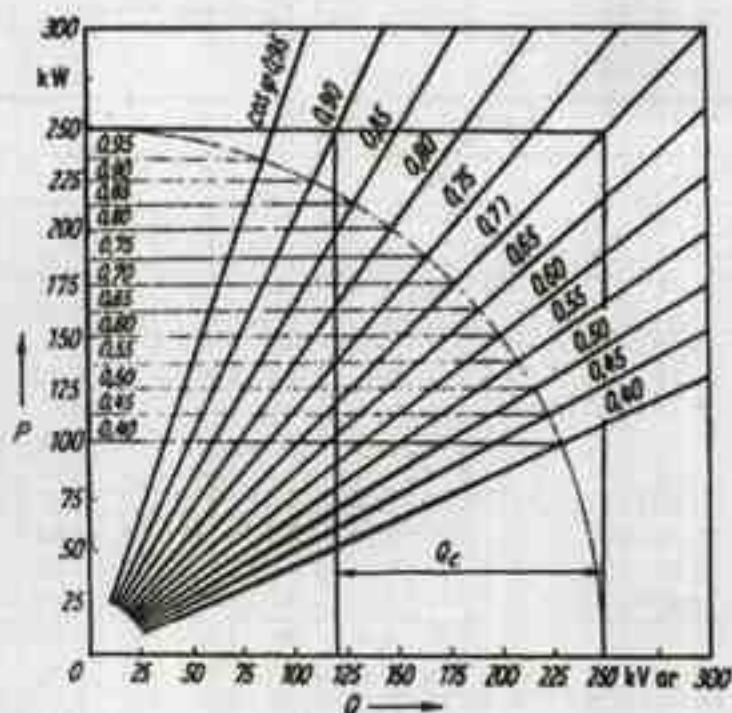
جدول ۶-۱: محاسبه ضریب K جهت افزایش ضریب توان از $\cos \phi_1$ به $\cos \phi_2$

改善後之功率因數 $\cos \theta_2$														
	1.0	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.85	0.80	
改善前之功率因數 $\cos \theta_1$	0.98	1.73	1.59	1.53	1.48	1.44	1.40	1.37	1.34	1.30	1.28	1.25	1.11	0.98
	0.93	1.64	1.50	1.44	1.39	1.35	1.32	1.28	1.25	1.22	1.19	1.16	1.02	0.89
	0.88	1.52	1.38	1.32	1.27	1.23	1.19	1.16	1.12	1.09	1.06	1.04	0.90	0.77
	0.83	1.44	1.30	1.24	1.19	1.15	1.11	1.08	1.05	1.01	0.99	0.96	0.82	0.69
	0.78	1.33	1.19	1.13	1.08	1.04	1.01	0.97	0.94	0.91	0.88	0.85	0.71	0.58
	0.73	1.27	1.23	1.06	1.01	0.97	0.94	0.90	0.87	0.84	0.81	0.78	0.65	0.52
	0.68	1.17	1.03	0.97	0.92	0.88	0.84	0.81	0.77	0.74	0.71	0.69	0.55	0.42
	0.63	1.11	0.97	0.91	0.86	0.82	0.78	0.75	0.71	0.68	0.65	0.62	0.49	0.36
	0.58	1.02	0.88	0.81	0.77	0.73	0.69	0.66	0.62	0.59	0.56	0.54	0.40	0.27
	0.53	0.96	0.82	0.75	0.71	0.67	0.63	0.60	0.57	0.53	0.51	0.48	0.34	0.21
	0.48	0.88	0.74	0.67	0.63	0.58	0.55	0.52	0.49	0.45	0.43	0.40	0.26	0.13
	0.43	0.83	0.69	0.62	0.58	0.54	0.50	0.47	0.43	0.40	0.37	0.35	0.21	0.08
	0.38	0.75	0.61	0.54	0.50	0.46	0.42	0.39	0.35	0.32	0.29	0.27	0.13	
	0.33	0.70	0.56	0.49	0.45	0.41	0.37	0.34	0.30	0.27	0.24	0.21	0.08	
	0.28	0.62	0.48	0.42	0.37	0.33	0.29	0.26	0.22	0.19	0.16	0.14		
	0.23	0.57	0.42	0.36	0.32	0.28	0.24	0.20	0.17	0.14	0.11	0.08		
	0.18	0.48	0.34	0.28	0.23	0.19	0.16	0.12	0.09	0.06	0.02			
	0.13	0.45	0.31	0.25	0.21	0.16	0.13	0.09	0.06	0.02				
	0.08	0.43	0.28	0.22	0.18	0.13	0.10	0.06	0.03					
	0.03	0.40	0.25	0.19	0.15	0.10	0.07	0.03						
	0.00	0.36	0.22	0.16	0.11	0.07	0.04							
	0.95	0.33	0.18	0.12	0.08	0.04								
	0.90	0.29	0.15	0.09	0.04									
	0.85	0.25	0.11	0.05										
	0.80	0.20	0.06											
	0.75	0.14												

بعنوان مثال اگر بخواهیم ضریب قدرت موجود $\cos \phi_1 = 0/6$ را به ضریب قدرت مورد نظر $\cos \phi_2 = 0/9$ برسانیم، مقادیر این دو ضریب قدرت را بوسیله خطی مستقیم به هم وصل می‌کنیم و محل تلاقی این خط با خط مدرج وسطی، K خواهد بود. از جدول شماره (۶-۱) نیز می‌توان مقدار K را بدست آورد.

($K = 0.85$)

با استفاده از منحنی نمودار شکل شماره (۹-۱) نیز می‌توان با در دست داشتن مقادیر A و $\cos \phi_1$ و $\cos \phi_2$ مقدار Q_C را تعیین کرد. علاوه بر جدول و منحنی ارائه شده، مقادیر تقریبی قدرت خازن بر حسب کیلووالت برای موتور و ترانسفورماتور در جدول (۷-۱) ارائه شده است.



شکل شماره ۹-۱: تعیین مقدار خازن مورد نیاز

جدول ۹-۱: مقادیر تقریبی قدرت خازن بر حسب کیلووات برای موتور و ترانسفورماتور

صرف کنند:	قدرت خازن به KVAR
۱- موتورهای الکتریکی:	
از ۱ تا ۳ کیلووات (KW)	۶٪ قدرت نامی موتور
از ۴ تا ۱۰ کیلووات (KW)	۵٪ قدرت نامی موتور
از ۱۱ تا ۲۰ کیلووات (KW)	۲۵٪ قدرت نامی موتور
از ۲۱ تا ۵۰ کیلووات (KW)	۲۰٪ قدرت نامی موتور
از ۵۱ تا ۱۰۰ کیلووات (KW)	۳۵٪ قدرت نامی موتور
۲- ترانسفورماتورها:	
ترانسفورماتورها	۱۰٪ قدرت نامی

ب- تهویه خازن‌ها

خازن در مقابل افزایش دما بسیار حساس است و همواره در بار دائمی خود، کار می‌کند. در نتیجه، در حالت اضافه ولتاژ سیستم [که به معنای افزایش بار خازن و متعاقباً افزایش درجه حرارت آن است] خازن را نباید وارد مدار کرد. خازن معمولاً طوری طرح می‌شود، که اضافه درجه حرارت زمان کار آن نسبت به دستگاه‌های برقی دیگر کمتر است. زیرا:

- ۱- خازن همیشه در بار کامل کار می‌کند. بنابراین، امتیاز افزایش درجه حرارت متوسط، که در اثر بارهای مختلف درمورد ولنگردان‌ها و یا دستگاه‌های دیگر تعریف می‌شود، در مورد خازن وجود ندارد.

۲- بنا به دلایل اقتصادی، خازن با شدت میدان زیاد و فشارهای عایقی زیاد طراحی می‌شود. مجموعه این فشارها توأم با درجه حرارت زیاد برای مدت زمان طولانی سبب خرابی تدریجی و گوناگون شدن عمر خازن می‌شود.

بنا بر آنچه گفته شد، لازم است که به آرایش نصب خازن‌ها توجه شود تا تهویه و تبادل حرارت کافی [ناشی از تلفات داخلی] انجام پذیرد.

ج- راههای مؤثر کاهش دما

۱- قراردادن خازن‌ها در مکانی با دمای کمتر

۲- خنک کردن با استفاده از فن

۳- خازن‌های ویژه، که دارای ظرفیت نامی بیشتر باشد.

خازن‌ها عموماً برای محیطی که بیشترین دمای آن ۴۰ سانتیگراد است طراحی می‌شوند.

د- بررسی نتایج فنی و اقتصادی حاصل از نصب خازن در یکی از کارخانه‌ها با قدرت قراردادی ۷۵۰ KW

از گزارش مصرف برق مشترک در چهار ماه آخر سال و شش ماه اول سال بعد، ضریب توان متوسط در یک دوره ۱۰ ماهه برابر $S^2 = P^2 + Q^2$ تعیین می‌شود.

محاسبه قدرت خازن مورد نیاز

$$P = 480 \text{ KW} \text{ حداکثر بار مصرفی (دیماند مصرفی)}$$

کاهش توان اکتیو

$$\cos \varphi_1 = 0.7 \text{ ضریب قدرت موجود}$$

$$\cos \varphi_2 = 0.9 \text{ ضریب قدرت مطلوب}$$

با استفاده از جدول شماره (۱-۶)، ضریب K برابر ۰/۵۴ بدست می‌آید.

$$Q_C = K.P$$

$$Q_C = 0.54 \times 480 = 259.2 = 260 \text{ KVAR}$$

اگر برای نصب خازن به ازای هر کیلووات ۱۱۵۰۰ تومان در نظر بگیریم، هزینه خازن‌ها و رگولاتور و سایر تجهیزات مورد نیاز تقریباً برابر با ۳ میلیون تومان خواهد شد. با احتساب متوسط پرداختی بابت ضرر و زیان در هر ماه تقریباً ۹۸۰۰۰ تومان، جمع پرداخت در مدت ۲ سال و نیم، برابر ۳ میلیون تومان خواهد بود. بنابراین ملاحظه می‌شود که با تهیه و نصب خازن، سرمایه‌گذاری آن در طول دو سال و نیم مستهلک می‌شود.

۶- موتورهای القایی (آسنکرون) سه فاز

۶-۱- مقدمه

در اکثر کارخانجات و صنایع در سراسر جهان از موتورهای القایی (اندوکسیونی) استفاده می‌شود. به‌خصوص در مواقعی که به موتور نسبتاً بزرگی نیاز داشته باشیم از موتورهای القایی سه فاز استفاده می‌کنند. این موتورها دارای مزایای زیر هستند.

الف) قابلیت اطمینان آنها زیاد است.

ب) ارزان هستند.

ج) ساخت آنها ساده است.

این موتورها را اصولاً فرانس در سال ۱۸۸۵ اختراع نمود. اما نام تسلا که در سال ۱۸۸۶ تئوری این موتورها را بیان نمود بیشتر به چشم می‌خورد.

۶-۲- ساختمان موتورهای القایی

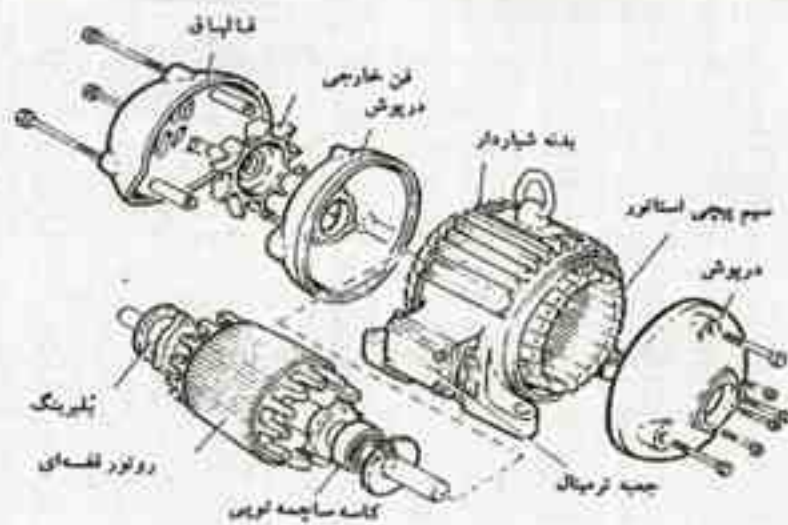
موتورهای القایی سه فاز از دو قسمت اساسی تشکیل شده‌اند:

الف) قسمت ثابت بنام استاتور

ب) قسمت دوار بنام رتور

الف- استاتور موتورهای القایی سه فاز

استاتور اینگونه ماشین‌ها حاوی شیارهایی می‌باشد که درون آنها سیم‌پیچی سه فازی جاسازی شده و با توجه به نحوه این سیم‌پیچی، موتورهای القایی سه فاز دو قطبی، ۴ قطبی، ۶ قطبی و... حاصل می‌گردند. (شکل شماره (۱-۱۰))



شکل شماره ۱-۱۰: اجزاء یک موتور الکتریکی

بعنوان مثال می‌توان گفت که در موتور ۴ قطبی دو قطب مثبت (شمال) و دو قطب منفی (جنوب) وجود دارد.

ب- رتور موتورهای القایی سه فاز

رتورهای متداول در اینگونه ماشین‌ها به قرار زیر است.

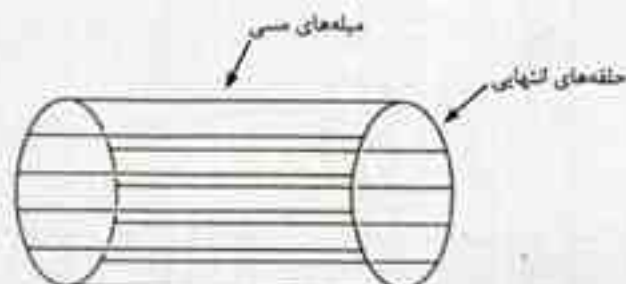
الف) رتور قفس سنجایی ساده

ب) رتور قفس سنجایی مضاعف

ج) رتور میم پیچ شده

ب-۱- رتور قفس سنجایی ساده

متداول‌ترین رتور برای موتورهای القایی سه فاز، همین رتور قفس سنجایی ساده می‌باشد، زیرا شباهت زیادی به قفس سنجاب دارد. اینگونه رتورها از میله‌های مسی تشکیل شده که در شیارهای رتور جاسازی می‌شوند و همانطور که از شکل (۱-۱۱) پیداست بدنه رتور (قسمت فلزی) که به صورت ورقه ورقه ساخته می‌شوند نشان داده نشده است.



شکل شماره ۱-۱۱: شمای ساده یک رتور قفسه سنجایی که در دو انتهای میله‌ها توسط حلقه‌های انتهایی اتصال کوتاه شده‌اند.

ب-۲- رتور قفس سنجایی مضاعف

در برخی از موتورهای القایی سه فاز رتورهائی از نوع قفس سنجایی مضاعف وجود دارد و اینگونه رتورها از دو سری میله تشکیل شده‌اند.

(الف) سری اول میله‌ها از نوع برنج بوده و در نزدیک سطح رتور تعبیه می‌شود و به میله‌های خارجی موسوم‌اند.

(ب) سری دوم میله‌ها از جنس مس بوده و در زیر سری اول و در داخل شیارهای رتور نصب می‌گردند و به میله‌های داخلی موسوم‌اند.

باید خاطر نشان ساخت که:

♦ مقاومت میله‌های برنجی یا میله‌های خارجی (سری اول) از مقاومت میله‌های مسی (سری دوم) بیشتر است.

♦ چون میله‌های مسی یا میله‌های داخلی (سری دوم) بهم نزدیک‌تراند لذا راکتانس ناشی آنها نسبت به میله‌های برنجی (میله‌های خارجی) بیشتر خواهد بود.

راکتانس‌های ناشی بصورت راکتانس‌های اندوکیو در مدار معادل رتور ظاهر می‌شوند. برای آنکه بهتر درک کنیم چرا رتور قفس سنجایی مضاعف، مشخصه موتور را بهبود می‌بخشد به مطالب زیر توجه می‌کنیم:

(الف) فرکانس جریان رتور در لحظات راه‌اندازی زیاد است (معادل فرکانس منبع تغذیه موتور). وقتی سرعت موتور زیاد شد فرکانس جریان رتور کم می‌شود (نزدیک صفر).

(ب) در راه‌اندازی میله‌های خارجی جریان بیشتری می‌کشند زیرا کل امپدانس آنها کمتر است و چون R در میله‌های خارجی از X بیشتر است لذا ضریب توان مدار بالا است و ترکیبی از جریان زیاد و ضریب توان بالا گشتاور یا کوئل راه‌اندازی نسبتاً خوبی ایجاد می‌کند.

(ج) در سرعت‌های بالا تمامی جریان از میله‌های داخلی عبور می‌کند و در فرکانس‌های کم از راکتانس این میله‌ها می‌توان صرفه نظر کرد و مشخصه خوبی در سرعت‌های بالا پدیدار می‌شود.

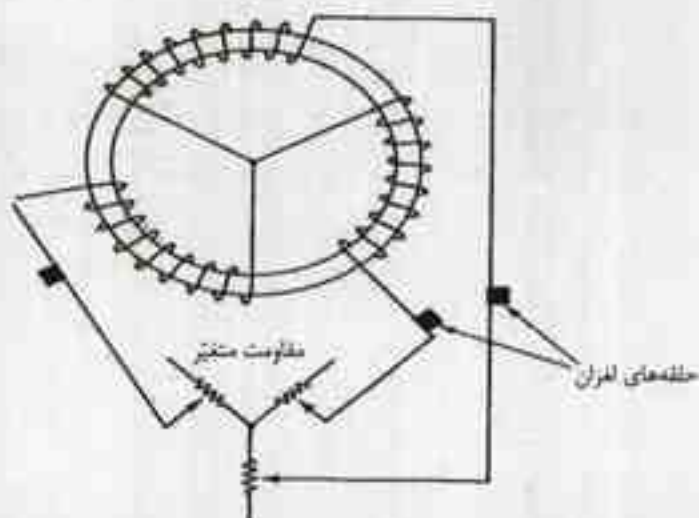
ب-۳- رتورهای سیم‌پیچی شده

در اینگونه رتورها در شیارهای رتور سیم پیچ تعبیه شده است و می‌توان در اینگونه رتورها مقاومت خارجی از طریق حلقه‌های لغزان به سیم پیچ‌های رتور متصل ساخت و به اینگونه مقاومت‌های خارجی گاهی رتوستای حلقه‌های لغزان نیز گفته می‌شود. در اینگونه اتصالات براحتی می‌توان مقاومت رتور را تغییر داد و مشخصه جالبی در لحظات راه‌اندازی و بهره‌برداری از ماشین بدست آورد.

شکل (۱-۱۲) شمای ساده اینگونه رتورها را نشان می‌دهد و باید در اینگونه رتورها نکات زیر را بخاطر

دانسته

- الف) سیم پیچ اینگونه رتورها نیز باید سه فاز باشد.
- ب) تعداد قطب‌های حاصله از اینگونه سیم‌پیچ باید با تعداد قطب‌های حاصله در استاتور مساوی باشد.
- ج) تعداد شیارهای رتور و استاتور باید یکسان باشد.



شکل شماره ۱-۱۲: شمای ساده یک موتور سیم پیچی شده در موتور القایی سه فاز

۳-۶- مشخصه‌های اسمی موتورهای القایی یا استکرون سه فاز

معمولاً مشخصه‌های اسمی موتورهای القایی سه فاز به شرح زیر هستند:

- ۱- ولتاژ اسمی که باید به استاتور اعمال شود و معمولاً ولتاژ «خط-خط» مورد نظر است.
- ۲- فرکانس اسمی که باید ولتاژ منبع تغذیه، همان فرکانس اسمی را داشته باشد.
- ۳- توان اسمی: شامل حداکثر توان مکانیکی است که موتور می‌تواند دائماً تأمین کند و به آن گاهی بار کامل نیز گفته می‌شود.
- ۴- سرعت اسمی: سرعتی است که موتور تحت آن توان اسمی (بار کامل) خود را تحویل می‌دهد.
- ۵- جریان اسمی: جریانی است که موتور از منبع تغذیه در حالتی می‌کشد که بار اسمی (بار کامل) خود را تحویل می‌دهد و معمولاً جریان خط مد نظر است.
- ۶- ضریب توان اسمی: ضریب توان موتور در حالتی است که بار اسمی خود را تحویل می‌دهد.

۴-۶- لغزش

لغزش در موتورهای القایی سه فاز اینچنین بدست می‌آید:

$$Slip = s = \omega_s - \omega$$

رابطه شماره (۱-۳۱)

در روابط اخیر ω سرعت سنکرون و ω سرعت واقعی رتور می‌باشند. معمولاً لغزش را بصورت درصدی از سرعت سنکرون بیان می‌دارند.

در سیستم SI داریم:

$$S\% = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \times 100$$

رابطه شماره (۱-۳۲)

۵-۶- منحنی "گشتاور-لغزش"

برای بررسی دقیق‌تر تغییرات لغزش با توجه به تغییرات گشتاور بار، باید رابطه دقیق‌تری بین گشتاور و لغزش بدست آوریم. یکی از راههای حصول به حل دقیق‌تر مسأله، استفاده از منحنی "گشتاور-لغزش" است که ما آنرا با منحنی "TSL" نشان می‌دهیم. این منحنی تغییرات گشتاور خروجی نسبت به درصد لغزش می‌باشد. شکل (۱-۱۳) یک نمونه منحنی TSL را برای یک موتور القایی سه فاز نشان می‌دهد.

رابطه گشتاور اینچنین است.

$$T = \frac{(K\phi E_{BR} R_R) S}{R_R^2 + (SX_{BR})^2}$$

رابطه شماره (۱-۳۳)

شکل (۱-۱۳) رسم معادله فوق می‌باشد. در لحظه راه‌اندازی لغزش ۱۰۰٪ است و گشتاور راه‌اندازی حاصل می‌گردد. حال رتور شتاب می‌گیرد و بالاخره ماشین در سرعت با لغزش خاصی مستقر می‌گردد.

هرگاه بار موتور، بار اسمی باشد، لغزش موتور همان لغزش اسمی خواهد بود. اگر بار زیاد شود، لغزش زیاد می‌شود (سرعت کم می‌شود) و گشتاور نیز مطابق نیاز بار، افزایش می‌یابد. اگر معادله فوق را رسم کنیم شکلی مطابق شکل (۱-۱۳) حاصل می‌گردد و این منحنی دارای ماکزیممی است که به آن گشتاور ماکزیمم^۱ گفته می‌شود. هرگاه گشتاور بار از این گشتاور ماکزیمم افزون‌تر شود ماشین سرعش به تدریج کاهش می‌یابد تا بالاخره به حالت سکون در می‌آید.

از نظر ریاضی نقطه ماکزیمم منحنی (۱-۱۳) که به معادله بالا مربوط می‌شود اینچنین بدست می‌آید.

$$R_R^2 = (SX_{BR})^2$$

رابطه شماره (۱-۳۴)

$$R_R = SX_{BR}$$

رابطه شماره (۱-۳۵)

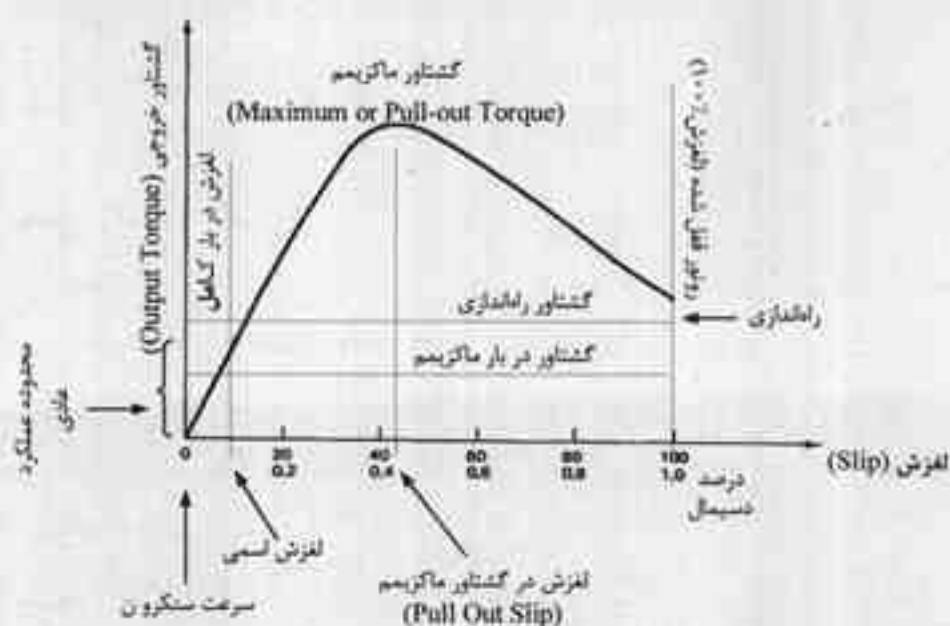
$$S_{PO} = \frac{R_R}{X_{BR}}$$

باید توجه داشت که لغزش مربوط به گشتاور ماکزیمم را با لغزش ماکزیمم^۲ نشان می‌دهند. همانطور که از نمودار شکل (۱-۱۳) پیداست منحنی در محدوده لغزش ۱۰۰٪ (حالت سکون و راه‌اندازی) تا لغزش صفر مربوط به سرعت سنکرون رسم شده است. همچنین در این شکل نقاط مربوط به گشتاور ماکزیمم، لغزش ماکزیمم و گشتاور راه‌اندازی نشان داده شده‌اند.

1. Percent Slip

2. Maximum or Pull-Out Torque

3. Pull-Out Slip



شکل شماره ۱-۱۳: منحنی گشتاور لغزش برای یک موتور القایی سه فاز

با افزایش لغزش، جمله $(S X_{im})$ در امپدانس رتور بیشتر می‌شود تا بالاخره $S X_{im}$ با R_R مساوی گردد. در این لحظه ضریب توان رتور ۰/۷۰۷ خواهد بود. حال اگر بار زیادتر شود و لغزش بیشتر گردد ضریب توان رتور کم می‌شود و بالتبعه توان حاصله توسط رتور کاهش می‌یابد. کم شدن توان، باعث زیادتر شدن لغزش و کاهش بیشتر ضریب توان رتور می‌گردد که خود دوباره بر کم شدن توان اثر می‌گذارد این فرایند آنقدر ادامه می‌یابد تا موتور بایستد.

۶-۶- روتورهای سیم پیچی شده

در بخش قبل تنها اثر تغییر بار را بر روی سرعت ماشین مورد بررسی قرار دادیم. اما اگر رتور ماشین از نوع رتور سیم‌پیچی شده باشد می‌توان مقاومت هر فاز رتور را تغییر داد، با تغییر مقاومت رتور نه تنها لغزش ماکزیمم تغییر می‌کند بلکه تحت گشتاور بار مفروضی می‌توان لغزش را تغییر داد، با تقریب خوب می‌توان گفت:

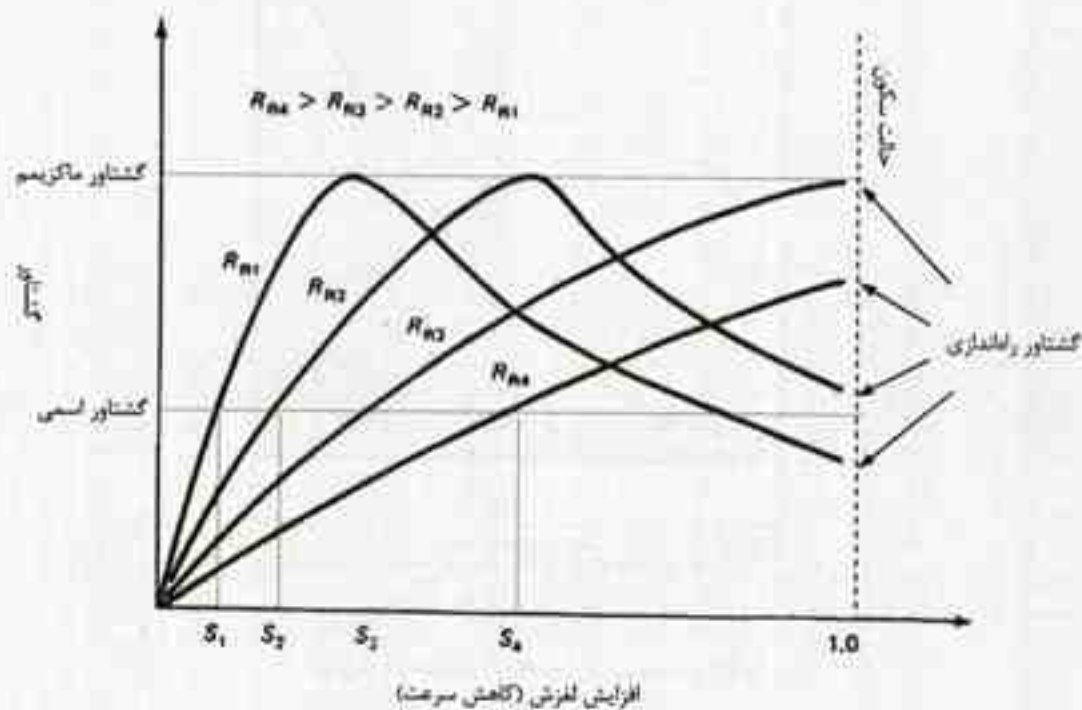
$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{R_{R1}}{R_{R2}} \quad \text{رابطه شماره (۱-۳۶)}$$

یعنی نسبت لغزشها در دو حالت مختلف متناسب است با مقاومت رتور در این دو حالت، لذا اگر مقاومت رتور را زیاد کنیم لغزش نیز بیشتر می‌گردد، اما باید گفت که افزایش مقاومت رتور، گشتاور ماکزیمم را تغییر نمی‌دهد. نمودار شکل (۱-۱۳) اثر تغییر مقاومت رتور را بر روی منحنی TSL نشان می‌دهد. در نتیجه در می‌یابیم که با تغییر مقاومت رتور، می‌توان سرعت ماشین را تحت بار مفروض تغییر داد.

در اینجا نکاتی چند را یادآوری می‌کنیم:

۱- اگر مقاومت خارجی در مدار رتور نباشد، در این صورت مقاومت رتور به تنهایی در تعیین گشتاور مؤثر

است و دیگر نمی‌توان با روش تغییر مقاومت، سرعت را از این حالت بیشتر نمود.
۲- با افزایش مقاومت خارجی رتور، گشتاور رالانداز موتور بیشتر می‌شود.



شکل شماره ۱-۱۴: اثر مقاومت رتور بر روی منحنی گشتاور لغزش یا TSL

۶-۷- تلفات در موتورهای القایی سه فاز

تلفات ماشین یا همان تلفات داخلی موتور به دو دسته تقسیم می‌شوند: [نمودار شکل (۱-۱۵)]

۱- تلفات ثابت شامل:

الف) تلفات هسته در رتور و استاتور بخاطر تلفات هیستریزیس و تلفات جریان گردایی

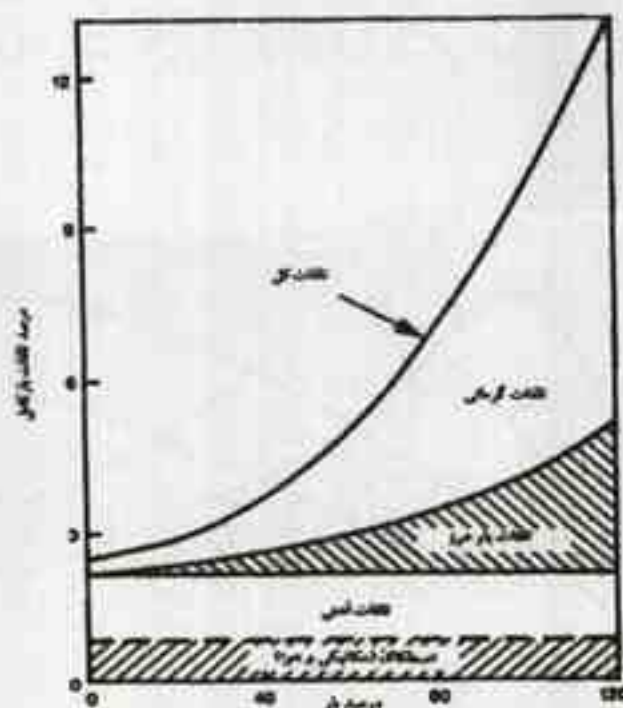
ب) تلفات ناشی از اصطکاک

ج) تلفات ناشی از تهویه

۲- تلفات متغیر که با بار تغییر می‌نماید.

الف) تلفات مسی در استاتور

ب) تلفات مسی در رتور



شکل شماره ۱-۱۵: افت توان در موتورهای الکتریکی

الف- تلفات هسته در رتور

در شرایط عادی، فرکانس جریان رتور کم است و لذا تلفات هسته‌ریس و جریان گردابی خیلی کم می‌باشند. لذا از تلفات هسته در رتور صرف‌نظر می‌شود.

ب- تلفات هسته در استاتور

این تلفات بخاطر شار اصلی و شارهای ناشی پدیدار می‌گردد و با تغییر بار این شارها به میزان ناچیزی تغییر می‌کنند و با تقریب کافی، تلفات هسته در استاتور را از بی باری تا بار کامل ثابت فرض می‌کنیم.

ج- تلفات ناشی از اصطکاک و تهویه

این تلفات بخاطر دوران مکانیکی رتور می‌باشد و چون سرعت از حالت بی‌باری تا بار کامل به میزان ناچیزی تغییر می‌کند، لذا این تلفات را که تلفات مکانیکی نیز به آن گفته می‌شود در طول مدت بهره‌برداری از ماشین، ثابت در نظر می‌گیریم.

د- تلفات مسی استاتور

این تلفات ناشی از $R I^2$ در سیم‌های استاتور است و چون تابعی از بار می‌باشد لذا باید در هر مرحله از بهره‌برداری آنرا حساب کرد.

ه- تلفات مسی رتور

این تلفات ناشی از RI^2 در سیم‌های رتور است و در رتورهای سیم‌پیچی شده به سهولت قابل اندازه‌گیری است. اما در رتورهای قفس سنجابی برای تعیین این تلفات از روش‌های پیشرفته‌ای استفاده می‌شود.

۸-۶- تشریح بخش توان در موتورهای القایی سه فاز

قبل از آنکه آزمایش‌های مربوط به تعیین تلفات درون اینگونه موتورها را توضیح دهیم، قدری درباره چگونگی بخش توان در موتورهای القایی صحبت می‌کنیم. علت این امر آن است که محاسبات عددی در مورد آزمایش‌ها را واضح‌تر می‌سازد. برای سهولت امر، شکل ۱۵ را در نظر می‌گیریم. هرگاه سیم‌پیچ استاتور به منبع تغذیه (شکله) وصل گردد، توان الکتریکی وارد موتور می‌شود و چون موتورها سه فاز هستند، این توان وارد شده به موتور اینچنین خواهد بود (بر حسب وات یا کیلووات):

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad \text{رابطه شماره (۱-۳۷)}$$

هنگام آزمایش بر روی موتور ضریب توان ($\cos \theta$) مشخص نیست اما با استفاده از روش دو واتمتری می‌توان توان ورودی را سنجید

$$P_1 = W_1 + W_2 \quad \text{رابطه شماره (۱-۳۸)}$$

در استاتور دو نوع تلفات وجود دارد:

الف) تلفات هسته (P_C) که به ولتاژ منبع تغذیه بستگی دارد.

ب) تلفات مسی (P_{Cu}) که به جریان خط بستگی دارد و البته به بار نیز بستگی خواهد داشت.

اگر مجموع تلفات فوق از توان ورودی کسر گردد توان بدست آمده از طریق فاصله هوایی به رتور منتقل می‌شود، لذا:

$$P_R = P_1 - P_C - P_{Cu} \quad \text{رابطه شماره (۱-۳۹)}$$

در رتور تلفات هسته ناچیز است و تلفات مسی رتور به لغزش (سرعت) بستگی دارد به سهولت می‌توان رابطه تلفات مسی استاتور و توان منتقله شده به رتور را اینچنین نوشت:

$$P_{CuR} = s P_R \quad \text{رابطه شماره (۱-۴۰)}$$

پس از اینکه تلفات مسی رتور از توان وارده به رتور کسر شود توان حاصله توسط رتور بدست می‌آید.

$$P_{dev} = P_R - P_{CuR} \quad \text{رابطه شماره (۱-۴۱)}$$

اگر توان مکانیکی ناشی از تهویه و اصطکاک از توان حاصله فوق کسر شود توان خروجی موتور بدست می‌آید.

$$P_O = P_{dev} - P_M \quad \text{رابطه شماره (۱-۴۲)}$$

در آزمایش‌هایی که بر روی موتور جهت تعیین تلفات فوق‌الذکر انجام می‌شود مجموع تلفات ناشی مکانیکی و هسته استاتور بدست می‌آید ولی نمی‌دانیم که چه مقدار از این تلفات ثابت، شامل تلفات مکانیکی است و چه مقدار شامل تلفات هسته استاتور می‌باشد ما می‌توانیم چنین فرض کنیم:

(الف) کل تلفات ثابت، مربوط به تلفات هسته استاتور بوده و آنرا در مدار استاتور منظور می‌نمائیم.

(ب) کل تلفات ثابت مربوط به تلفات مکانیکی رتور بوده و آنرا در مدار رتور منظور می‌کنیم در عمل ممکن است هر دو روش فوق را انجام دهیم ولی در هر مورد خطا حاصل می‌شود زیرا:

- ۱- در حالت اول که کل تلفات را برای استاتور منظور می‌نمائیم، تلفات مسی محاسبه شده در رتور ناچیز خواهد بود زیرا تلفات مسی رتور تابعی از توان منتقله از استاتور به رتور است.
- ۲- در حالت دوم که کل تلفات را برای رتور منظور می‌نمائیم، تلفات مسی محاسبه شده رتور بسیار زیاد خواهد شد.

اما ما حالت دوم را بیشتر مد نظر می‌داریم یعنی کل تلفات ثابت را متعلق به مدار رتور می‌دانیم زیرا:

(الف) تخمین محتاطانه‌تری از راندمان بدست خواهیم آورد زیرا تلفات محاسبه شده قدری از مقدار واقعی بیشتر خواهد شد.

(ب) از آنجائیکه توان مکانیکی (P_{me}) را صفر نگرفته‌ایم لذا توان خروجی با توان حاصله یکسان نخواهد بود و حقیقت امر هم همین است با این فرضیات تلفات هسته (P_c) را در رابطه P_R صفر می‌گیریم و آنرا یکجا همراه با P_{me} در معادله P_O منظور می‌کنیم.

۹-۶- آزمایش‌های مربوط به تعیین تلفات

دو آزمایش برای تعیین تلفات موتورهای القایی سه فاز انجام می‌دهیم. اما قبل از این آزمایش‌ها، باید مقاومت مؤثر هر فاز استاتور را بدست آوریم. مقاومتی که از آزمایش dc بدست می‌آید را در ضریب ۱/۲۵ ضرب می‌کنیم تا مقاومت مؤثر هر فاز بدست آید.

$$r_e = 1.25 r_a \quad \text{رابطه شماره (۱-۲۴)}$$

به سهولت می‌توان دریافت که کل تلفات مسی در سیم‌پیچ استاتور اینچنین است:

$$P_{\text{Cus}} = 3.2 r_e I_L^2 \quad \text{رابطه شماره (۱-۲۵)}$$

در رابطه فوق I_L همان جریان خط می‌باشد.

باید گفت که رابطه فوق برای اتصال Δ (مثلث) و Y (ستاره) هر دو متغیر است، زیرا سیم‌پیچ استاتور در برخی از موتورهای بصورت مثلث (Δ) بوده و در برخی بصورت ستاره (Y) می‌باشد.

حال آزمایشی مطابق شکل ۱۵ انجام می‌دهیم.

الف- آزمایش بی‌باری

در این آزمایش ولتاژ اسمی را به استاتور اعمال می‌کنیم ولی به محور موتور بار متصل نمی‌کنیم. چون ماشین بی‌بار است، سرعت زیاد بوده و به عبارت دیگر لغزش بسیار ناچیز است. جریان استاتور در حالت بی‌باری کم است. لذا در این آزمایش، تلفات مسی بسیار کم است در نتیجه توان ورودی صرف کل تلفات ثابت ماشین $(P_c + P_m)$ و تلفات ناچیز مسی در استاتور می‌شود. باید گفت که تلفات مسی در رتور نیز در حالت بی‌باری بسیار کم است. لذا اگر تلفات مسی استاتور را از رابطه P_{CuS} پیدا کرده و از توان ورودی کسر کنیم کل تلفات ثابت $(P_c + P_m)$ بدست می‌آید. و همانطوریکه گفتیم P_c را صفر می‌گیریم و کل تلفات ثابت را در مدار رتور منظور می‌کنیم. لذا با این آزمایش کل P_m حاصل می‌گردد عبارت فوق را در رابطه زیر خلاصه می‌کنیم.

$$P_c + P_m = W_1 + W_2 - P_{CuS} \quad \text{رابطه شماره (۱-۴۶)}$$

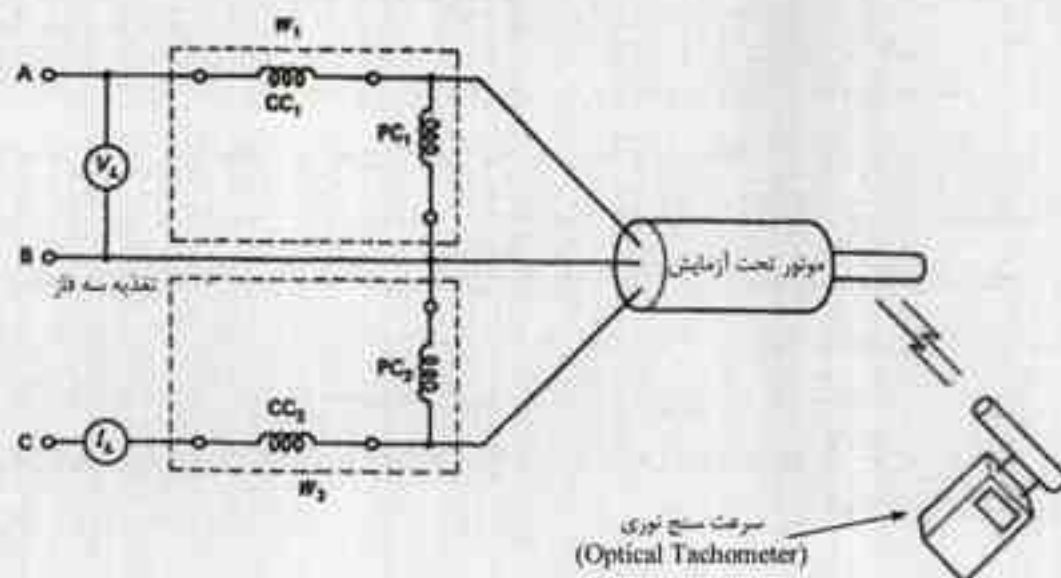
در رابطه اخیر W_1 و W_2 مقادیر واتمترها بوده و P_{CuS} تلفات مسی ناچیز استاتور است که از رابطه بالامحاسبه می‌شود.

ب- آزمایش در بار اسمی

از مدار شکل (۱-۱۶) می‌توان در حالت بار اسمی نیز استفاده کرد. در این آزمایش باید بار اسمی بر محور موتور اعمال شود. هنگامیکه موتور بار اسمی را تغذیه می‌کند تمام دستگاههای اندازه‌گیری و سرعت موتور خواننده می‌شود. هرگاه جریان خط وارده شده به موتور همان جریان اسمی موتور گردید به شرایط اسمی رسیده‌ایم. حال آمپر متر ورودی را می‌خوانیم (I_L) و تلفات مسی استاتور را در بار اسمی حساب می‌کنیم. دور سطح سرعت اسمی را می‌دهد و می‌توانیم لغزش در بار اسمی را حساب کنیم. با خواندن واتمترها و استفاده از روابط ذکر شده می‌توان تلفات مسی را بدست آورد (P_{CuS}) .

البته این تلفات مسی در رتور مربوط به شرایط اسمی ماشین است. با توجه به اینکه P_c را صفر گرفته‌ایم لذا روابط P_o و P_{sc} توان خروجی را به ما خواهند داد. توجه باید کرد که کل P_m مربوط به مدار رتور در آزمایش قبلی بدست آمده است.

با توجه به رابطه $P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$ می‌توان ضریب توان موتور را در بار اسمی بدست آورد زیرا P, I, V از آزمایش مربوطه به بار اسمی توسط دستگاههای اندازه‌گیری حاصل می‌شوند.



شکل شماره ۱-۱۶: مدار مربوط به آزمایش تعیین تلفات در موتورهای القایی سه فاز

۶-۱۰- روش راه‌اندازی موتورهای القایی سه فاز

دو روش برای راه‌اندازی اینگونه موتورها وجود دارد:

۱- وصل مستقیم موتور به شبکه (منبع تغذیه)

۲- استفاده از راه‌انداز

در روش اول (وصل مستقیم) ولتاژ اسمی به ترمینال‌های استاتور اعمال می‌گردد. اما موتورهای استکرون سه فاز در لحظه راه‌اندازی بین ۵ تا ۱۰ برابر جریان اسمی خود را از شبکه می‌کشند. مثلاً اگر در یک موتور سه فاز ۲۲۰ ولتی (۲۲۰ ولت ولتاژ خط می‌باشد) جریان اسمی ۱۰ آمپر باشد، لذا در لحظه راه‌اندازی حدود ۵۰ تا ۱۰۰ آمپر می‌کشد که خود مشکلاتی برای موتور و منبع تغذیه فراهم می‌سازد. البته این روش (وصل مستقیم) را می‌توان برای موتورهای کوچک (تا ۵ اسب بخار یا ۳ کیلوواتی) اعمال نمود ولی برای موتورهای بزرگتر باید از راه‌اندازهای مخصوص استفاده کرد. یکی از روش‌های متداول، استفاده از راه‌اندازهای "ستاره- مثلث" می‌باشد. از این راه‌اندازها می‌توان برای موتورهایی که استاتور آنها بصورت مثلث می‌باشد استفاده نمود.

ابتدا سیم‌پیچ‌های استاتور را مطابق شکل (۱۷-۱) به کلید "ستاره- مثلث" متصل می‌سازیم. در لحظه راه‌اندازی کلیدها در وضعیت شماره (۱) قرار دارند و لذا اتصال استاتور بصورت ستاره می‌باشد. هرگاه سرعت موتور بالا رفت و لغزش به حدود ۲٪ رسید کلیدها را به وضعیت شماره ۲ می‌بریم. حال استاتور به وضعیت مثلث برده می‌شود. با استدلال زیر می‌بینیم که بدین ترتیب جریان راه‌اندازی به یک سوم تقلیل می‌یابد. در اتصال مثلث جریان راه‌اندازی اینچنین است:

$$I_p = \frac{V_L}{Z}$$

رابطه شماره (۱-۴۶)

$$I_{LD} = \sqrt{3} I_P = \frac{\sqrt{3} V_L}{Z} \quad \text{رابطه شماره (۴۷-۱)}$$

در اتصال ستاره جریان راه‌اندازی اینچنین است:

$$V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \text{رابطه شماره (۴۸-۱)}$$

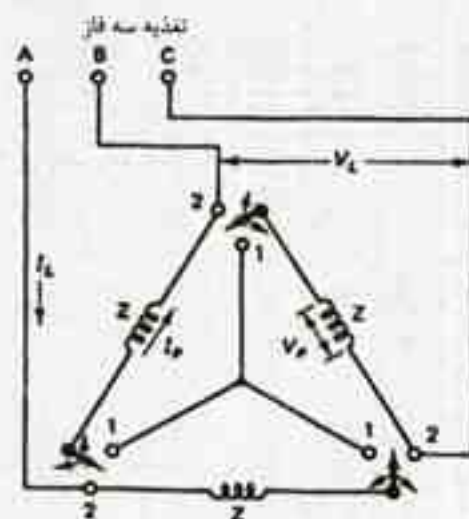
$$I_P = \frac{V_P}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3} Z} \quad \text{رابطه شماره (۴۹-۱)}$$

$$I_{LY} = I_P = \frac{V_L}{\sqrt{3} Z}$$

$$\frac{I_{LY}}{I_{LD}} = \frac{V_L / (\sqrt{3} Z)}{(\sqrt{3} V_L) / Z} = \frac{1}{\sqrt{3} \sqrt{3}} = \frac{1}{3}$$

$$I_{LY} = \frac{1}{3} I_{LD} \quad \text{رابطه شماره (۵۰-۱)}$$

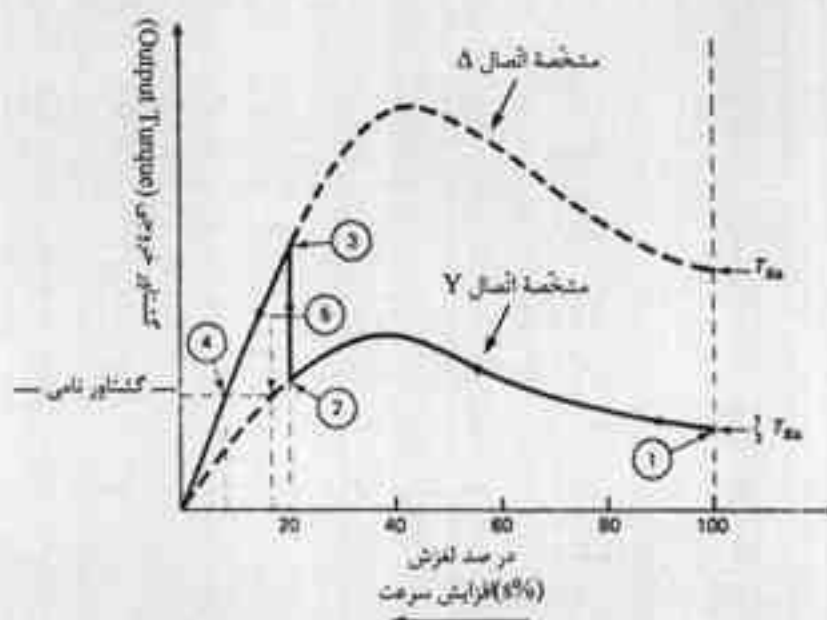
می‌بینیم که جریان خط در لحظه راه‌اندازی در حالت ستاره ثلث جریان خط در حالت مثلث خواهد بود.



شکل شماره ۱-۱۷: شمای راه‌انداز ستاره مثلث در موتورهای القایی سه فاز

چون با اتصال ستاره شروع می‌کنیم و جریان کمتر از حالت مثلث است لذا گشتاور نیز کمتر خواهد بود. در لحظه راه‌اندازی ولتاژ دو سر سیم‌های استاتور در حالت ستاره $V_L / \sqrt{3}$ می‌باشد و از رابطه در می‌یابیم که گشتاور راه‌انداز در حالت ستاره به ثلث تقلیل می‌یابد. در نتیجه در این نوع راه‌اندازی که با حالت ستاره شروع می‌شود منحنی TSL مطابق شکل (۱۸-۱) می‌باشد. در لحظه راه‌اندازی از نقطه شماره (۱) شروع می‌کنیم و با سرعت گرفتن موتور به نقطه (۲) می‌رویم در این لحظه است که از وضعیت ستاره به وضعیت مثلث تغییر مکان می‌دهیم. لذا یک افزایش ناگهانی در گشتاور پدید می‌آید (نقطه ۳)، موتور از نقطه (۳) به شتاب خود ادامه می‌دهد تا بالاخره به نقطه (۴) مربوط به شرایط اسمی ماشین برسیم. باید گفت که اگر از وضعیت ستاره به

وضعیت مثلث نمی‌رفتیم در منحنی پائینی باقی می‌ماندیم و نقطه کار ماشین همان نقطه (۵) خواهد بود همانطور که مشاهده می‌شود سرعت در نقطه ۵ به مراتب کمتر از سرعت در نقطه (۴) است زیرا لغزش در نقطه ۵ از لغزش در نقطه ۴ بیشتر می‌باشد.



شکل شماره ۱-۱۸: منحنی گشتاور-لغزش هنگام استفاده از کلید راه انداز ستاره مثلث

فصل ۲

صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های تولید هوای فشرده

خلاصه

در این مجموعه گردآوری شده به مکانیزم‌های اساسی در بهره‌برداری از سیستم‌های هوای فشرده خواهیم پرداخت.

راهکارها و فرصت‌های بهبود کارایی انرژی و صرفه‌جویی انرژی در کاهش تلفات هوای فشرده تولید شده و نیز استفاده کارا از هوای فشرده تشریح خواهد گردید. در مجموع، روش‌های محاسباتی ساده در تخمین صرفه‌جویی‌های انرژی ناشی از فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی در کمپرسورها ارائه می‌گردد.

۱- مقدمه

هوای فشرده یکی از یوتیلیتی‌های رایج مورد استفاده در فرایندهای صنعتی بوده و سهم بسزایی را در هزینه عملیاتی تأسیسات ساخت و تولید بخود اختصاص می‌دهد. در تولید هوای فشرده، انرژی مورد استفاده انرژی الکتریکی است. متأسفانه، بدلائل:

نشت هوای فشرده، انتخاب نامناسب کمپرسورها، مصرف ناصحیح هوای فشرده و کنترل ضعیف روی سیستم هوای فشرده،

اغلب سیستم‌های هوای فشرده دارای راندمان پائین هستند. در این فصل، پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی برای کاهش هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های تولید هوای فشرده توضیح داده می‌شوند. در ابتدا، یک مرور اجمالی بر مبانی تراکم‌سازی گاز خواهیم داشت. سپس، اجزای اصلی لازم برای تولید، توزیع و بهره‌گیری از هوای فشرده را مورد بحث قرار خواهیم داد.

بالاخره در پایان، روش‌های محاسباتی هر کدام از راهکارهای صرفه‌جویی انرژی جهت کمی‌سازی میزان

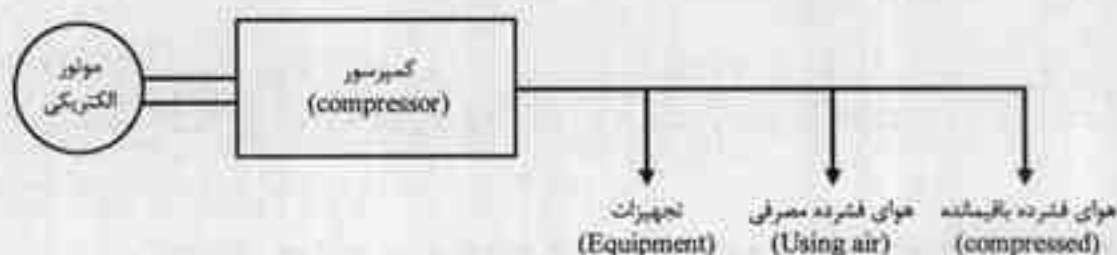
صرفه‌جویی با مثال‌های تشریحی را ارائه خواهیم داد.

۲- مروری بر مبانی اولیه

شکل (۱-۲) نشان‌دهنده یک سیستم ساده تولید هوای فشرده است که با یک موتور الکتریکی کار می‌کند. هوای فشرده عموماً در یک سیستم مرکزی تولید می‌شود و سپس به محل‌های مختلف با کاربردهای متفاوت توزیع می‌گردد.

کلاً، یک سیستم هوای فشرده شامل چندین جزء به قرار زیر است:

- ♦ یک یا چند کمپرسور که به یک محرک متصل هستند. این محرک می‌تواند یک موتور الکتریکی باشد.
- ♦ یک سیستم توزیع با لوله‌کشی‌ها، شیرها، تنظیم‌کننده‌ها و کنترل‌ها که این سیستم تجهیزات مختلف مصرف‌کننده هوای فشرده را تغذیه می‌کند.
- ♦ سایر تجهیزات مانند دریافت‌کننده‌ها، خشک‌کن‌ها و صافی‌ها (فیلترها)



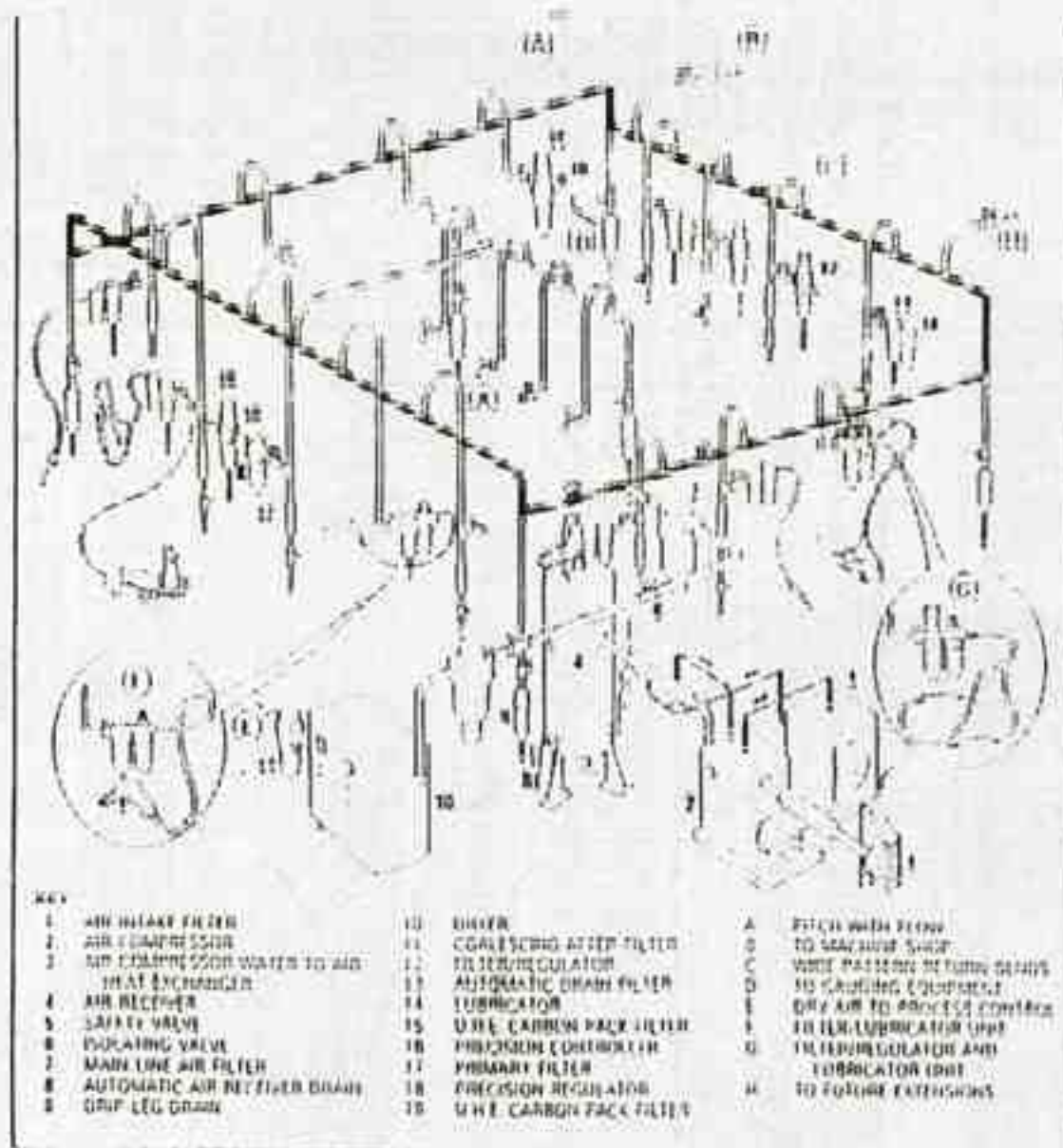
شکل شماره ۱-۲: نمودار سیستم هوای فشرده که توسط یک موتور الکتریکی کار می‌کند

راندمان کلی یک سیستم هوای فشرده وابسته به سه مرحله است:

مراحل تولید، توزیع و یکارگیری یا استفاده. در خلال یک ممیزی، ارزیابی هر کدام از مراحل مهم است. بدین منظور که عملکرد و نهایتاً پتانسیل بهبود کارایی انرژی یک سیستم هوای فشرده، مورد ارزیابی قرار گیرد. یک مرور مختصری از مبانی اولیه و عواملی که روی مصرف انرژی در هر مرحله از تولید، توزیع و استفاده تأثیر می‌گذارند متعاقباً توضیح داده خواهند شد.

شکل (۲-۲) شماتیک یک سیستم هوای فشرده متداول را نشان می‌دهد.

1. Receivers
2. Dryers
3. Filters



شکل شماره ۲-۳: شماتیک یک سیستم هوای فشرده متداول

۳- دسته‌بندی انواع کمپرسورها

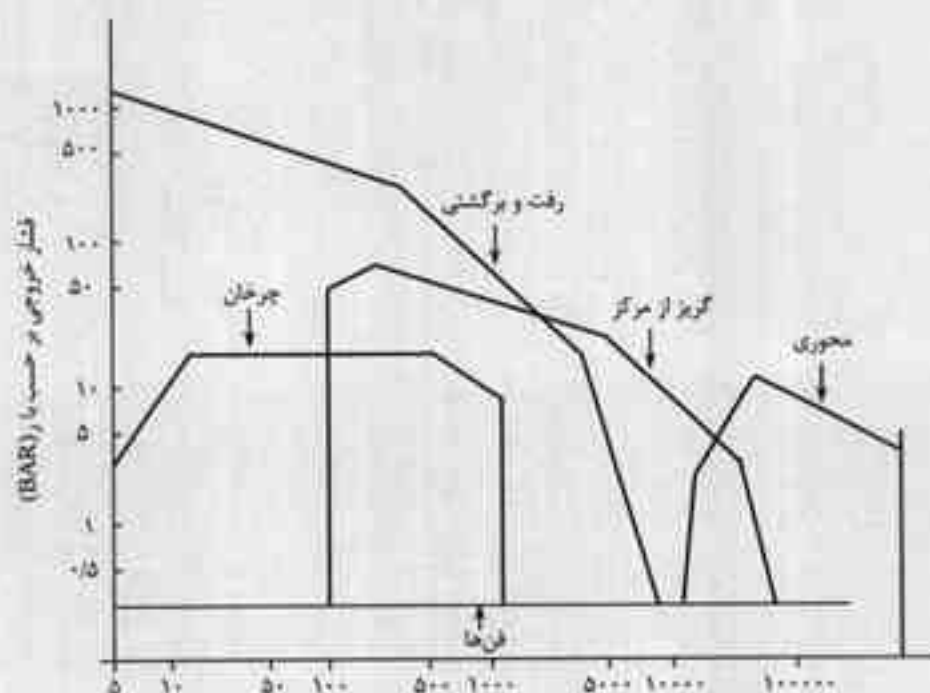
نوع انتخاب کمپرسور برای هر کارگاه، بایستی با توجه به میزان فشار کاری و مقدار مصرف مورد نیاز کارگاه، تهیه گردد و با توجه به دو نکته یعنی فشار کاری و مقدار تولید، کمپرسورها را از نظر ساختمان داخلی به انواع مختلفی دسته‌بندی می‌کنند. شکل (۲-۳) نمودار مقایسه دبی و فشار خروجی در کمپرسورهای مختلف را نشان می‌دهد. معیار این دسته‌بندی را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد:

گروه اول:

کمپرسورهایی هستند که دارای آهنگ حجمی کم و فشار زیاد هستند. این گروه بر اساس جیس هوا در یک فضای محدود و کوچک کردن فضای موجود و به تبع بالا رفتن فشار آن عمل می‌کنند. کمپرسورهای پیستونی از موارد پر مصرف این گروه هستند.

گروه دوم:

کمپرسورهایی هستند که دارای آهنگ حجمی زیاد و فشار کم‌ترند. این گروه نیز بر اساس قانون عمومی سیالات و مکش سیال عمل می‌کنند. این نوع کمپرسورها هوا را از یک جهت مکیده و از جهت دیگر با شتاب خارج می‌کنند. با توجه به استفاده هوا با آهنگ حجمی بسیار بالا در نوربین گاز، کمپرسور آن از این گروه است.



شکل شماره ۲-۳: نمودار مقایسه دبی و فشار خروجی در کمپرسورهای مختلف

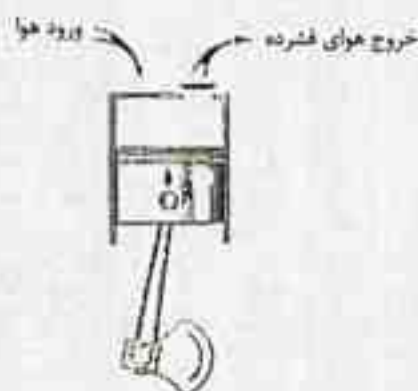
۳-۱- انواع کمپرسورها:**الف- کمپرسورهای جابجایی^۱**

این نوع از کمپرسورها یک مقدار معینی از هوا را در مدت معینی از زمان در یک سیلندر جلاب می‌کنند. این سیستم حجم هوا را کاسته و آن را فشرده می‌سازد. پس از این فشرده‌سازی، هوا که فشار آن بالا رفته تخلیه

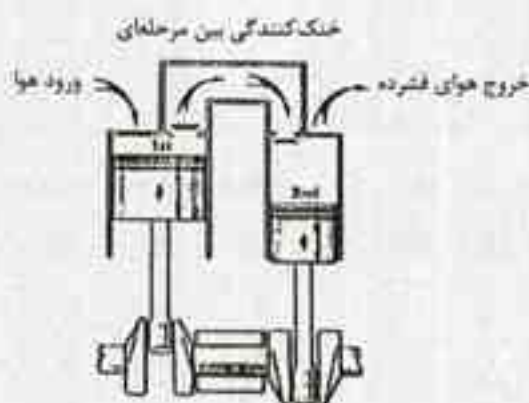
می‌گردد. این نوع کمپرسورها به چهار گونه با طبقه تقسیم‌بندی می‌شوند.

کمپرسورهای با پیستون‌های رفت و برگشتی^۱

این نوع از کمپرسورها شکل (۲-۴-الف) و (۲-۴-ب) با مدل‌ها و اندازه‌های متنوع بصورت خیلی رایج در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توان مورد نیاز برای این کمپرسورها می‌تواند از ۱ KW تا بیش از ۹۰۰۰ KW باشد. سطح فشار می‌تواند تا ۳۹۰ بار یا بیشتر نیز افزایش یابد. این نوع کمپرسورها در مقایسه با سایر انواع کمپرسورها، کاراترین نوع هستند.



شکل شماره ۲-۴-الف: کمپرسور رفت و برگشتی تک مرحله‌ای



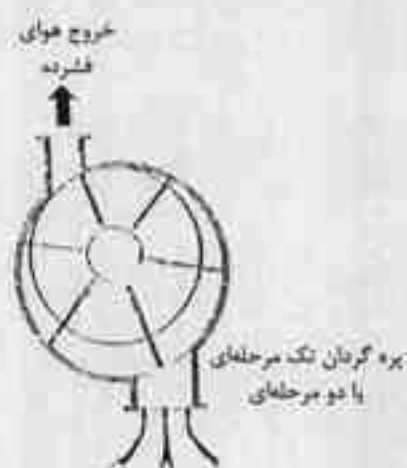
شکل شماره ۲-۴-ب: کمپرسور رفت و برگشتی دو مرحله‌ای

کمپرسورهای چرخان^۲

این نوع کمپرسورها شکل (۲-۴-ج) حرکات ارتعاشی بسیار کم دارند. در نتیجه در سکوت کامل کار می‌کنند. از

1. Compressors with Reciprocating Pistons
2. Rotary Compressors

نظر کمی سر و صدا این کمپرسورها قابل رقابت با کمپرسورهای نوع پیستونی هستند. از طرف دیگر، کمپرسورهای چرخان که ظرفیت توان ۹۳KW یا بیشتر را دارند توان بالایی را مصرف می‌کنند که در گستره ۶٪ تا ۲۰٪ این توان مصرفی به ازای هر متر مکعب در دقیقه (m^3/min) تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر مصرف توان ویژه^۱ (SEC) کمپرسورهای روتاری حدود ۶٪ تا ۲۰٪ بیش از مصرف توان ویژه کمپرسورهای پیستونی است.



شکل شماره ۲-۴-ج: کمپرسور چرخان

کمپرسورهای پیجشی^۲

هنگامی که از ترکیب این نوع کمپرسورها، شکل (۲-۴-د)، و سیستم‌های کنترل و هشدار دهنده پیچیده، استفاده شود، می‌توانند به مدت طولانی، بدون نیاز به تعمیرات اضافی، کار کنند. کمپرسورهای پیجشی مزایایی مانند هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر، توزیع یکنواخت‌تر هوا، و نیاز به فضای کمتری را دارا هستند.

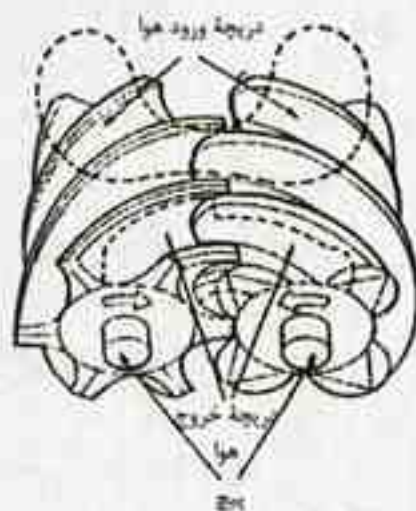
کمپرسورهای دیافراگمی^۳

این نوع از کمپرسورها، شکل (۲-۴-ه) کمپرسورهای کوچکی بوده و تک مرحله‌ای هستند. آنها قادرند که فشار هوا را توسط دیافراگم قابل انعطافی که دارند تا ۷ بار افزایش دهند.

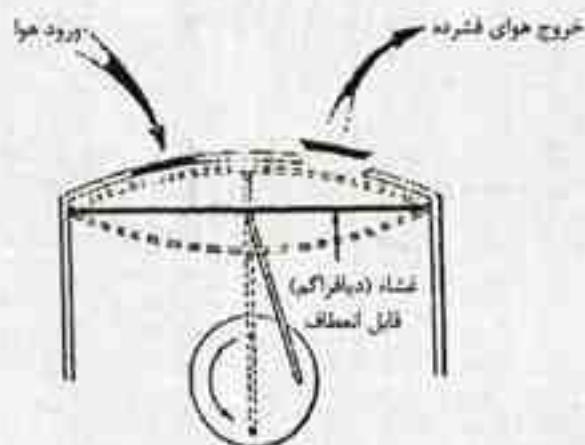
1. SEC: Specific Energy Consumption

2. Screw Compressors

3. Compressors with Diaphragm



شکل شماره ۲-۴-۳: کمپرسور بیهوشی



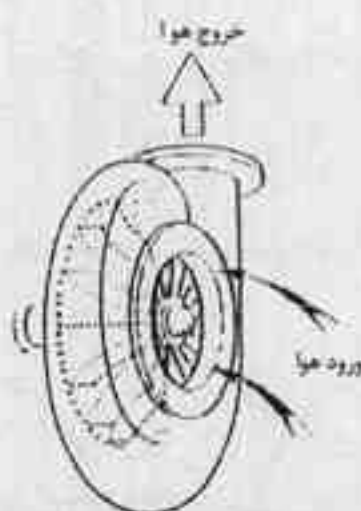
شکل شماره ۲-۴-۴: کمپرسور دیافراگمی

ب- کمپرسورهای دینامیکی^۱

کمپرسورهای دینامیکی بطور پیوسته هوا را مکیده و سپس سرعت جریان هوا را افزایش می‌دهد. این افزایش سرعت به منزله افزایش انرژی جنبشی هواست. هنگامی که سرعت جریان هوا در سیستم توزیع شروع به کاهش می‌نماید، انرژی جنبشی شروع به تبدیل شدن به انرژی فشاری می‌کند. بقیه انرژی جنبشی که تبدیل به انرژی فشاری نشده است تبدیل به انرژی حرارتی می‌شود. خنک‌سازی از ضروریات این نوع از کمپرسورهاست.

توربو کمپرسورها

این نوع از کمپرسورها بر دو نوع کمپرسورهای گریز از مرکز^۱ و محوری^۲، شکل (۲-۵) می‌باشند. استفاده از این کمپرسورها عموماً در صنایع و فرایندهای شیمیایی، کارخانجات فولاد، پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها و سیستم‌های انتقال سیال که به جریان بسیار بالای هوا نیاز دارند می‌باشد. تا ظرفیت $40 (m^3/min)$ نمی‌توانند بطور کارآ (یا کارایی بالاتر) کار کنند. به این دلیل این نوع از کمپرسورها در سیستم‌های هوای فشرده کارخانجات کوچک بکار گرفته نمی‌شوند.



شکل شماره ۲-۵: توربو کمپرسور

۲- تولید هوای فشرده

تولید هوای فشرده، مفهوم نسبتاً ساده‌تری را دارد و عموماً، توان مکانیکی اعمال شده به کمپرسور سبب افزایش فشار هوای ورودی می‌گردد. این هوای ورودی به کمپرسور شرایط جوی (اتمسفریک) (فشار $100 Kpa$ یا $1 bar$) را داراست. کمپرسورها می‌توانند با انواع مختلف، مانند کمپرسورهای گریز از مرکز^۳ (سانترفوز)، کمپرسورهای جابجایی^۴ یا کمپرسورهای پیچی^۵ با یک یا دو مرحله انتخاب شوند. برای واحدهای کوچک یا متوسط، کمپرسورهای پیچی بطور رایج در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جدول (۱-۲) نمونه فشار، نرخ هوادهی و توان مکانیکی مورد نیاز بصورت گسترده‌ایی برای انواع مختلف کمپرسورها را نشان می‌دهد.

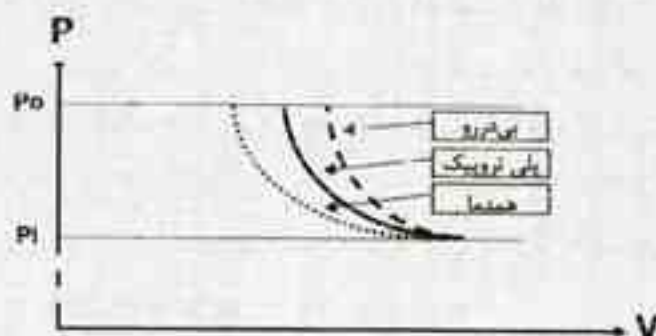
1. Centrifugal Compressors
2. Axial Compressors
3. Centrifugal Compressors
4. Displacement
5. Screw

جدول شماره ۲-۱: گسترده‌های کاربرد برای انواع مختلف کمپرسورها

توان مکانیکی مورد نیاز (KW/1000)	فشار مطلق (Mpa)	آهنگ حجمی هوای (m ³ /sec)	نوع کمپرسور
۰/۳۵-۰/۳۸	۰/۳۴-۲۷۵/۹	۰-۵	جلبجایی
۰/۴۶	۳/۵-۱۰۳۴/۳	۰/۵-۷۰/۵	سانتریفوز
۰/۳۳-۰/۴۱	۰/۱-۱/۸	۰/۵-۱۶/۵	پیچشی

با اعمال قانون اول ترمودینامیک روی گازهای ایده‌آل می‌توان یک تحلیل ساده‌ای از انرژی را در کمپرسورها انجام داد. با یک مرور ابتدایی روی تحلیل انرژی اعمال شده برای تراکم گاز ایده‌آل می‌توان پارامترهای مؤثر در کاهش انرژی برای تولید هوای فشرده را شناسایی نمود.

شکل (۲-۶) نمایانگر یک پیستون-سیلندر در خلال تراکم یک گاز ایده‌آل است. این کلی تغییرات فشار را بصورت تابعی از حجم اشغال شده توسط گاز در یک دیاگرام P-V، برای تراکم‌های همدم، بی‌دررو^۱ و پلی‌تروپیک^۲ نشان می‌دهد.



شکل شماره ۲-۶: فرایندهای تراکم همدم و بی‌دررو و پلی‌تروپیک

رابطه بین دماها و فشارها در ورودی (یا مکش) و خروجی (یا تخلیه) یک کمپرسور در فرایندهای تراکم پلی‌تروپیک، بی‌دررو و همدم می‌تواند بصورت رابطه زیر خلاصه شود:

1. Isothermal
2. Adiabatic
3. Polytropic

$$\frac{T_0}{T_i} = \left[\frac{P_0}{P_i} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{رابطه شماره (۱-۲)}$$

که در این رابطه:

$$\gamma = \left[\frac{C_p}{C_v} \right] \quad \text{(یعنی نسبت گرمای ویژه در فشار ثابت به گرمای ویژه در حجم ثابت) دارای مقادیر زیر می‌تواند باشد:}$$

$\gamma = 1$ ، هنگامی که تراکم همدم باشد

$\gamma = K$ ، هنگامی که تراکم بی‌دررو باشد ($K = 1/4$ برای هوای خشک)

$\gamma < K$ ، هنگامی که تراکم پلی‌تروپیک باشد (بطور نمونه $K = 1/3$ برای هوای خشک)

بایستی یادآور شویم که برای هوای خشک، یک رابطه ساده بین فشار، دما و چگالی موجود است. این رابطه همان معادله حالت است (یعنی $P.V = m.R.T$) که توسط معادله (۲-۲) برای هوای ورودی کمپرسور ارائه می‌شود:

$$P_i = \rho_i \cdot Z_{a,i} \cdot R_a \cdot T_i \quad \text{رابطه شماره (۲-۲)}$$

برای هوای خشک، ثابت R_a از طریق تقسیم ثابت عمومی گازهای ایده‌آل R ($R = 8314/4 \text{ J/Kg.mol.K}$) به جرم مولی هوا M_a ($M_a = 28/9$) محاسبه می‌شود. بنابراین مقدار ثابت R_a معادل 287 J/(Kg.K) است. مضافاً اینکه، فاکتور تراکم‌پذیری $Z_{a,i}$ دلالت بر رفتار متفاوت هوا با گاز ایده‌آل در مسئله تراکم‌پذیری دارد. مقدار $Z_{a,i}$ گستره‌ای بین صفر و یک را داراست و وابسته به فشار و دمای هوا است. برای فشار بالای 20000 Kpa (200 Atm)، فرض می‌شود که هوای خشک مانند یک گاز ایده‌آل رفتار می‌کند بطوریکه $Z_{a,i} = 1$.

شایان ذکر است که یک عبارت شبیه به رابطه (۲-۲) می‌تواند برای هوای خروجی کمپرسور نیز وجود داشته باشد. کار مورد نیاز برای تراکم یک آهنگ جریان جرمی $\dot{m}_a$ از هوای خشک می‌تواند از روی اعمال قانون اول ترمودینامیک روی یک فرایند تراکم گاز ایده‌آل تخمین زده شود.

بویژه، توان مکانیکی مورد نیاز برای یک تراکم همدم می‌تواند از روی معادله (۳-۲) محاسبه شود.

$$\dot{W}_m = \dot{m}_a \cdot R_a \cdot T_i \cdot \ln \left(\frac{P_0}{P_i} \right) \quad \text{رابطه شماره (۳-۲)}$$

توان مکانیکی مورد نیاز برای تراکم بی‌دررو و یا پلی‌تروپیک می‌تواند از روی معادله (۴-۲) تخمین زده شود.

$$\dot{W}_m = \frac{\dot{m}_a \cdot R_a \cdot T_i \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_0}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad \text{رابطه شماره (۴-۲)}$$

دو مشاهده مهم از روابط (۳-۲) و (۴-۲) در ارتباط با کارایی انرژی کمپرسورها خواهیم داشت:

الف) توان مکانیکی یک کمپرسور بطور خطی با دمای هوای ورودی افزایش می‌یابد. جهت ارتقاء کارایی انرژی مصرفی یک سیستم کمپرسور، دمای هوای ورودی به کمپرسور تا حد ممکن باید خنک شود.

ب) توان مکانیکی یک کمپرسور با نسبت فشار افزایش می‌یابد. بنابراین، تولید هوای فشرده با فشار تخلیه محدود به ماکزیمم فشار لازم برای تأسیسات، حائز اهمیت است. به عبارت دیگر، از فشرده‌سازی بیش از حد هوا تا حد ممکن بایستی اجتناب شود. مضافاً، تغییر فشار هوای ورودی می‌تواند اثر بسزایی روی توان مکانیکی مورد نیاز برای یک کمپرسور بگذارد. بویژه، اثر ارتفاع روی فشار محیط باید مد نظر قرار گیرد.

مثال (۱-۲): یک تحلیل مقایسه‌ای برای توان مکانیکی مورد نیاز جهت سه نوع تراکم (همگما، بی‌دررو و پلی‌تروپیک) را ارائه می‌دهد. از نتایج مثال (۱-۲) روشن می‌شود که تراکم بی‌دررو نسبت به دو نوع تراکم دیگر، انرژی ورودی بیشتری را می‌طلبد. حالت تراکم همگما شرایط کارکرد بهینه برای یک کمپرسور است. برای این کار باید دمای هوا در مدت زمان تراکم ثابت نگه داشته شود. بنابراین برای کاهش توان مکانیکی مورد نیاز کمپرسور، خنک‌سازی هوا در مدت فرایند تراکم بایستی انجام شود. متأسفانه در کمپرسورهای واقعی، شرایط ایده‌آل دمای ثابت برای هوا قابل تحقق نیست. اما با این وجود، چنانچه خنک‌سازی مناسب هوای ورودی تأمین گردد یک تراکم پلی‌تروپیک می‌تواند مبین یک تراکم واقعی باشد.

چنانچه بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت، خنک کن‌های بین دو مرحله‌ای^۱ جهت پراکندن حرارت در مدت زمان تراکم بکار می‌روند.

مثال (۲-۲): توان مکانیکی لازم را جهت متراکم‌سازی 1 Kg/sec از هوای خشک، از 100 Kpa و 20°C (شرایط محیطی) تا 800 Kpa (فشار مطلق) تحت تراکم‌های ایزوترمال، آدیاباتیک، یا پلی‌تروپیک ($\gamma = 1/4$) بیابید.

حل:

از رابطه (۳) استفاده می‌کنیم که $P_1 = 100 \text{ Kpa}$ و $P_0 = 800 \text{ Kpa}$ و $T_1 = 293^\circ\text{K}$ و $K_s = 287 \text{ J/(Kg.K)}$ توان مکانیکی لازم برای تراکم ایزوترمال 1 Kg/sec هوای خشک بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_m = (1 \text{ Kg/sec}) \cdot (287 \text{ J/Kg.K}) \cdot (293 \text{ K}) \cdot L_s \left(\frac{800 \text{ Kpa}}{100 \text{ Kpa}} \right) = 174.68 (\text{KW})$$

با استفاده از رابطه (۴-۲) و فرض $\gamma = K = 1/4$ ، توان مکانیکی لازم برای تراکم بی‌دررو بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_m = \frac{(1 \text{ Kg/sec}) \times (278 \text{ J/Kg.K}) \times (293 \text{ K}) \times 1.4}{1.4-1} \left[\left(\frac{800}{100} \right)^{1.4-1/1.4} - 1 \right] = 238.82 \text{ KW}$$

برای تراکم پلی‌تروپیک، توان مکانیکی لازم از روی رابطه (۲-۲) و با فرض $\gamma = K = 1/3$ محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_m = \frac{(1 \text{ Kg/sec}) \times (287 \text{ J/Kg.K}) \times (293 \text{ K}) \times 1.3}{1.3-1} \left[\left(\frac{800}{100} \right)^{1.3-1/1.3} - 1 \right] = 224.42 \text{ KW}$$

همانطور که انتظار می‌رفت تراکم همدم‌ها کمترین توان مکانیکی را نیاز دارد و این در حالی است که تراکم بی‌دررو بیشترین توان مکانیکی را به نسبت دو نوع تراکم دیگر مصرف می‌کند. توجه داشته باشید که تراکم پلی‌تروپیک که مابین یک فرایند تراکم واقعی است توان مکانیکی مورد نیازش بین توان مکانیکی همدم‌ها و بی‌دررو است. جالب توجه است که می‌توان توان مکانیکی مورد نیاز بر حسب آهنگ جرمی جریان هوا یا به ازای واحد جریان هوا (KW/L/sec) برای سه نوع تراکم ذکر شده از طریق چگالی هوای ورودی و تعیین آن در ورودی کمپرسور محاسبه نمود. معادله گاز ایده‌آل (۲-۲) می‌تواند برای تعیین چگالی هوا (با $Z=1$) بکار رود. برای $T_1 = 293 \text{ K}$ و $P_1 = 100 \text{ Kpa}$ ، چگالی هوا $1/189 \text{ Kg/m}^3$ می‌باشد. پس توان مکانیکی ورودی برای سه نوع تراکم به ترتیب زیر می‌باشد:

۰/۲۱ KW/L/sec برای تراکم همدم‌ها، ۰/۲۷ KW/L/sec برای تراکم پلی‌تروپیک و ۰/۲۹ KW/L/sec برای

تراکم بی‌دررو.

به چند دلیل توصیه می‌شود که تراکم از نوع بی‌دررو برای تخمین میزان توان و انرژی الکتریکی مورد نیاز یک کمپرسور هوای واقعی فرض شود. دلایل این امر عبارتند از:

الف) گرچه تراکم پلی‌تروپیک بیان بهتری برای فرایندهای تراکم واقعی است، ولی بدست آوردن مقدار نمای γ بدون انجام اندازه‌گیری‌های گران و پر هزینه، مشکل است. در برخی کاربردها مانند توربو کمپرسورها (که فشار هوا از طریق افزایش سرعت آن زیاد می‌شود)، نمای γ در حقیقت می‌تواند بزرگتر از $K = 1/4$ هم باشد.

ب) توان مورد نیاز برای تراکم پلی‌تروپیک نزدیک به توان مورد نیاز برای تراکم بی‌دررو است (نتایج مثال (۱-۲) را می‌توانید مقایسه کنید).

ج) توان مورد نیاز برای تراکم بی‌دررو، یک حد بالا برای توان ورودی واقعی است و بنابراین مابین بدترین شرایط با بدترین سناریو برای مصرف توان کمپرسور است.

هنگامی که کمپرسورها بوسیله موتورهای الکتریکی گردانده می‌شوند، انرژی الکتریکی KWh_{comp} که توسط سیستم هوای فشرده مصرف می‌شود از روی رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$KWh_{Comp} = \frac{\dot{W}_m \cdot LF_{Comp} \cdot N_{h,Comp}}{\eta_M} \quad \text{رابطه شماره (۵-۲)}$$

$\dot{W}_m$ = توان مکانیکی مورد نیاز توسط کمپرسور که مطابق رابطه (۳-۲) و (۴-۲) تخمین زده می‌شود.

$N_{h,Comp}$ = تعداد ساعات کارکرد کمپرسور در سال

LF_{Comp} = ضریب بار میانگین برای کارکرد کمپرسور

η_M = راندمان الکتروموتوری که کمپرسور را می‌چرخاند.

علاوه بر کمپرسور، واحدها و بخش‌های ضروری دیگری نیز برای تولید هوای فشرده لازم است. این واحدها توان مکانیکی و توان الکتریکی مورد نیاز جهت کارکرد سیستم‌های هوای فشرده را افزایش می‌دهند. برخی از تجهیزات جانبی و نقش آنها بطور خلاصه در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۵- اجزای دیگر از سیستم هوای فشرده

۵-۱- صافی‌ها^۱ (فیلترها)

هوای ورودی به کمپرسور، بخاطر حفاظت کمپرسور و تجهیزات آن از هرگونه آسیب‌های ناشی از ذرات معلق موجود در هوای تصفیه نشده، بایستی تا حد ممکن تمیز باشد. در حقیقت، ذرات معلق می‌توانند به بخش‌های مختلف کمپرسور رخنه کنند. این رخنه یا نفوذ دو اثر را خواهد داشت:

۱- مسدود ساختن سوراخ‌های کوچک (داخل کمپرسور، خطوط توزیع، یا ماشین‌های مصرف‌کننده هوای فشرده)

۲- ایجاد اصطکاک در سطوح داخلی کمپرسور (شامل سلیندرها، پیستون‌ها یا روتورها) که ذرات معلق روی این سطوح را پوشش می‌دهند. اثر تخریبی این پوشش هنگامی که ذرات معلق با روغن آمیخته شوند بیشتر خواهد شد. بسته به اندازه ذراتی که همراه هوا وارد کمپرسور می‌شوند صافی‌های هوای مختلف و روش‌های تمیزسازی هوا بصورت‌های مختلف می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. انتخاب یک صافی هوا برای یک کمپرسور بطور مشخص وابسته به دو عامل است: کارایی صافی و افت فشار حاصل از صافی.

کارایی صافی هوا، مشخصاً بصورت درصد ذرات نگه داشته شده تعریف می‌شود. افت فشار روی صافی هوا یا در اثر صفحه متخلخل صافی و یا بدلیل کثیفی و گرد و غبار روی صافی رخ می‌دهد. این افت فشار ظرفیت کمپرسور را کاهش می‌دهد.

بطور سرانگشتی، به ازای هر ۱۰۰ Kpa افت فشار، آهنگ جرمی جریان جرمی هوای کمپرسور تقریباً ۱٪ کاهش می‌یابد (با فرض اینکه کمپرسور توان بکسان را مصرف بکند). بنابراین انتخاب صافی‌های هوای مناسب و

تمیز کردن دوره‌ای آنها به منظور کاهش مصرف انرژی سیستم تولید هوای فشرده، بسیار مهم است. مثال (۲-۲) - افزایش هزینه انرژی برای کارکرد یک سیستم هوای فشرده را بدلیل کثیفی صافی هوا نشان می‌دهد.

مثال (۲-۲): افزایش میزان هزینه انرژی در یک کمپرسور ۱۰۰ KW که ۸۰۰۰ ساعت در سال کار می‌کند را به خاطر کثیفی صافی هوا بیابید با فرض اینکه:

الف) راندمان موتور الکتریکی ۹۰٪ باشد

ب) افت فشار برای یک صافی هوای تمیز ۱ Kpa و برای یک فیلتر هوای کثیف ۳ Kpa باشد

ج) هزینه الکتریسیته ۰/۰۵ \$/KWh است

حل

از قانون سرانگشتی استفاده می‌کنیم. همانطور که ذکر گردید به ازای هر ۱۰۰ Kpa افزایش در افت فشار روی صافی هوا، توان مکانیکی ۱٪ افزایش می‌یابد (چون توان مکانیکی متناسب با نرخ جریان جرمی است). بنابراین، جرمه هزینه انرژی EC_{Filter} ، بخاطر استفاده از صافی هوای کثیف می‌تواند بصورت زیر محاسبه شود:

$$EC_{Filter} = \frac{100 \times 8000 \times 0.05}{0.9} \times \left(\frac{3}{1}\right) \times 0.01 = 1330 \$ / year$$

۲-۵- مخازن هوای فشرده^۱

در بعضی تأسیسات هوای فشرده، مخازن هوای فشرده، مورد استفاده قرار می‌گیرند و محل نصب آنها با نزدیک به کمپرسورها و یا نزدیک به ماشین‌های انتهایی است که مصارف هوای فشرده بالا و متغیر دارند.

با سه دلیل می‌توان کاربرد مخازن هوای فشرده مرکزی یا محلی را توجیه نمود:

- ♦ ذخیره سازی انرژی به شکل هوای فشرده برای کاهش سیکلینگ^۲ ناخواسته کمپرسورها
- ♦ تنظیم جریان هوای فشرده بر مبنای نیاز بارهای انتهایی
- ♦ کنترل فشار تخلیه هوای فشرده خصوصاً هنگامی که از کمپرسورهای نوع پیستونی استفاده می‌شود.

تعیین اندازه مخزن (بصورت تجربی):

الف) اندازه ظرفیت مخزن در صورت نیاز بار ثابت

$$V_r = \frac{C \times B}{P}$$

ب) اندازه ظرفیت مخزن در صورت نیاز بار متغیر

$$V_r = \frac{3 \times C \times B}{P}$$

V_r = ظرفیت مخزن بر حسب (m^3)

1. Receiving Tanks
2. Cycling

$$C = \text{خروجی کمپرسور بر حسب (m}^3/\text{min)}$$

$$B = \text{فشار اتمسفر بر حسب بار}$$

$$P = \text{فشار کار بر حسب بار}$$

۵-۳- خشک کن‌ها^۱

هوای محیط محتوی بخار آب بوده و در واقع بصورت یک هوای مرطوب می‌باشد. این بخار آب می‌تواند یا در داخل کمپرسور و خطوط توزیع و یا در داخل تجهیزات مصرف کننده هوای فشرده کندانس شود. جهت کاهش یا حذف این کندانس آب، هوای فشرده باید از طریق استفاده از خشک کن‌ها خشک شود. انتخاب نوع خشک کن تابعی از دو فاکتور مهم ذیل است:

- ♦ کیفیت هوای خشک مورد نیاز که بر حسب فشار نقطه شبنم^۲ بیان می‌شود.
- ♦ هزینه کل خشک کن که شامل هزینه‌های اولیه، عملیاتی و تعمیر نگهداری است.

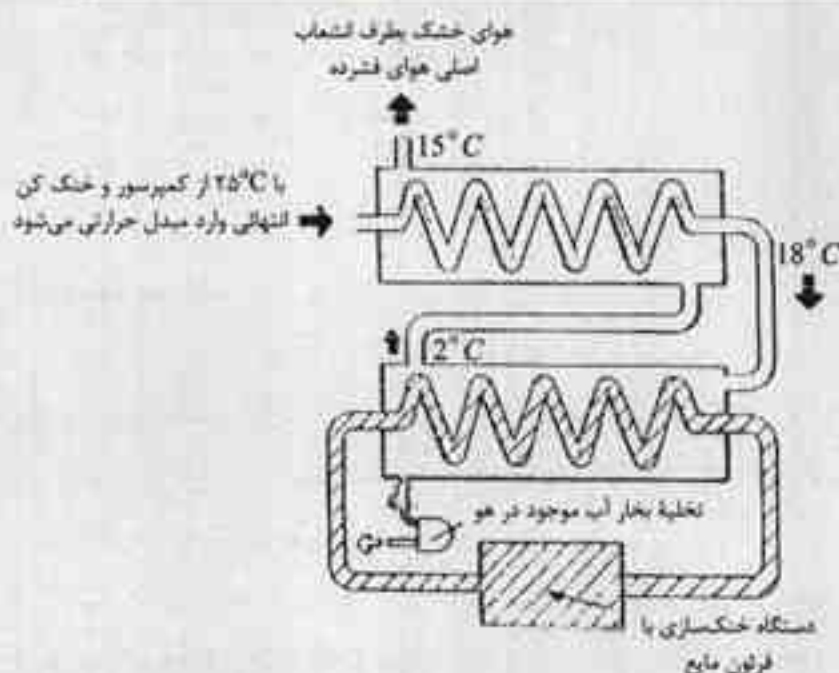
روش‌های متعددی برای خشک کردن هوای فشرده در سیستم‌های هوای فشرده وجود دارد. در بیشتر حالت‌ها خشک کن‌های تبریدی^۳ برای رساندن فشار نقطه شبنم به حدود زیر 5°C استفاده می‌شوند. در سایر موارد مانند فرایندهای غذایی، خشک کن‌ها بایستی هوای خیلی خشکی را با فشار نقطه شبنم زیر 0°C تولید نمایند.

عموماً، مبدل‌های حرارتی که تحت عنوان خشک کن انتهائی^۴ شناخته می‌شوند وظیفه کاهش محتوی بخار آب یا گاه‌ب‌گاه بخار روغن در هوای فشرده را قبل از تحویل آن به خطوط توزیع یا مخزن‌های هوای فشرده بعهده دارند. بویژه، با استفاده از هوای محیط یا آب، خشک‌سازی هوای فشرده انجام شده و بنابراین کندانس شدن محتوی بخار آب هوای فشرده رخ می‌دهد. این کندانس، در جدا کننده^۵ (سپراتور) کار گذاشته شده در بعد از کمپرسور جدا می‌شود. بصورت سر انگشتی می‌توان گفت که دمای تخلیه هوای فشرده در خشک کن‌های انتهائی که از آب استفاده می‌کنند 10°C بالاتر از دمای آب بوده و در خشک کن‌های انتهائی که از هوا استفاده می‌کنند 15°C بالاتر از دمای هواست.

الف- خشک کن تبریدی^۱

این نوع خشک کن‌ها شکل (۲-۷) فرایند خشک کردن را بر مبنای اصول خشک‌سازی با پدیده انتقال حرارت انجام می‌دهند. فرئون مایع جهت خشک‌سازی هوای فشرده خروجی از مخزن تغذیه استفاده می‌شود.

1. Dryers
2. Dew Point Pressure
3. Refrigerated Dryers
4. After Cooler
5. Separator
6. Refrigeration



شکل شماره ۲-۷: خشک کن تبریدی

ب- خشک کن جذبی^۱

ساختار این خشک‌کن‌ها از دو برج تشکیل شده که از موادی بنام آلومینای فعال^۲ پر شده‌اند. این مواد خاصیت جذب رطوبت را دارند و بنابراین با جذب رطوبت هوا، آن را خشک می‌نمایند.

۲-۵- خشک کن بین مرحله‌ای^۳

برای پراکندن و برطرف نمودن گرمای مثرکم‌سازی، خشک‌سازی سیلندرها و پوشش‌های سیلندرها با استفاده از مبدل‌های حرارتی که به ایتر کولرها معروف هستند، صورت می‌پذیرد. این ایتر کولرها می‌توانند با استفاده از هوا یا آب دمای کمپرسور را کنترل نمایند. مشخصاً، خشک‌سازی هوای فشرده بدلیل راحتی کاراراجح است. چون این امر نیاز به سیستم تغذیه آب را بر طرف می‌کند، بنابراین از مشکلاتی که می‌تواند در سیستم توزیع آب رخ دهد (مانند خطر یخ بستن) اجتناب می‌گردد. ولی کاهش کافی و مناسب دمای کمپرسور در برخی کاربردها از طریق خشک‌سازی با هوا می‌تواند کمی مشکل باشد.

۶- توزیع هوای فشرده

توزیع هوای فشرده تولید شده به مصرف کنندگان نهایی، از طریق یک شبکه لوله با اندازه‌های متفاوت صورت می‌گیرد. انتخاب لوله بر مبنای مشخصاتی مانند قطر و فشار لازم برای سیستم توزیع صورت می‌پذیرد. از طریق

1. Absorption Dryers
2. Active Alumina
3. Inter Coolers

شبکه لوله‌کشی، آهنگ حجمی هوای فشرده توسط تعدادی شیر و تنظیم‌کننده‌های فشار تنظیم می‌شود. نله‌های رطوبت^۱ در طول خطوط توزیع، به منظور جداسازی هر گونه کندانس از هوای فشرده، نصب می‌گردند. فشار هوای فشرده در تجهیزات مصرف کننده هوای فشرده که در انتهای خط توزیع نصب شده‌اند همیشه از فشار تخلیه هوای فشرده از کمپرسور یا از مخازن هوای فشرده کمتر است. این مسئله بدو دلیل اتفاق می‌افتد:

- ♦ افت فشار جریان^۲
- ♦ نشتی‌ها

یک توضیح خلاصه‌وار برای هر کدام از دلایل افت فشار در سیستم توزیع هوای فشرده در پایین ارائه گردیده است.

افت فشار جریان

بدلیل مقاومت لوله‌های توزیع هوای فشرده، شیرها و اتصالات، یک افت فشاری روی جریان هوای فشرده اتفاق می‌افتد که میزان این افت فشار از روی معادله دارسی- وایزیک^۳ بصورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\Delta P = \rho \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V^2}{2} \quad \text{رابطه شماره (۶-۲)}$$

ΔP = کل افت فشار هوای فشرده در سیستم توزیع (Pa)

ρ = میانگین دانسیته هوای فشرده در سیستم توزیع (Kg/m^3)

f = ضریب اصطکاک^۴

$\sum K$ = ضریب تلفات ناشی از شیرها و اتصالات در سیستم توزیع

L = طول کلی لوله در سیستم توزیع (m)

D = قطر داخلی لوله (m)

V = میانگین سرعت جریان هوای فشرده (m/s)

بدلیل پیچیدگی و عدم دقت در محاسبه افت فشار از روی معادله فوق، عموماً تعیین افت فشار از روی این معادله توصیه نمی‌شود. ضمن اینکه در این روش ناگهبر از در نظر گرفتن فرضیات بیشمار هستیم. به عنوان مثال، برخی از این فرضیات عبارتند از تعیین ضریب اصطکاک و ضرایب تلفات برای شیرها و اتصالات، ولیکن معادله (۶-۲) نشاندهنده پارامترهایی است که روی افت فشار هوای فشرده در سیستم توزیع مؤثرند.

♦ افت فشار با طول سیستم توزیع افزایش می‌یابد. بنابراین، یک چیدمان^۵ بهینه برای لوله‌کشی می‌تواند

1. Moisture Traps
2. Flow Pressure Drop
3. Darcy Weisbach
4. Friction Factor
5. Layout

سبب کاهش افت فشار و به تبع آن مصرف انرژی سیستم توزیع هوای فشرده گردد. بویژه، کاهش تعداد شیرها، زانویی‌ها و تغییر مسیرها در شبکه توزیع هوای فشرده بسیار مهم است.

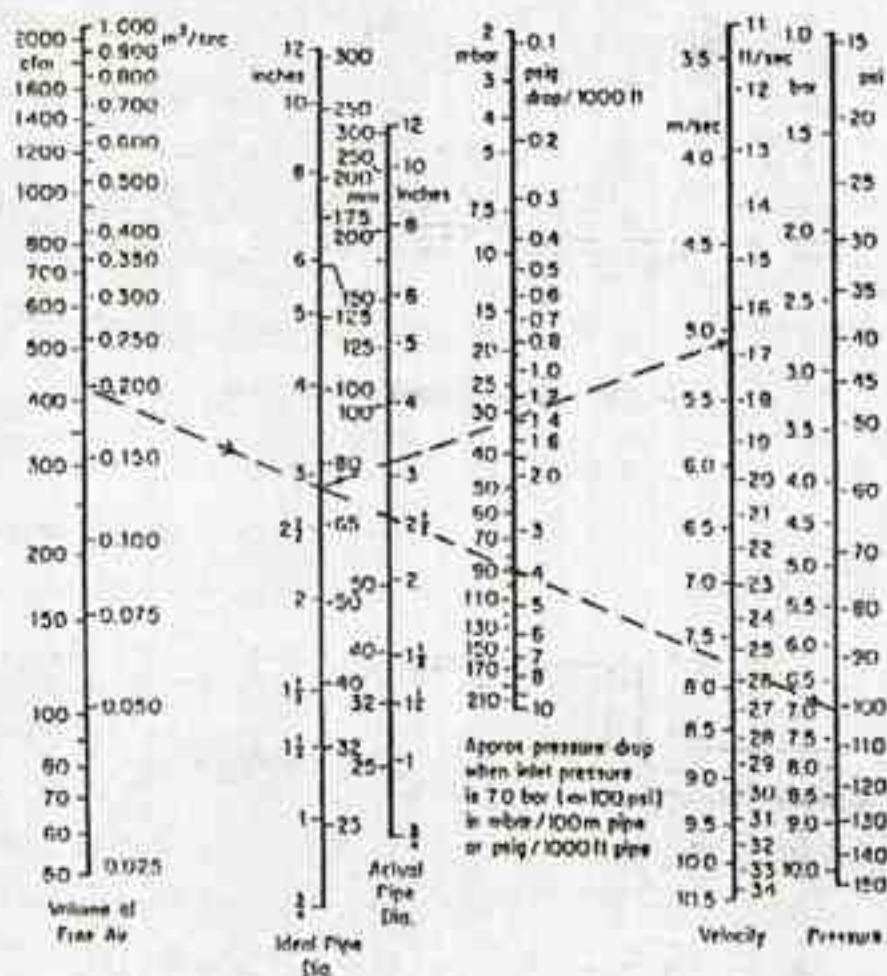
- سرعت هوای فشرده بایستی تا حد امکان کم باشد تا اینکه افت فشار در سیستم توزیع هوای فشرده کاهش یابد این کاهش سرعت خصوصاً برای تأسیساتی توصیه می‌شود که لوله‌کشی سیستم توزیع در آن طولانی است. از طریق کاهش یا کم کردن آهنگ جرمی مورد نیاز (درینار مصرف نهایی)، پائین آوردن دمای هوای فشرده، یا افزایش قطر لوله‌کشی می‌توان سرعت جریان هوای فشرده را کاهش داد.

شکل (۸-۲) نمودار تعیین اندازة لوله‌ها را در سیستم‌های هوای فشرده نشان می‌دهد.

ذکر این نکته لازم است که افت فشار در سیستم توزیع هوای فشرده به منزلة تلف شدن انرژی است. در واقع فشار تخلیه باید افزایش یابد تا افت فشار جریان جبران شود. معادلات (۲-۳) و (۲-۴) دلالت بر این دارند که افزایش نسبت تراکم (P_0/P_1) سبب افزایش توان مکانیکی تأمین شونده از یک محرک (مانند الکتروموتور) برای کمپرسور می‌گردد.

بعنوان مثال، یک افت فشار ۵۰ Kpa در یک کمپرسور طراحی شده برای افزایش فشار از ۱۰۰ Kpa (۱ atm) تا ۷۰۰ Kpa (۷ atm) متناظر با ۳٪ تلف در توان مکانیکی یا الکتریکی است که سیستم هوای فشرده را تغذیه می‌کند. مسائل افت فشار در سیستم توزیع که از مقاومت جریان ناشی می‌شوند، عموماً مسائل ذاتی بوده و طبیعتاً وابسته به طراحی و ساختار لوله‌کشی هستند و بنابراین هنگام ممیزی انرژی سیستم هوای فشرده، نباید مورد توجه قرار گیرند، مگر اینکه تعویض شوند. بجای آن، شخصی که ممیزی انرژی را انجام می‌دهد بایستی روی شناسایی پتانسیل و عوامل کاهش دهنده اتلاف انرژی در سیستم توزیع موجود، کار کند یا تمرکز کند.

با کمک این نمودار می‌توانیم اندازة لوله مورد نظر را برای دستیابی به فشار دلخواه بیابیم. بعنوان مثال یک کمپرسور با خروجی هوای فشرده ($0/2\text{m}^3/\text{sec}$) در فشار (7bar) را در نظر بگیرید. خط کشی را طوری قرار دهید که راستای آن در امتداد خط فرضی که حجم ($0/2\text{m}^3/\text{sec}$) (بر روی خط سمت چپ) را به فشار (7bar) (بر روی خط سمت راست) متصل می‌کند قرار گیرد. محل تلاقی این خط با خط دوم (7mm) در حقیقت قطر لوله ایده‌آل را به ما نشان می‌دهد. ولی این قطر عملاً قابل استفاده نبوده و استاندارد نیست. برای حل این مشکل نقطه (8mm) که قطر استاندارد بالاتر از (7mm) می‌باشد بر روی خط سوم را در نظر گرفته و خطی را از نقطه (7mm) به نقطه (8mm) وصل کرده و امتداد دهید تا خطوط چهارم و پنجم را قطع نماید. کحل تلاقی این خط و خط چهارم میزان افت فشار (33 mbar/sec) و با خط پنجم میزان کاهش سرعت ($5/2\text{ m/sec}$) را صورت انتخاب لوله با قطر (8 mm) نشان می‌دهد.



شکل شماره ۲-۸: نمودار تعیین اندازه لوله‌ها در سیستم هوای فشرده

۷- نشتی‌های هوا^۱

در تأسیسات هوای فشرده صنعتی، تلفات انرژی ناشی از نشتی‌ها غالباً مقدار بزرگی دارند. تخمین زده می‌شود که نشتی هوای فشرده می‌تواند تا ۲۵ درصد هوای فشرده تولیدی در تأسیسات هوای فشرده صنعتی باشد. عموماً نشتی‌ها بدلیل خرابی شیرها، اتصالات ضعیف و سوراخهای کوچک در سیستم لوله‌کشی خصوصاً لوله‌های لاستیکی هوای فشرده می‌باشد. تجهیزات مصرف‌کننده هوای فشرده در صورتی که تولیدی نداشته باشند ولی شیر هوای فشرده در آنها باز باشد می‌تواند یکی از اساسی‌ترین منابع نشت هوای فشرده باشد. برای شناسایی نشت هوای فشرده، چندین روش در چهارچوب ممیزی گذری^۲ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. این روش‌ها در دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند.

1. Air Leaks
2. Walk-Through-Audit

الف- روش‌های ساده

دو روش ارزان برای شناسایی محل نشت هوای فشرده وجود دارد.

- I) روش شنیدن- از طریق شنود در امتداد سیستم توزیع، نشتی‌های هوا از طریق تغییر در صدای سیستم قابل شناسایی هستند البته این روش زمانی سودمند است که صدای زمینه بسیار ضعیف باشد.
- II) روش حباب صابون- روش ساده و ارزان قیمت دیگر برای شناسایی محل‌های نشت هوای فشرده، استفاده از آب و صابون در محل‌های انتخاب شده سیستم توزیع هوای فشرده، خصوصاً در محل زانویی‌ها و اتصالات و شیرها می‌باشد که تشکیل حباب‌های صابون در یک محل خاص مبین نشت در آن محل است.

ب- روش‌های اندازه‌گیری

شناسایی نشت هوای فشرده با استفاده از تجهیزات آشکار ساز ماورای صوت^۱ (اولتراسونیک) نیز میسر می‌باشد. با استفاده از این آشکارسازهای اولتراسونیک می‌توان محل نشتی‌های موجود در سیستم توزیع هوای فشرده را تعیین نمود.

افرادی که مسئول تعمیر و نگهداری در یک تأسیسات صنعتی هستند می‌توانند کاربرد سیستم‌های آشکارساز را آموزش دیده و نشتی‌ها را در سیستم توزیع هوای فشرده، بویژه در ایامی که فعالیت تولیدی محدود بوده یا تعطیل است (آخر هفته‌ها و دوره‌های خاص برنامه‌ریزی شده)، آشکار نمایند. با کمی سرمایه‌گذاری در یک برنامه تعمیر و نگهداری منظم برای آشکارسازی نشتی‌ها، دیده می‌شود که صرفه‌جویی‌های اقتصادی قابل توجهی در هزینه عملیاتی سیستم‌های تولید هوای فشرده حاصل می‌گردد.

در صورتی که نشتی‌ها شناسایی شوند، با محاسبات ساده می‌توان میزان اتلاف هوای فشرده را تخمین زد. در واقع، آهنگ جرمی تلفات هوای فشرده $\Delta \dot{m}_a$ (دبی جرمی) از میان یک حفره از روی معادله زیر قابل تخمین است:

$$\Delta \dot{m}_a = \sqrt{\frac{2}{R_a}} \cdot C_L \cdot A_L \cdot P_0 \cdot T_0^{-1/2} \quad \text{رابطه شماره (۲-۷)}$$

که در آن:

$\Delta \dot{m}_a$: آهنگ جرمی هوای فشرده اتلافی از طریق نشتی (Kg/s)

P_0 : فشار هوای فشرده‌ای که از محل نشتی بیرون می‌آید (P_a)

T_0 : دمای هوای فشرده‌ای که از محل نشتی بیرون می‌آید ($^{\circ}\text{K}$)

C_L : ضریب جریان سوراخ، این ضریب وابسته به شکل و اندازه سوراخ است. برای سوراخ‌های گرد، C_L

1. Ultrasonic

حدود ۰/۶۵ است.

A_L : مساحت سوراخ (m^2)

۸- بهره‌برداری از هوای فشرده

هوای فشرده چندین کاربرد دارد. عموماً، تجهیزات انتهایی مصرف‌کننده هوای فشرده به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- I) مصرف‌کننده‌های نهایی ایستا- شامل تجهیزات کنترل بادی^۱ (پنوماتیک) مانند محرک‌ها^۲ یا تنظیم‌کننده‌های فشار^۳. عملکرد این مصرف‌کننده‌ها فقط وابسته به وجود یا عدم وجود هوای فشرده است. این مصرف‌کننده‌ها را می‌توان هم در تأسیسات تجاری و هم در تأسیسات صنعتی یافت.
- II) مصرف‌کننده‌های نهایی پویا یا دینامیک- شامل ابزار موتناژ (مانند پیچ‌گوشی‌ها و آچارها)، موتورهای هوایی (مانند ابزارهایی برای سوراخ‌کاری و خردایش)، عملکرد این مصرف‌کننده‌ها وابسته به جریان و فشار هوای فشرده است.

عمده مصرف‌های فشرده در صنعت در همین مصرف‌کننده‌های دینامیک است.

برای کاهش تلفات انرژی، فشار تخلیه در سیستم هوای فشرده بایستی متناسب با بالاترین فشار مورد نیاز توسط مصرف‌کننده‌های انتهایی باشد (برای اطمینان و در نظر گرفتن فاکتور ایمنی در قبال افت فشار جریان که قبلاً بحث شد). اگر فشار موجود بزرگتر از فشار مصرفی توسط تجهیزات مصرف‌کننده انتهایی باشد، بدلیل افزایش توان مکانیکی مورد نیاز کمپرسور در اثر فشار اضافی و مازاد غیر لازم، مقداری انرژی تلف خواهد شد (به معادلات (۲-۳) و (۲-۴) مراجعه نمایید).

عموماً، از استفاده از هوای فشرده برای کاربردهایی که در آنها می‌توان منابع دیگر را گرفت استفاده نکنید. به عنوان مثال، ابزارهایی که با برق کار می‌کنند بهتر است جایگزین ابزارهایی شوند که با هوای فشرده کار می‌کنند. همچنین در مواردی که نیازهایی مانند خشک‌کردن، تبخیر کردن از یک سطح، و تمیز کردن وجود دارد و بهتر است از دمنده‌ها بجای هوای فشرده استفاده شود. تخمین زده می‌شود که اگر فشار مورد نیاز کمتر از (۲ atm یا ۲۰۰ Kpa) باشد، استفاده از یک دمنده، صرفه‌جویی معادل ۵۰ درصد یا بیشتر را برای انرژی مصرفی بدنبال خواهد داشت (دمنده بجای هوای فشرده مورد استفاده قرار می‌گیرد).

۹- پتانسیل‌های رایج در صرفه‌جویی انرژی سیستم‌های تولید هوای فشرده

یکی از وظایف مهمی انرژی، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مربوط به طراحی، بهره‌برداری و تعمیرات

1. Pneumatic
2. Actuators
3. Pressure Regulators

سیستم‌های گوناگون است. در مورد سیستم‌های هوای فشرده، برخی از اطلاعات می‌تواند از طریق مصاحبه با اپراتورها، مهندسين فرایند، یا افراد مسئول تعمیر و نگهداری بدست آید. بویژه اطلاعات و داده‌های زیر می‌تواند از طریق مصاحبه با پرسنل بهره‌برداری جمع‌آوری شوند.

الف) کنترل‌های جاری و موجود روی سیستم هوای فشرده تأسیسات، که با این کنترل‌ها سیستم هوای فشرده مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

ب) مشکلات موجود درباره کیفیت، کمیت و فشار هوای فشرده.

ج) اطلاعات طراحی و نقشه‌ها و هرگونه یادداشت در مورد تعمیرات شامل اطلاعات بهره‌برداری کمپرسور و برنامه تعمیر نشی‌ها.

د) اطلاعات روی پلاک^۱ کلیه تجهیزات موجود در سیستم هوای فشرده.

ه) طرح‌های آبی برای ارتقاء سیستم هوای فشرده شامل جایگزینی کمپرسور، تغییرات در مصرف هوای فشرده، و نصب سیستم‌های ابزار دقیق.

جمع‌آوری داده‌ها بر حسب پیچیدگی تأسیسات و سیستم هوای فشرده می‌تواند زمان بر هم باشد. ولی برای یک ممیز انرژی حصول اطلاعات کافی جهت فهم جزئیات طراحی موجود، روش‌های بهره‌برداری و نگهداری جاری و طرح‌های آبی بسیار مهم است تا بتواند پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی را نه تنها برای صرفه‌جویی انرژی و هزینه، بلکه برای تأمین یک سیستم هوای فشرده مطمئن پیشنهاد دهد.

در ادامه این بحث برخی از راههای صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های هوای فشرده که خیلی رایج هستند انتخاب شده و به همراه روش‌های محاسبانی خاص و مثالهای تشریحی توضیح داده شده‌اند.

۹-۱- کاهش دمای هوای ورودی

در بعضی از تأسیسات هوای فشرده، کمپرسور، هوای ورودی را از داخل اتاق (کمپرسورخانه) می‌کشد. این هوای ورودی به کمپرسور، تحت این شرایط، دارای دمای بالایی تا حدود 30°C خواهد بود که می‌تواند بیش از این مقدار نیز باشد.

این دمای داخل بسیار بالاتر از دمای بیرون است و مطابق معادله $(2-3)$ و $(2-4)$ دمای هوای ورودی بالاتر، توان مکانیکی یا الکتریکی و در نتیجه انرژی مصرفی بالانتری را در پی خواهد داشت. یک راه بسیار ساده برای کاهش دمای هوای ورودی، نصب لوله‌کشی برای اتصال کمپرسور به بیرون است که کمپرسور هوای ورودیش را از محیط بیرون از کمپرسورخانه بکشد.

صرفه‌جویی انرژی الکتریکی $\Delta\text{KWh}_{\text{comp}}$ حاصل از کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور از روی رابطه زیر قابل محاسب خواهد بود:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{\dot{W}_m \cdot LF_{Comp} \cdot N_{h, Comp} \cdot (T_{i,e} - T_{i,r})}{\eta_M \cdot T_{i,e}} \quad \text{رابطه شماره (۸-۲)}$$

که:

$T_{i,e}$ = دمای متوسط سالیانه مربوط به هوای کمپرسور قبل از بهبود (K)

$T_{i,r}$ = دمای متوسط سالیانه مربوط به هوای ورودی کمپرسور پس از بهبود و اصلاح (K)

عموماً، $T_{i,r}$ را می‌توان مساوی با متوسط سالیانه دمای هوای بیرون فرض نمود. مثال (۳-۲) کاربرد رابطه (۸-۲) را در محاسبه صرفه‌جویی انرژی حاصل از کاهش دمای هوای ورودی نشان می‌دهد.

مثال (۳-۲): یک سیستم تولید هوای فشرده نیاز به توان مکانیکی معادل ۱۰۰ KW دارد و راندمان موتور آن ۸۷٪ است.

هوای ورودی کمپرسور از داخل کمپرسورخانه که کمپرسور در آن واقع شده و دمای میانگین سالیانه آن ۲۵°C است

مکیده می‌شود. زمان بازگشت سرمایه را برای نصب یک لوله‌کشی عایق شده جهت اتصال ورودی کمپرسور به محیط

بیرون با استفاده از اطلاعات زیر بیابید:

الف) کل هزینه سیستم لوله‌کشی ۸۵۰ دلار

ب) دمای میانگین سالیانه محیط بیرون ۱۳°C

ج) کمپرسور ۵۰۰۰ ساعت در سال کار می‌کند که ضریب بار میانگین آن ۸۰٪ است.

د) هزینه الکتریسیته ۰/۰۵ \$/KWh است.

حل: 

از معادله (۸-۲) استفاده می‌کنیم. صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در اثر کاهش دمای هوای ورودی از رابطه زیر تخمین

زده می‌شود:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{100 \times 0.8 \times 5000 \times (35 - 12)}{0.87 \times (273 + 35)} = 34330 \text{ KWh / yr}$$

بنابراین، زمان بازگشت سرمایه ساده برای نصب سیستم لوله‌کشی جهت اتصال ورودی کمپرسور به هوای

بیرون برابر است با:

$$\text{زمان بازگشت سرمایه ساده} = \frac{850}{34330 \times 0.05} = 0.5 = 6 \text{ Months}$$

جدول (۲-۲) درصد انرژی صرفه‌جویی شده بر حسب درجه حرارت هوای ورودی در کمپرسورها را نشان

می‌دهد.

جدول شماره ۲-۲: در صد انرژی صرفه جویی شده بر حسب درجه حرارت هوای ورودی در کمپرسورها

دمای هوای کمپرسور بر حسب °C	حجم هوای مورد نیاز بر حسب m ³ در لغت حجمی ۱۰۰۰ m ³ و دمای ۲۱°C	صرفه جویی با اضافه مصرف (kWh) برای هوای ورودی با دمای ۲۱°C
-۱	۹۶۵	صرفه جویی ۷۷/۵
۵	۹۶۳	صرفه جویی ۷۵/۷
۱۰	۹۶۲	صرفه جویی ۷۳/۸
۱۶	۹۸۱	صرفه جویی ۷۱/۹
۲۱	۱۰۰۰	صرفه جویی *
۲۷	۱۰۲۰	صرفه جویی ۷۱/۹
۳۲	۱۰۴۰	صرفه جویی ۷۳/۸
۳۷	۱۰۶۰	صرفه جویی ۷۵/۷
۴۳	۱۰۸۰	صرفه جویی ۷۷/۵
۴۹	۱۱۰۰	صرفه جویی ۷۹/۵

۲-۹- کاهش فشار تخلیه

هنگامیکه ماکزیمم فشار مورد نیاز توسط کلیه تجهیزات مصرف کننده انتهای در یک تأسیسات، بطور چشمگیری پائین تر از فشار تحویلی توسط سیستم هوای فشرده باشد، کاهش فشار تخلیه به منظور کاهش مصرف انرژی کمپرسور توصیه می گردد. تخمین زده شده که به ازای هر ۱۵ Kpa اضافه فشار تحویلی، ۱٪ انرژی بیشتر توسط کمپرسور لازم است. افزایش فشار تحویلی بیش از میزان مورد نیاز آثار سوء دیگری را در سیستم هوای فشرده بجا می گذارد. بویژه، اضافه فشار، اتلاف هوای فشرده از محل های نشتی را افزایش می دهد.

میزان صرفه جویی انرژی الکتریکی ΔKWh_{Comp} ناشی از کاهش فشار تخلیه هوای فشرده تولیدی توسط کمپرسور، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{\%W_m \cdot W_m \cdot LF_{Comp} \cdot N_{A,Comp}}{\eta_M} \quad \text{رابطه شماره (۲-۹)}$$

که $\%W_m$ درصد کاهش توان مکانیکی مورد نیاز توسط کمپرسور است. با استفاده از معادلات (۲-۳) و (۲-۴)، درصد کاهش توان ورودی کمپرسور $\%W_m$ می تواند تخمین زده شود.

مثال (۲-۴)- یک سیستم هوای فشرده توان مکانیکی مورد نیازش ۵۰ KW بوده و یک موتور با راندمان ۹۰٪ را دارد هزینه صرفه جویی شده را در اثر کاهش فشار تخلیه از ۸۰۰ Kpa به ۷۰۰ Kpa با فرضیات زیر بیابید:

♦ کمپرسور ۴۰۰۰ ساعت در سال با میانگین ضریب بار ۷۰٪ کار می کند.

♦ هزینه الکتریسیته ۰/۰۵ S/KWh می باشد.

حل:

فرض کنید که فشار هوای ورودی به کمپرسور مساوی با 1 atm (101 Kpa) است. میزان کاهش در فشار تخلیه، متناظر با کاهش در نسبت فشار P_0 / P_1 از ۸ به ۷ است. درصد کاهش در توان مکانیکی مورد نیاز، $\%W_m$ می‌تواند از روی یکی از معادلات (۲-۳) با (۲-۲) حساب شود:

- برای یک تراکم همدم:

$$\%W = \frac{\ln(8) - \ln(7)}{\ln(8)} = 6.4\%$$

از معادله (۸-۲) میزان صرفه‌جویی انرژی الکتریکی بدست می‌آید:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{0.064 \times 50 \times 4000 \times 0.7}{0.9} = 9950 \text{ KWh/year}$$

$$9950 \text{ KWh/year} \times 0.05 \$/\text{year} = 500 \text{ KWh/year}$$

بنابراین میزان صرفه‌جویی هزینه در اثر کاهش فشار تخلیه هوای فشرده حدود $500 \$/\text{year}$ خواهد بود.

- برای یک تراکم بی دررو:

$$\%W_m = \frac{\frac{1.4-1}{(8)^{1.4}} - \frac{1.4-1}{(7)^{1.4}}}{\frac{1.4-1}{(8)^{1.4}}} = 5.7\%$$

از معادله (۸-۲) میزان صرفه‌جویی انرژی الکتریکی بدست می‌آید:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{0.057 \times 50 \times 4000 \times 0.7}{0.9} = 8870 \text{ KWh/year}$$

$$8870 \text{ KWh/year} \times 0.05 \$/\text{year} = 450 \$/\text{year}$$

بنابراین میزان صرفه‌جویی هزینه در اثر کاهش فشار تخلیه هوای فشرده حدود $450 \$/\text{year}$ خواهد بود.

۹-۳- تعمیر نشی‌های هوا

همانطور که در قبل نیز بحث شد، نشت هوای فشرده به منزله اتلاف هوای فشرده و اتلاف در انرژی مصرفی توسط سیستم تولید هوای فشرده است. زمانیکه محل‌های نشت و ابعاد آنها شناسایی شدند توصیه می‌شود که نسبت به تعمیر آنها اقدام عاجل بعمل آید. انرژی قابل صرفه‌جویی توسط تعمیر محل‌های نشت هوای فشرده با استفاده از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

- برای تراکم همدم:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{\Delta \dot{m}_a \cdot LF_{Comp} \cdot N_{a, Comp} \cdot R_a \cdot T_i \cdot L_n \left(\frac{P_o}{P_i} \right)}{\eta_M} \quad \text{رابطه شماره (۱۰-۲)}$$

- برای تراکم‌های آدیاباتیک یا پلی تروپیک:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{\Delta \dot{m}_a \cdot LF_{Comp} \cdot N_{a, Comp} \cdot R_a \cdot T_i \cdot \gamma}{(\gamma - 1) \cdot \eta_M} \left[\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right] \quad \text{رابطه شماره (۱۱-۲)}$$

که $\Delta \dot{m}_a$ ، مین آهنگ جرمی هوای فشرده اتلافی از نشتی شناسایی شده در سیستم توزیع است و می‌تواند از روی معادله (۷-۲) تخمین زده شود. مثال (۵-۲) نشان دهنده اهمیت اتلاف انرژی از یک نشت نمونه در سیستم توزیع هوای فشرده است همانطور که در مثال (۵-۲) نشان داده شده زمان بازگشت سرمایه برای تعمیر نشت، بسیار کوتاه است. بایستی متذکر شد که هوای فشرده حتی در زمانهایی هم که مصرف کننده انتهایی در حال کار نیست می‌تواند از محل نشتی‌ها تلف شود، چون هوای فشرده در داخل سیستم توزیع وجود دارد. به‌علاوه فشار اضافی برای هوای فشرده علاوه بر صرف توان مکانیکی یا الکتریکی بیشتر که به منزله اتلاف انرژی است، سبب اتلاف بیشتر هوای فشرده از نشتی‌ها می‌گردد.

جدول (۳-۲) تلف توان الکتریکی با توجه به اندازه نشتی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۲: تلفات توان الکتریکی با توجه به اندازه نشتی‌ها

توان لازم برای فشرده هوای تلف شده	نشتی هوا در فشار گج obar	قطر سوراخ (Hole Diameter)	
		mm	سایز واقعی
KW	(L/min)		
۰/۳	۱	۱	○
۳/۱	۱۰	۳	○
۸/۳	۲۷	۵	○
۲۳	۱۰۵	۱۰	○

مثال (۵-۲): یک نشتی ۵mm در سیستم توزیع هوای فشرده مشخص شده است. زمان بازگشت سرمایه را برای تعمیر

نشتی حساب کنید تراکم را بصورت همدا فرض کنید اطلاعات زیر را استفاده کنید:

الف) کل هزینه تعمیر نشتی ۱۵۰ دلار است.

ب) میانگین دمای سالیانه هوای فشرده و فشار مطلق آن 20°C و ۹۰۰ Kpa می‌باشد.

- ج) کمپرسور ۳۰۰۰ ساعت در سال یا ضریب بار متوسط ۷۰٪ کار می‌کند.
 د) میانگین دمای سالیانه و فشار مطلق هوای محیط به ترتیب 15°C و ۱۰۰ Kpa هستند.
 م) راندمان موتور الکتریکی ۹۰٪ است.
 و) قیمت الکتریسیته ۰/۰۵ S/KWh است.

حل:

از معادله (۲-۷) استفاده می‌کنیم تا تلف هوای فشرده از طریق نشی را محاسبه کنیم:

$$\Delta m_a = \sqrt{\frac{2}{287}} \times 0.65 \times 0.0000196 \times 800000 \times (273 + 20)^{-1/2} = 0.05 \text{ Kg/sec}$$

برای یک تراکم هم‌دما، انرژی الکتریکی اتلافی سالیانه از طریق نشی با استفاده از معادله (۲-۱۰) محاسبه می‌شود:

$$\Delta KWh_{Comp} = \frac{0.05 \times 3000 \times 0.7 \times 287 \times (273 + 15) \times \ln\left(\frac{800}{100}\right)}{0.9} = 20050 \text{ KWh/year}$$

بنابراین، زمان بازگشت سرمایه ساده جهت تخصیص هزینه برای تعبیر نشی برابر خواهد بود با:

$$\text{زمان بازگشت سرمایه ساده} = \frac{150}{20050 \times 0.05} = 0.15 \text{ year} = 2 \text{ months}$$

جدول (۲-۴) میزان هوای فشرده مورد نیاز با توجه به وجود نشی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۲-۴: میزان هوای فشرده مورد نیاز با توجه به وجود نشی‌ها

نشی هوا (l/s/h)	نشی هوا از هر سوراخ در فشار گنج barv	تعداد نشی‌ها	قطر سوراخ (mm)
۳/۳۰	۰/۳۳	۱۰	۰/۵
۳۲/۷۵	۱/۳۱	۲۵	۱
۱۱۲/۱۸	۵/۱۹	۲۲	۲
۱۸۵/۶۰	۱۱/۶۰	۱۶	۳
۲۲۷/۵۰	۳۲/۵۰	۷	۵
۰/۰۰	۱۲۹/۰۰	۰	۱۰
۰/۰۰	۲۰۲/۰۰	۰	۱۲/۵
۵۶۳/۳۳	مجموع		

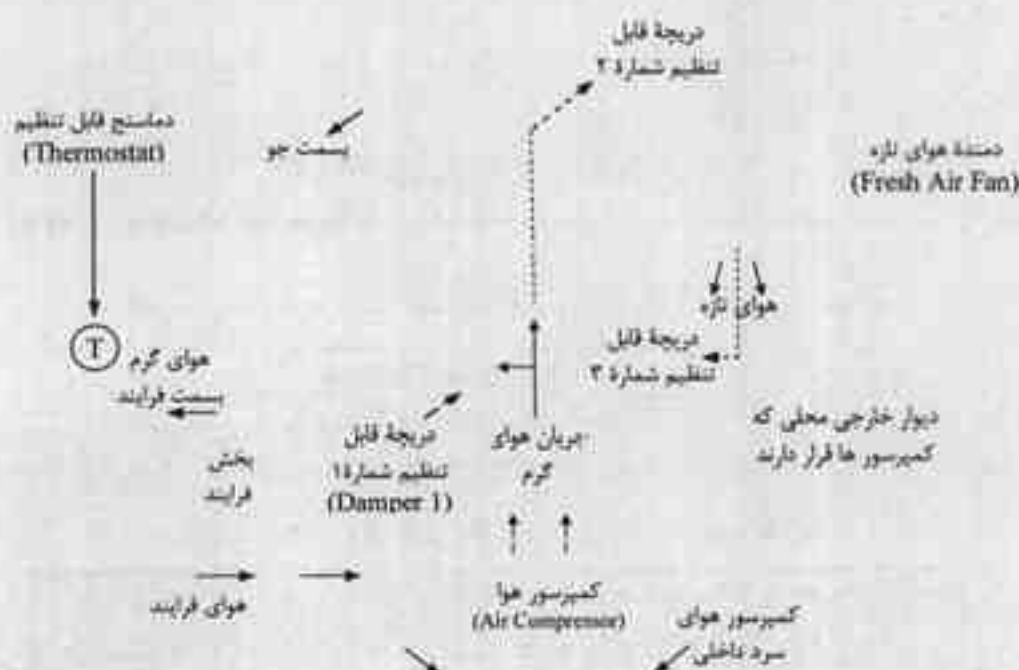
۹-۴- سایر پتانسیل‌های کاهش مصرف انرژی

سایر پتانسیل‌های صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های تولید هوای فشرده، بشرح زیر می‌باشند:

- جایگزینی کمپرسورهای با بازدهی پایین با کمپرسورهای نو و کارآتر
- انجام برخی تغییرات در فرایند تولید به منظور کاهش میزان مصرف هوای فشرده و کاهش میزان فشار

مورد نیاز

- ♦ بکارگیری سیستم بازایالت حرارت شکل (۹-۲) و (۱۰-۲) از گرمای تراکم جهت گرمایش آب و گرمایش فضای ساختمان
- ♦ نصب سیستم‌های کنترل اتوماتیک به منظور بهینه‌سازی عملکرد چند کمپرسور با کاهش زمان‌های کارکرد بی‌بار و کم بار^۱
- ♦ استفاده از کمپرسورهای کمکی برای تأمین فشار تخلیه بالاتر. لازم به یادآوری است که بدون کمپرسور کمکی، کمپرسور اولیه بایستی کل مقدار هوا را در ماکزیمم فشار مورد نظر فشرده سازد.



شکل شماره ۹-۲: سیستم بازایالت حرارت



شکل شماره ۲-۱۰: سیستم بازیافت حرارت برای کمپرسورهای آب خنک

۱۰- موارد تکمیلی در مورد شناسایی میزان نشتی هوای فشرده

(I) روش استفاده از عطر در تشخیص محل نشتی

در این روش در محل ورودی هوا به کمپرسور یک عطر یا بوی مشخص را قرار می‌دهیم. بوی عطر در نواحی که دارای نشت در سیستم توزیع هستند به خوبی قابل تشخیص خواهد بود.

(II) روش تخمین محاسباتی در تعیین میزان نشتی هوای فشرده و تعیین اتلاف انرژی ناشی از آن

به منظور شناسایی نشتی هوا در سیستم توزیع، می‌توان کمپرسور را با قطع هوای فشرده ورودی به تجهیزات مصرف‌کننده آن، بکار انداخت. کمپرسور تا رسیدن فشار هوای موجود در سیستم توزیع به یک حد خاصی کار خواهد کرد. زمان کارکرد کمپرسور را تا رسیدن فشار به آن حد خاص ثبت می‌کنیم (T). پس از رسیدن فشار به ماکزیمم میزان تنظیم شده، کمپرسور خاموش خواهد شد یا بصورت خلاص کار خواهد کرد. زمان کارکرد کمپرسور بصورت بی بار یا زمان خاموشی کمپرسور را نیز تحت عنوان زمان بی‌باری (t) ثبت می‌کنیم. این آزمونهای ثبت زمانهای کارکرد تحت بار و بی‌باری را حداقل چهار بار تکرار می‌کنیم تا میانگین قابل قبولی از زمانها به دست آید. میزان نشتی هوا از روی رابطه زیر بدست می‌آید.

$$L = \frac{Q \times T}{T + t}$$

$$L = \frac{L}{3} \text{ KW} \approx \text{توان مصرفی}$$

T: زمان کارکرد تحت بار (ثانیه)

۱. زمان کارکرد بی‌باری (ثانیه)

Q: ظرفیت کمپرسور (Lit/sec)

L: میزان نشنی هوا (Lit/sec)

۱۱- بازیافت حرارت^۱ از کمپرسورها

عمل فشرده‌سازی هوا انرژی زیادی مصرف می‌کند. اما مقدار خیلی کمی از این انرژی بصورت حرارت همراه هوای فشرده به خروجی منتقل می‌گردد. بیش از ۹۰٪ این انرژی توسط عملیات خنک‌سازی خارج شده و با توسط تشعشع تلف می‌شود. شکل (۲-۱۱).

این حرارت دارای دمای کم در حدود 80°C می‌باشد و همین موضوع استفاده از آن را مشکل می‌سازد. با این حال توسط سیستم‌های خاص در حدود ۸۰٪ آن قابل بازیابی است. اگر از سیستم کانال‌کشی برای انتقال هوا استفاده شود، باید اطمینان یافت که هیچ مانعی در برابر جریان آزاد هوای خنک ایجاد نکند که باعث کاهش بازده کمپرسور می‌گردد.

سازندگان کمپرسور معمولاً حداکثر طول مشخصی را برای کانال‌کشی مجاز می‌دانند که می‌تواند برای عملیات بازیافت حرارت مورد استفاده قرار گیرد. اگر طول‌های بلندتری لازم باشد باید از فن‌های کنکی جهت به حرکت در آوردن هوا استفاده نمود.

از هوای گرم داخل کانال‌کشی جهت گرمایش فضا و فرایندهای تولید استفاده می‌شود. صرفه‌جویی‌های مشابهی نیز می‌تواند از ماشین‌های خنک شونده توسط آب بدست آید. از حرارت موجود در آب خروجی از خنک‌کن‌ها، می‌توان برای تأمین آب گرم مصرفی و همچنین افزایش دمای آب تغذیه دیگ بخار و آب مصرفی فرایندها استفاده کرد.

مثال: توان مصرفی یک کمپرسور را ۷۰ KW فرض کنید. میزان ظرفیت کمپرسور (خروجی هوای فشرده) ۱۶۵ لیتر در ثانیه است. کمپرسور مدت زمان ۸ ساعت در روز با ضریب بار ۷۵٪ کار می‌کند. میزان مصرف انرژی الکتریکی کمپرسور به طریق زیر حساب می‌شود:

$$\text{مصرفی} = 70 \text{ KW} \times 0.75 \times 8 \text{ hr} = 420 \text{ KWh/day}$$

عمده انرژی الکتریکی مصرفی (۹۰٪) که توسط کمپرسور مصرف می‌شود به انرژی حرارتی تبدیل می‌گردد. این حرارت توسط آب خنک‌کن از کمپرسور خارج می‌شود تا کمپرسور دچار اضافه حرارت و نهایتاً آسیب نگردد.

$$420 \times 0.9 = 378 \text{ KWh/day}$$
 مقدار حرارت قابل بازیابی

1. Heat Recovery

با این مقدار انرژی و با استفاده از یک مبدل حرارتی می‌توان ۹۰۰۰ Lit/day آب گرم را با درجه حرارت ۵۳°C تولید نمود. معادل انرژی این مقدار آب گرم 1.42×10^6 KJ/day است که با احتساب راندمان ۷۵٪ برای بویلر، انرژی ورودی بویلر بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\text{انرژی ورودی بویلر} = \frac{1.42 \times 10^6}{0.75} = 1.89 \times 10^6 \text{ (KJ / day)}$$

اگر ارزش حرارتی سوخت مصرفی را (41×10^3 KJ/lit) در نظر بگیریم:

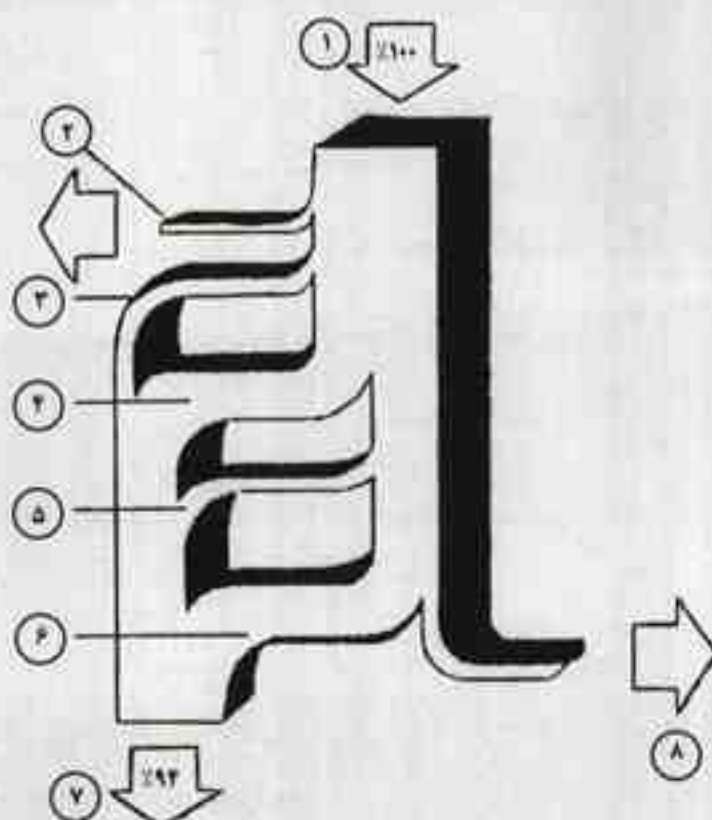
$$\text{میزان سوخت ورودی} = \frac{1.89 \times 10^6}{41 \times 10^3} = 46 \text{ (Lit / day)}$$

اگر تعداد روز کارکرد در سال را ۳۵۰ day/year فرض کنیم، میزان سوخت ورودی سالانه (سوخت صرفه‌جویی شده سالانه) برابر خواهد بود با:

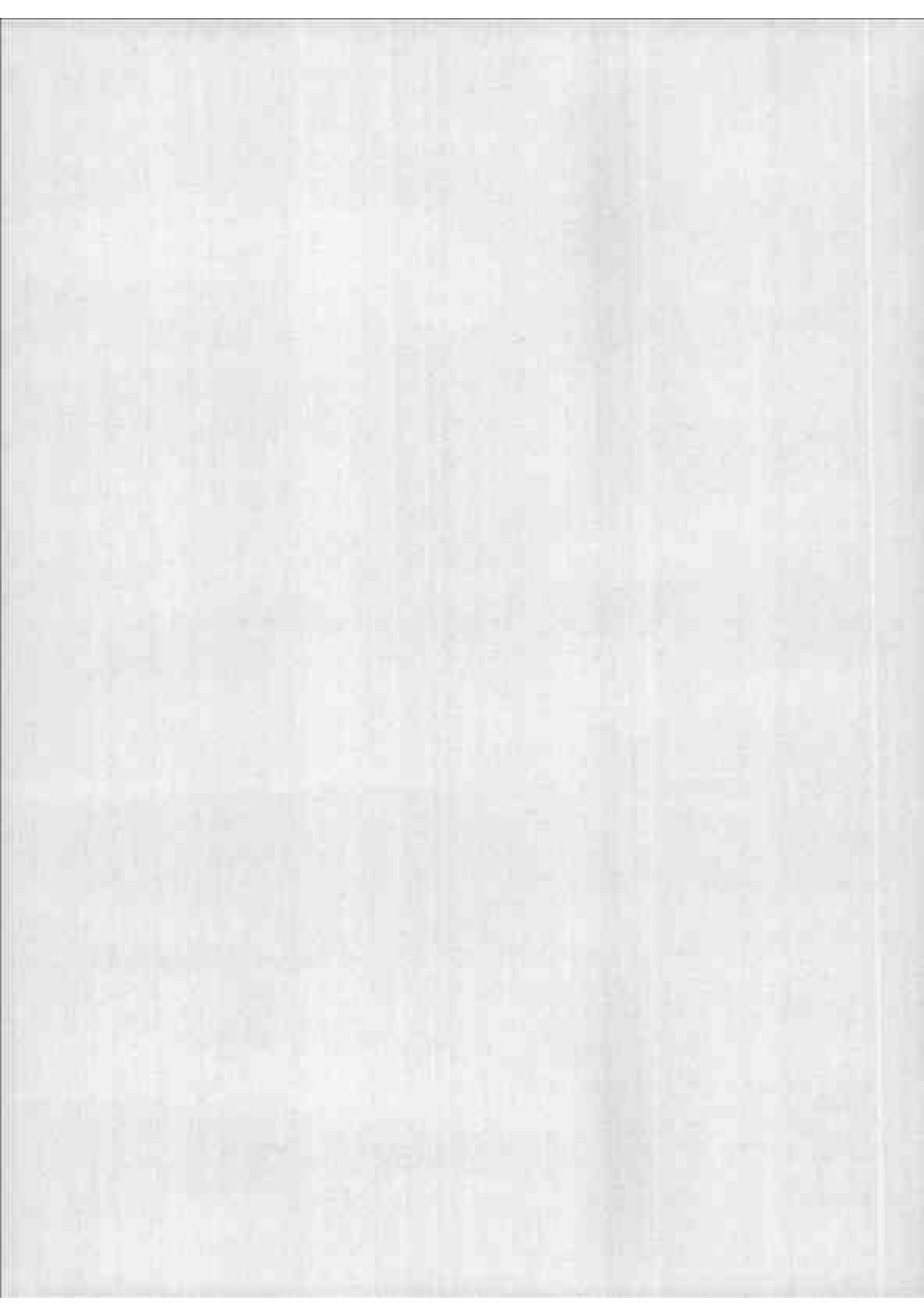
$$\text{مقدار مصرف سالانه} = 46 \times 350 = 16100 \text{ (Lit / year)}$$

درصد تقریبی توزیع حرارت در یک کمپرسور:

- | | |
|---------------------------------------|------|
| ۱- توان الکتریکی ورودی | ٪۱۰۰ |
| ۲- تلفات تابشی (تثعشمی) | ٪۲ |
| ۳- باز یافت حرارت از مرحله فشار پایین | ٪۲ |
| ۴- باز یافت حرارت از خنک کن داخلی | ٪۲۳ |
| ۵- باز یافت حرارت از مرحله فشار بالا | ٪۲ |
| ۶- باز یافت حرارت از خنک کن انتهایی | ٪۹۲ |
| ۷- گرمای قابل باز یافت تئوری | ٪۹۲ |
| ۸- حرارت باقیمانده در هوای فشرده | ٪۶ |



شکل شماره ۲-۱۱: دیاگرام جریان انرژی برای یک کمپرسور



فصل ۳

مصرفه‌جویی انرژی در فن‌ها و پمپ‌ها

۱- فن‌ها

از جمله تجهیزات مصرف‌کننده انرژی الکتریکی در بخش صنعت و ساختمان فن‌ها می‌باشند. از جمله موارد مهم مصرف این تجهیزات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ♦ کاربرد فن‌ها در سیستم‌های احتراق جهت تأمین هوای احتراق و خروج گازهای احتراق
- ♦ کاربرد فن‌ها در کدالتسورهای هوا خنک در صنایع نیروگاهی و فرایندی
- ♦ کاربرد فن‌ها در برج‌های خنک‌کن جهت خنک‌سازی آب
- ♦ کاربرد فن‌ها در سیستم‌های تهویه در کارخانجات و ساختمان‌ها

۱-۱- انواع فن‌ها

اگر بخواهیم تقسیم‌بندی کلی از فن‌ها را داشته باشیم می‌توان فن‌ها را به دو گروه اصلی زیر تقسیم‌بندی نمود:

الف- فن‌های نوع توربو^۱

در این فن‌ها هوا از یک جهت مکیده شده و از جهت دیگر با شتاب خارج می‌شود. این نوع از فن‌ها خود به دو زیر گروه تقسیم می‌شوند.

الف-۱- فن‌های نوع محوری^۲ (شکل (۱-۳))

دارای ظرفیت هوادهی بالا برای کاربردهای تهویه دارند و بسته به نوع پروانه به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند.

1. Turbo
2. Axial

الف-۱-۱- فن‌های نوع پروانه‌ای^۱

(شکل (۳-۲)) - راندمان و فشار استاتیکی در این فن‌ها پایین است ولی حجم هوادهی بالایی دارند. پروانه آنها دارای دو یا چند تیغه از جنس سبک می‌باشد.

الف-۱-۲- فن‌های نوع محوری - لوله‌ای^۲

(شکل (۳-۳)) - این فن‌ها از نظر کارایی بهتر از فن‌های نوع پروانه‌ای بوده و عموماً دارای ۲ تا ۸ تیغه می‌باشند. فشار استاتیکی در آنها بین کم تا متوسط بوده و در صورت استفاده در محل‌هایی که آلایندگی‌های کربن‌دار در محیط آنها وجود دارد نیاز به تمیز کردن دوره‌ای تیغه‌ها وجود دارد.

الف-۱-۳- فن‌های نوع محوری - پره‌ای^۳

(شکل (۳-۴)) - این فن‌ها دارای تیغه‌های کوتاه ثابت یا قابل تنظیم هستند. بین فن‌های نوع محوری از همه کاراتر می‌باشند. فشار استاتیکی بین کم تا زیاد را دارند و در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع^۴ و سیستم‌های تهویه صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الف-۲-۱- فن‌های گریز از مرکز (سانتریفوژ)^۵

(شکل (۳-۵)) - دارای ظرفیت تأمین فشار بالا هستند و در مواردی نظیر دپگ‌های بخار (بویلرها) کاربرد دارند. بسته به نوع پروانه که معمولاً بیش از ۱۰ تیغه دارند به چهار دسته تقسیم می‌شوند.

الف-۲-۲- فن‌های نوع ایرفویل^۶

(شکل (۳-۶)) - این نوع از فن‌های سانتریفوژ کاراترین نوع اما در عین حال گرانترین نوع از این فن‌ها هستند. راندمان این نوع از فن‌های سانتریفوژ تقریباً ۹۰٪ است. کاربرد آنها در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع و صنایع با هوای تمیز در صورت اهمیت داشتن صرفه‌جویی انرژی در این صنایع و سیستم‌ها نمود پیدا می‌کند. در مواردی که نیاز به تأمین حجم بالای هوای با فشار استاتیک بین کم تا متوسط باشد از این نوع فن‌ها می‌توان استفاده کرد.

الف-۲-۳- فن‌های نوع بکوارد اینکلایند^۷

(شکل (۳-۷)) - کارایی این فن‌ها کمتر از فن‌های نوع ایرفویل بوده و حدوداً ۸۰٪ می‌باشد. در سیستم‌هایی که نیاز به فشار استاتیک بین کم تا زیاد در آنها وجود دارد و سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع با حجم هوای

1. Propeller
2. Tube Axial
3. Vane Axial
4. HVAC: Heat Ventilation and Air Condition
5. Centrifugal Fans
6. Airfoil
7. Backward-inclined

متوسط کاربرد دارند. همچنین در صنایعی که دارای محیط‌های خورنده هستند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الف-۲-۴- فن‌های نوع شعاعی^۱

(شکل (۸-۳)) - در سرعت متوسط کار می‌کنند و کمترین راندمان را دارند که حدوداً ۵۰٪ تا ۶۰٪ است. در صنایع با محیط‌های خورنده کاربرد دارند.

الف-۲-۵- فن‌های نوع فوروارد اینکلاینند^۱

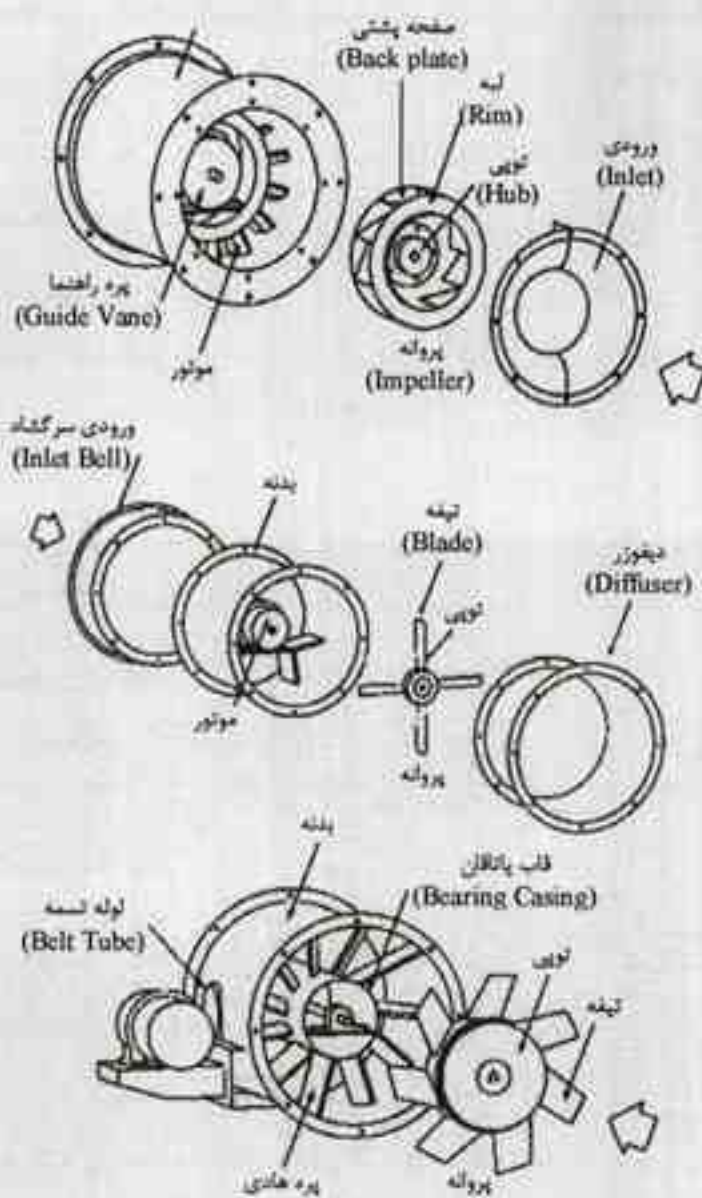
سرعت این فن‌ها به نسبت سایر فن‌های سانتریفوژ کمترین بوده ولی از نظر ابعاد نیز کوچک‌ترین نوع فن سانتریفوژ محسوب می‌شود. راندمان این نوع از فن‌های سانتریفوژ کمتر از راندمان نوع اول و دوم بوده و به حدود ۷۰٪ می‌رسد.

در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع تجاری و مسکونی کاربرد دارند و در مواردیکه نیاز به حجم پائین هوا یا فشار استاتیک کم تا متوسط است مورد استفاده قرار می‌گیرند.

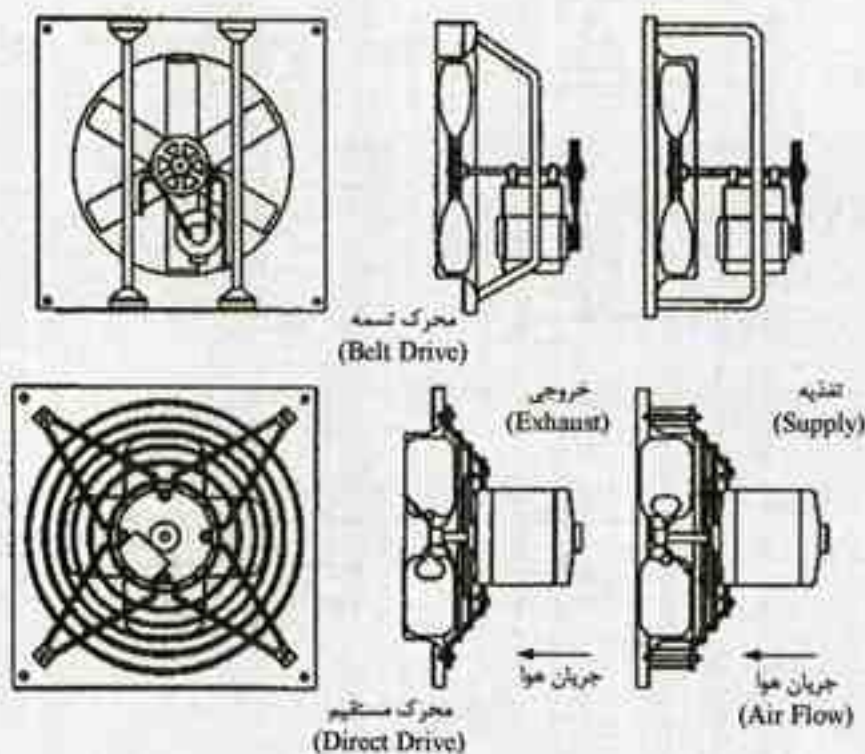
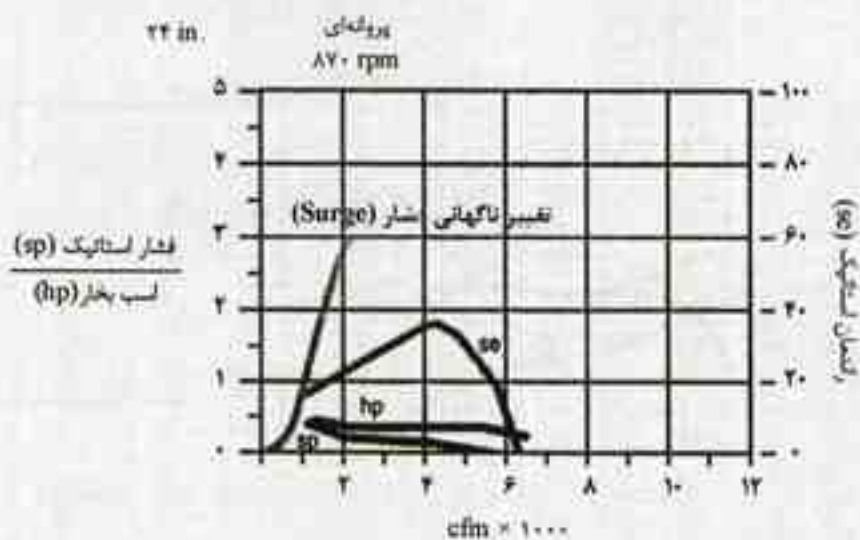
ب- فن‌های نوع جابجایی^۲

در این نوع از فن‌ها، هوا به داخل یک محفظه با یک حجم مشخص مکیده می‌شود و ورودی بسته شده و هوا از سمت خروجی با فشار بیرون رانده می‌شود. این عمل توسط جابجایی یک پیستون می‌تواند صورت بگیرد. از دیدگاه کارایی نسبت فشار بین ۱/۲-۲/۵ و حجم گاز بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر مکعب بر دقیقه است. این نوع از فن‌ها در سیستم‌های خلاء و گازهای با جرم حجمی پائین مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشخصات عملکردی انواع فن‌ها در جدول (۱-۳) بطور مفصل ارائه گردیده است.

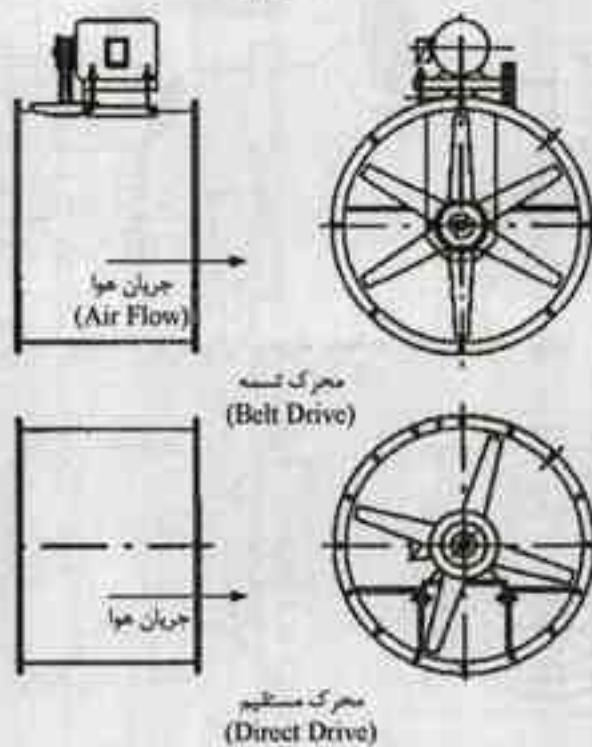
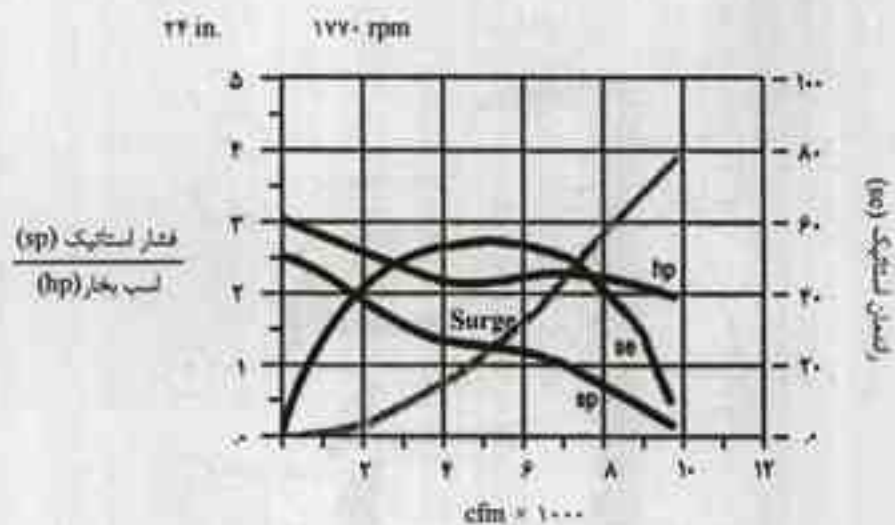
1. Radial
2. Forward-Curved
3. Displacement Type



شکل شماره ۱-۳: شکل کلی و اجزای فن‌های محوری

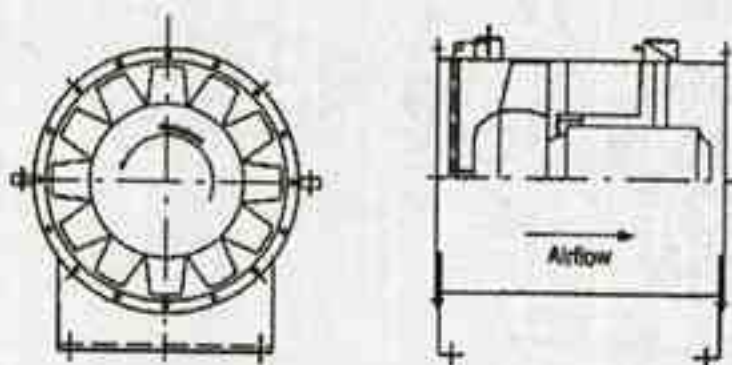
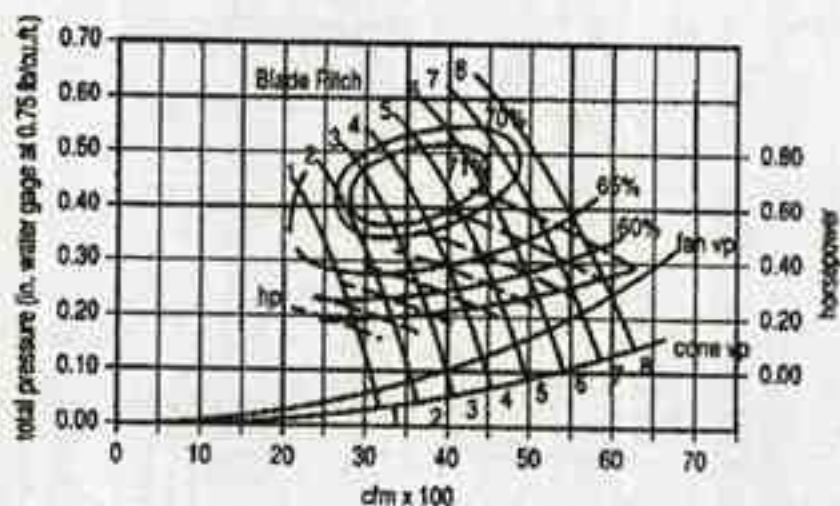


شکل شماره ۳-۴: مشخصات یک نمونه فن از نوع پروانه‌ای

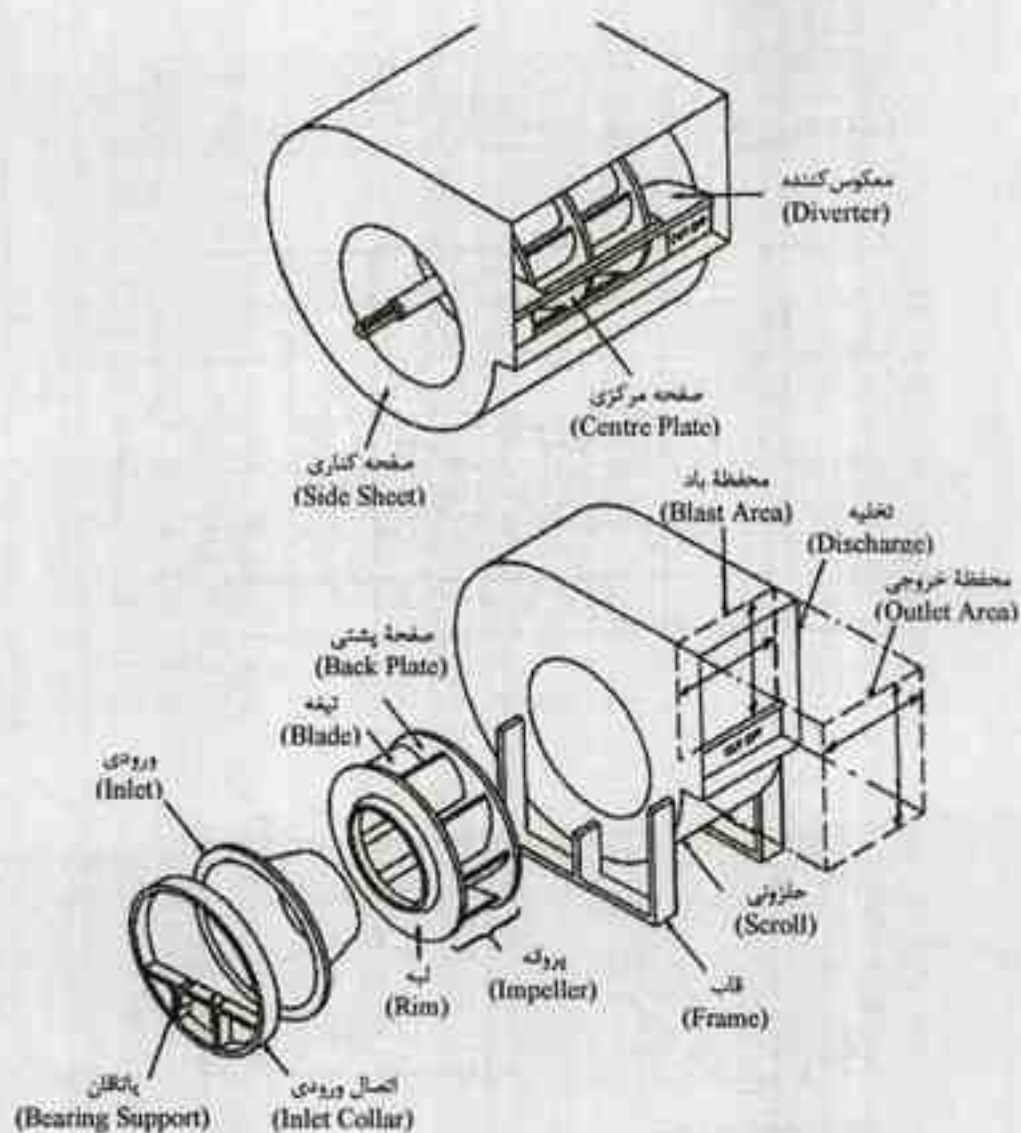


شکل شماره ۳-۳: مشخصات یک فن از نوع مجوری-لوله‌ای

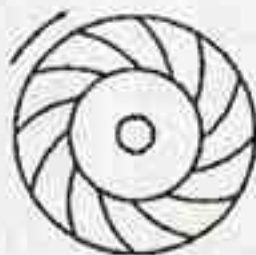
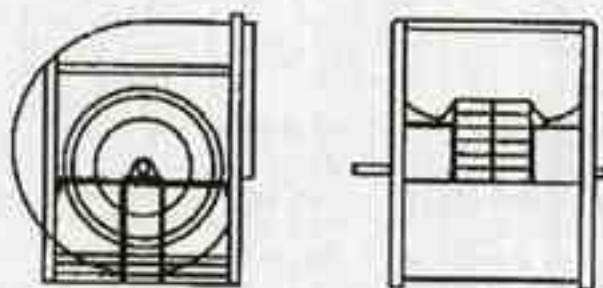
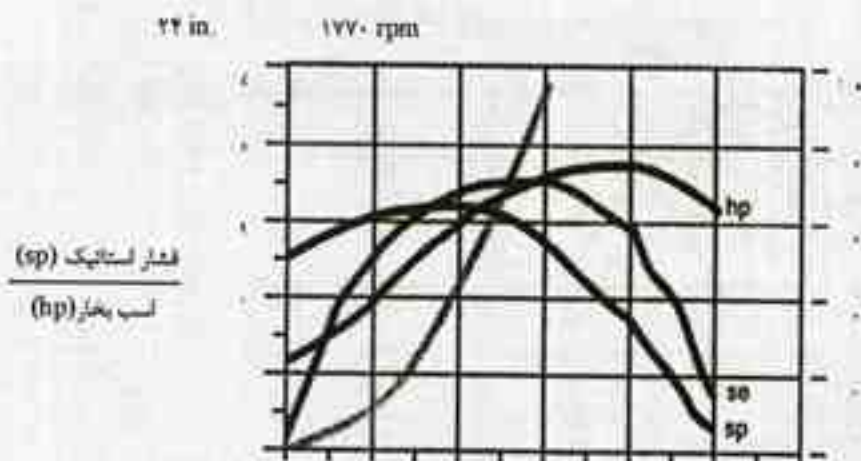
23 in. Axial Flow
870 rpm



شکل شماره ۳-۴: مشخصات یک نمونه فن از نوع محوری - پره ای

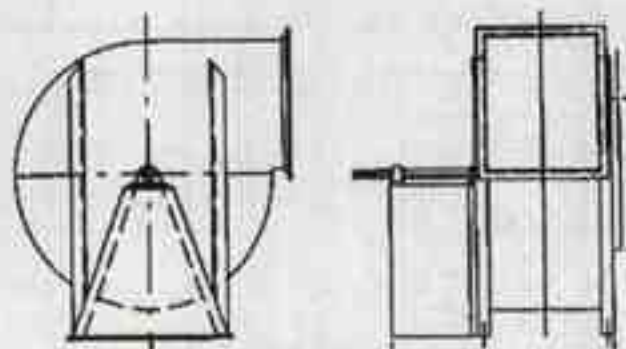
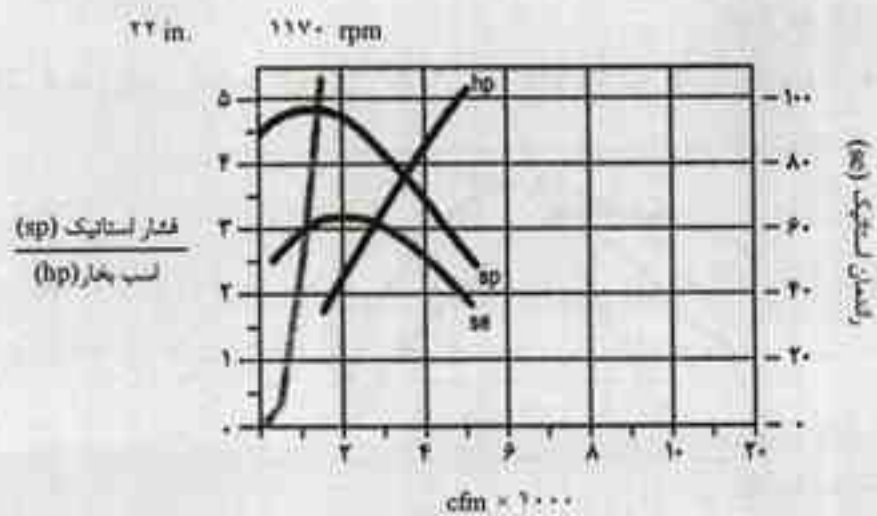


شکل شماره ۳-۵: شکل کلی و اجزای فن‌های نوع گردیز از مرکز (سانتریفوژ)



تیغه ضخیم یکنواخت
(Uniform-thick Blade)

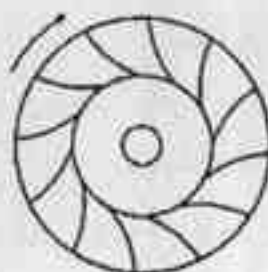
شکل شماره ۷-۳: مشخصات یک نمونه فن از نوع پکوارده اینکلاپند



با پهنای ساده
(Single Width)



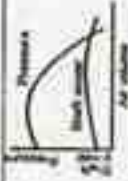
تیغه شعاعی باز
(Open-radial Blade)



تیغه سرشعاعی
(Radial-tip Blade)

شکل شماره ۳-۴ مشخصات یک نمونه فن از نوع شعاعی

جدول شماره ۳-۱: مشخصات و عملکرد انواع فن‌ها

Model	Location of impeller Direction of rotation	Shape of impeller	Total efficiency [%]	Air volume [m ³ /min]	Pressure [mmHg]	Performance curve	Characteristics of performance
Radial flow blower Axial flow fan			Backward 60-80 Aerofoil 75-90	Fan 30-30,000 Blower 60-6,000	Fan 100-1,500 Blower 1,000-10,000		Air volume-pressure curve has a peak. As air volume increases, shaft power also increases, but appearance of a constant value (flat) has character.
Radial flow (variable flow)			60-75	30-30,000	300-2,000		Air volume-pressure curve has a peak. As air volume increases, shaft power also increases.
Multi-blade fan			40-70	20-3,000	~ 120		Air volume-pressure curve has a valley. As air volume increases, shaft power increases sharply.
Special blower (blower diffuser type)			70-80	100-30,000	1,000-3,000		Air volume-pressure curve is flat, with high partial head efficiency and output output range. As air volume increases, shaft power also increases.
Special blower (long blade type)			60-80	30-30,000	100-1,500		Shaft pressure is high and no output character. The others are about the same as a backward blower.
Mini flow Fan			80-85	2-10,000	~ 500		Intermediate characteristics between a backward and an axial flow fan.
Radial flow Fan			70-80	100-30,000	~ 200		Air volume-pressure curve has a valley. Shaft power is maximum at initial and flat generally.

۲-۱- مقاومت و منحنی‌های مقاومت در فن‌ها

هنگامی که هوا از طریق یک کانال یا یک سیستم لوله‌کشی بوسیله یک فن تأمین می‌شود در صورتی که فن فشار مشخصی را نتواند تأمین کند هوا نمی‌تواند در مجرا (کانال) جریان یابد، چون فشار هوا بایستی بر مقاومت مسیر لوله‌کشی یا کانال غلبه نماید.

مقاومت مسیر لوله‌کشی یا کانال با منحنی تحت عنوان منحنی سیستم مشخص می‌گردد. در کنار منحنی سیستم، منحنی دیگری تحت عنوان منحنی فن وجود دارد که شکل آن تابعی از طراحی، اندازه و سرعت فن است. تلاقی دو منحنی سیستم و فن نقطه کار فن را مشخص می‌سازد. منحنی مقاومت سیستم شامل دو جزء است:

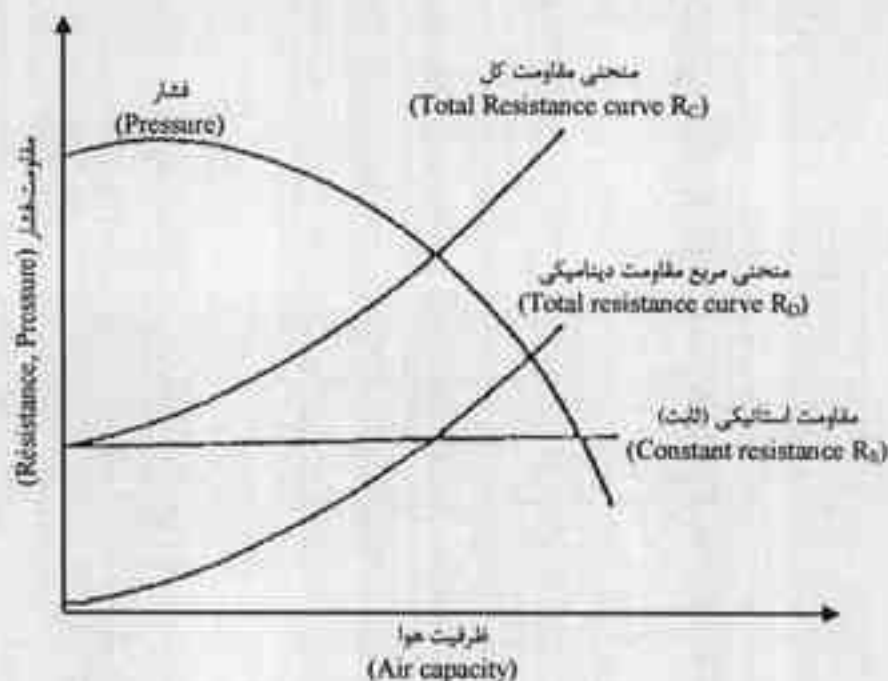
R_d - مقاومت دینامیکی که متناسب با توان دوم سرعت سیال (باد) است.

R_s - مقاومت استاتیکی که هیچ رابطه‌ای با سرعت باد ندارد.

مجموع این دو مقاومت تحت عنوان مقاومت کل ($R_c = R_d + R_s$) نامیده می‌شود.

در اکثر موارد به جز مواردی که در آن، هوا به داخل یک مخزن یا فشار بالا دمیده می‌شود منظور از مقاومت، مقاومت دینامیکی است. در مورد دمش هوا به داخل یک سیستم با فشار بالا یا مکش هوا از یک سیستم با فشار پایین منظور از مقاومت، مقاومت استاتیکی است.

شکل (۳-۹) نشان دهنده منحنی‌های سیستم و فن می‌باشد.



شکل شماره ۳-۹: منحنی‌های سیستم و فن

۳-۱- توان لازم برای فن‌ها

در تعیین توان لازم برای کارکرد یک فن بایستی توان لازم مصرفی به تفکیک زیر، مد نظر قرار گیرد.

الف- قدرت هوا^۱ (L_T)

انرژی مؤثری که توسط یک فن در واحد زمان به هوا داده می‌شود.

$$L_T = \frac{K}{K-1} \times \frac{P_1 \times Q}{6120} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right\} (KW) \quad \text{رابطه شماره (۱-۳)}$$

P_1 : فشار مطلق در سمت مکش (Kg/m^2)

P_2 : فشار مطلق در سمت دمش (Kg/m^2)

Q : جریان هوا (m^3/min)

K : ثابت گازها (برای هوا $K = 1.4$)

اگر نسبت فشار $1/0.3$ یا کمتر باشد رابطه بصورت زیر خواهد بود:

$$L_T = \frac{P_2 \times Q}{6120} (KW) \quad \text{رابطه شماره (۲-۳)}$$

P_2 : کل فشار فن ($mm H_2O$)

ب- توان محوری^۲ (L)

از تقسیم قدرت هوا (یعنی L_T) به راندمان فن (یعنی η_F) توان محوری بدست می‌آید:

$$L = \frac{L_T}{\eta_F} (KW) \quad \text{رابطه شماره (۳-۳)}$$

راندمان معمولاً بر حسب میزان جریان هوای نامی بیان می‌شود.

ج- توان خروجی موتور - LM

به دلیل ساختار ساده و هزینه کم معمولاً از موتورهای القایی برای فن‌ها استفاده می‌شود. برای فن‌های با ظرفیت پائین از موتورهای القایی قفس سنجایی استفاده می‌گردد.

$$L_M = L \times \Phi \times \frac{1}{\eta_M} (KW) \quad \text{رابطه شماره (۴-۳)}$$

Φ : مقادیر ویژه^۳

1. Air Power

2. Axial Power

3. Shaft Power

η_r : راندمان انتقالجدول (۲-۳) و (۳-۳) به ترتیب نشانگر مقادیر η_r و Φ می‌باشند.جدول شماره ۲-۳: مقدار η_r

شفت موازی تک مرحله‌ای	شفت موازی تک مرحله‌ای	شفت موازی تک مرحله‌ای	شفت موازی تک مرحله‌ای
از نوع دنده کاهنده با انتقال	از نوع دنده کاهنده با انتقال	از نوع دنده کاهنده با انتقال	از نوع دنده کاهنده با انتقال
قدرت ۱۰۰ KW و یا کمتر	قدرت ۱۰۰ KW و یا بیشتر	قدرت ۱۰۰ KW و یا کمتر	قدرت ۱۰۰ KW و یا بیشتر
۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۵

نوع اتصال	نسبه صاف	نسبه ۷ شکل
۱	۰/۹۰	۰/۹۵

جدول شماره ۳-۳: مقدار

فن پروانه‌ای	فن دیسکی	فن پرهای	فن توری	فن صفحه‌ای	فن از نوع پروفیل
(Propeller fan)	(Disk fan)	(Multivane fan)	(Turbo fan)	(Plate fan)	(Profile Type fan)
۱/۳۰	۱/۵۰	۱/۳۰	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۱۵

۴-۱- صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در فن‌ها

عوامل اثرگذار در صرفه‌جویی انرژی الکتریکی مصرفی در فن‌ها، از روی دیاگرام زیر قابل استخراج می‌باشند:



از روی این عوامل اثر گذار روی مصرف انرژی، می‌توان راهکارهای کاهش مصرف انرژی را به شرح زیر معرفی نمود:

الف- کاهش زمان کارکرد (کاهش زمان کارکرد غیر مفید)

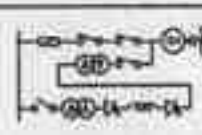
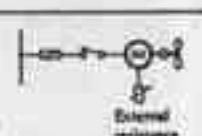
این راهکار صرفه‌جویی انرژی می‌تواند بطرق زیر صورت پذیرد:

- I- اجتناب از راهاندازی فن‌ها قبل از شروع یکار کارخانه
 - II- اجتناب از کارکرد فن‌ها پس از خاتمه کار کارخانه
 - III- قطع کارکرد فن‌ها در مدت زمانی که کارخانه در اثر حوادث و مشکلات غیر مترقبه و ناخواسته متوقف می‌شود.
 - IV- استفاده از سیستم کنترل روشن- خاموش^۱ برای کاهش زمان کارکرد غیر مفید فن‌ها، بدلیل اینرسی بالای فن‌ها باید ملاحظات زیر برای بهره‌گیری از سیستم کنترل خاموش- روشن مد نظر قرار گیرد.
- الف) بررسی طول عمر مکانیکی و الکتریکی موتور- مقاومت مکانیکی و گرمایش و غیره در اثر راهاندازی‌های مکرر، بررسی می‌شوند.
- ب) افت ولتاژ در منبع تغذیه- گرچه ماشین‌های الکتریکی قابلیت کارکرد با ۱۰٪ - ولتاژ نامی را نیز دارند، لیکن ضرورت استفاده از راهانداز نرم باید بررسی شود.
- ج) طول عمر تجهیزات راهاندازی- در صورت تکرار راهاندازی، مسئله افزایش دما در راکتورها و جیرانسازها که برای راهاندازی مورد استفاده قرار می‌گیرند باید بررسی شود.
- د) گرمای ایجاد شده در کابل تغذیه و بررسی طول عمر کلیدها- جدول (۳-۴) و (۳-۵) به ترتیب نشان دهنده عمر کلید و مقایسه سیستم‌های مختلف راه اندازی می‌باشند.

جدول شماره ۳-۴: عمر کلید (هنگامی که تحت تعبیر قرار نگیرد)

طول عمر الکتریکی (Electrical life)	طول عمر مکانیکی (Mechanical life)	مشخصات
۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ بار	۱۰۰۰۰ بار	قطع کننده روغنی (Oil breaker)
۱۰۰۰۰ بار	۱۰۰۰۰ بار (امکان افزایش تا ۵۰۰۰۰ بار)	قطع کننده خلع (Vacuum breaker)
۱۰۰۰۰ بار	۱۰۰۰۰ بار (امکان افزایش تا ۵۰۰۰۰ بار)	قطع کننده گازی (Gas breaker SF ₆)
۵۰۰۰۰۰۰ بار (درجه یک)	۵۰۰۰۰۰۰ بار (درجه یک)	کنتاکتور الکترومغناطیسی با ولتاژ بالا (High voltage electromagnetic contactor)

جدول شماره ۳-۵: مقایسه انواع سیستم‌های رانندگی

Starting system	Composition diagram	Starting current	Starting torque	Voltage when starting	Electro-magnetic force	Armature heating capacity	Problems when starting at multi-frequency
Direct starting		100 (6 to 7 times full-load current)	100 (About 150 % on rated torque)	100	100 (In proportion to square of current)	$100 \left(\frac{Q^2 \cdot K^2}{30} \right)$	Power voltage drop, Motor life, Breaker life
Reactor starting		50, 65, 80	25, 42, 64	50, 65, 80 (Standard tap)	25, 42, 64	100	Reactor heating capacity, motor life, breaker life
Closed circuit transition auto-transformer starting		25, 42, 64	25, 42, 64	50, 65, 80 (Standard tap)	25, 42, 64	100	Starting compensator heating capacity, motor life, breaker life
VVVF Starting		17 or less (Any value below rated current)	70 or less (Any value below rated torque)	0 - 100 (In proportion to speed)	2 - 3 (Large when there is inrush current)	Hardly any	Transient torque (when switched from VVVF to main power source), inrush current (when switched from VVVF to main power source), effects from higher harmonic (motor temperature rise, occurrence of shaft voltage, resonance of pulsating torque and shaft torsion, surging voltage when commencing)
Secondary side resistor starting (limited to wound-rotor type)		18 - 40 (Optional)	80 - 200 (Optional)	100	3 - 16	Hardly any (Consumed by external resistance)	External resistance heating capacity, breaker life, slip ring heating capacity, mechanical life of brush lifting mechanisms, life of motor for brush lifting

Note: (1) Value at direct starting is regarded as 100 %.

(2) Starting torque is generated torque of motor and shall be (Starting torque + Stalling torque)/2.

ب- کنار هم گذاشتن تجهیزات با راندمان بالا

نکات قابل توجه در این راهکار عبارتند از:

I- راندمان فن‌ها- انتخاب بهترین گزینه برای فن، بهبود شکل تیغه‌ها و...

II- راندمان تجهیزات انتقال قدرت

III- راندمان موتورها

ج- کاهش در توان هوا-

کاهش توان مصرفی فن به کاهش میزان جریان هوا^۱ می‌انجامد. در مورد جریان هوا قبل از پرداختن به هر بحثی بایستی به سه سوال اساسی ذیل پاسخ داد:

- ۱- میزان جریان هوای مناسب چقدر است؟
- ۲- برای داشتن این میزان هوا، کدام روش کارا باید مورد استفاده قرار گیرد؟
- ۳- آیا نشت هوا در سیستم لوله‌کشی و محل استفاده وجود ندارد؟

پس از اینکه به سؤالات فوق پاسخ مناسب دادیم به بیان سیستم‌هایی می‌پردازیم که برای کاهش جریان هوا وجود دارند که این سیستم‌ها عبارتند از:

الف) سیستم ثابت

ب) سیستم متغیر

روش‌های خلاصه شده برای دو سیستم فوق‌الذکر به منظور کاهش ظرفیت هوای دمیده شده و کاهش جریان هوا در جدول‌های (۳-۶) و (۳-۷) ارائه گردیده‌اند. روش‌های مطرح در تعدیل جریان هوا در سیستم ثابت عبارتند از:

روش‌های کاهش تعداد، تعویض پره‌ها و تغییر در سرعت چرخش از طریق تغییر موتور یا قطر پولی.

تکنیک‌های مطرح در سیستم متغیر نیز عبارتند از:

کنترل درجه قابل تنظیم^۲ (دمپر) در خروجی، کنترل دریچه ورودی، کنترل فرکانس، تغییر در تعداد قطب‌های الکتروموتور، کنترل مقاومتی در ثانویه موتور و...

پس از معرفی تکنیک‌های هر سیستم به بررسی اجمالی برخی از آنها می‌پردازیم.

جدول ۳-۶: روش کاهش ظرفیت دمش هوا (نوع ثابت)

دسته بندی اصلی	دسته بندی فرعی
کاهش ظرفیت دمش	کاهش تعداد فن‌های مورد استفاده تعویض فن‌ها، برش یا جابجایی پروانه
انتخاب و تنظیم صحیح باز شدن پره‌های دریچه قابل تنظیم (دمپر)	کاهش دفعات باز شدن دریچه قابل تنظیم، کاهش دفعات باز شدن پره‌ها
تغییر سرعت چرخش	تعویض موتور، تعویض تسمه پولی، نصب یا تعویض کاهنده

1. Air Flow
2. Damper

جدول شماره ۷-۳: روش کاهش جریان هوا (سیستم متغیر)

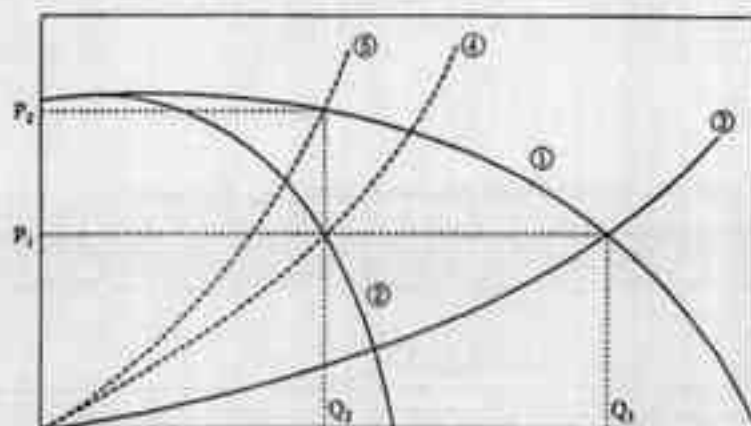
کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)	کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)
کنترل پره (vane) ورودی	کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)
تغییر تعداد قطب‌ها (Poles)	کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)
کنترل کوپلینگ جریان گردابی	کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)
کنترل ولتاژ متغیر - فرکانس متغیر	کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)
کنترل شریوس (Scherbius)	کنترل درجه قابل تنظیم (متغیر)

۱- کاهش تعداد-

مطابق شکل (۱۰-۲) دو فن شماره (۱) و (۲) با مشخصات یکسان بصورت موازی کار می‌کنند. جریان هوای لازم از Q_1 به Q_2 به میزان نصف کاهش پیدا می‌کند. منحنی مقاومت سیستم که شامل درجه قابل تنظیم نیز است از نقطه (۳) به نقطه (۵) تغییر می‌کند. توان لازم در این نقطه متناسب با $P_2 \times Q_2$ است. همین میزان هوای لازم $Q_2 = 1/2 Q_1$ را می‌توان توسط یک فن با منحنی مقاومت (۴) تأمین نمود. توان لازم در این شرایط متناسب با $P_1 \times Q_2$ است. اختلاف توان در دو حالت معادل:

$$P_2 \times Q_2 - P_1 \times Q_2 = (P_2 - P_1) \times Q_2$$

می‌باشد که این مقدار حداقل صرفه‌جویی توان حاصله در بکارگیری یک فن، بجای استفاده از دو فن با دهمر می‌باشد. اختلاف در راندمان دو روش نیز به مقدار بالا اضافه می‌شود.



شکل شماره ۱۰-۳: منحنی عملکرد برای کارکرد موازی فن‌ها

II- جایگزینی پره‌ها^۱

در صورتی که ظرفیت فن بالاتر از میزان هوای مورد نیاز تعیین شده باشد، راهکار جایگزینی پره‌ها مطرح

می‌شود. این مورد (اضافه ظرفیت) اگر با افزایش وزن مخصوص هوا یا گاز همراه شود، سبب افزایش فشار باد به میزان زیاد گردیده و این مسئله موجب افزایش بار الکتروموتور متصل به فن می‌شود.

روابط حاکم بین جریان، فشار، توان مصرفی و قطر پره، حاکی از آن است که تغییر قطر پره می‌تواند به میزان قابل توجهی روی مصرف توان الکتریکی فن اثر بگذارد.

اگر Q نشانگر جریان، P مین فشار، L مین توان محوری و D مین قطر پره باشد، روابط زیر را خواهیم داشت:

$$Q \approx D^2 \text{ (جریان با توان دوم قطر متناسب است)}$$

$$P \approx D^2 \text{ (فشار با توان دوم قطر متناسب است)}$$

$$L \approx D^4 \text{ (توان مصرفی با توان چهارم قطر متناسب است)}$$

لذا کاملاً مشخص است که با کاهش قطر پره به میزان لازم صرفه‌جویی انرژی الکتریکی در فن‌ها حاصل می‌گردد. انجام بالاس مجدد فن پس از کاهش قطر پره الزامی است.

III- استفاده از درجه قابل تنظیم (دمپر) و پره راهنما

دمپر وسیله‌ای است که بصورت عمودی در مسیر جریان هوا قرار می‌گیرد و بوسیله آن سطح مقطع مفیدی که برای عبور جریان لازم است، تنظیم می‌شود. اگر دمپر در ورودی فن نصب شود، تغییر آن سبب تغییر منحنی فشار استاتیک می‌شود و اگر دمپر در خروجی فن نصب شود، تغییر آن سبب تغییر منحنی مقاومت می‌شود.

پره راهنما یک تیغه متحرک است که در ورودی فن نصب می‌شود و سبب چرخش هوای ورودی به فن در جهت چرخش فن می‌شود. تغییر در آن سبب تغییر در فشار بار و منحنی جریان هوا می‌شود.

جدول (۸-۳) اصول و مشخصات عملکردی دمپر، پره راهنما و تغییر سرعت را در فن‌ها مقایسه می‌کند.

جدول شماره ۳-۸: مقایسه اصول و مشخصات عملکردی دمپر، پره راهنما و تغییر سرعت در فن‌ها

Method	Discharge damper opening adjustment	Intake damper opening adjustment	Intake vane control	Changing the rotating speed
Principle	Change blower resistance curve by intentionally increasing resistance of the piping system.	Since damper resistance is provided on intake side, it serves as a negative pressure and pressure curve slightly changes. Axial power curve also changes slightly.	Reduce the impeller work done by intentionally changing gas flowing angle against blower impellers, thus changing the pressure and power curves at the same time.	Air capacity is in proportion to the rotating speed, the pressure is square of the rotating speed, and the axial power is cube of the rotating speed.
Diagram of principle	When damper is closed, resistance increases and operating point changes from (P_1, L_1, Q_1) to (P_2, L_2, Q_2). Note: Operating point is a point of intersection of pressure and resistance curves.	When damper is closed, pressure curve falls and operating point changes from (P_1, L_1, Q_1) to (P_2, L_2, Q_2).	Reducing vane lowers pressure and axial power curves. Operating point changes from (P_1, L_1, Q_1) to (P_2, L_2, Q_2). Reduction in axial power is far larger than damper opening adjustment.	Changing the rotating speed from N_1 to N_2 shifts the pressure and axial power curves from (1) to (2), and the operating point from (P_1, L_1, Q_1) to (P_2, L_2, Q_2).
Special features	1) Surging area is wide and effective air capacity control cannot be performed. 2) Axial power does not lower much even in low air capacity area.	1) Surging area is narrower than for discharge damper. 2) Axial power lowers almost in proportion to air capacity.	1) Same as at left. 2) Axial power lowers almost in proportion to air capacity and tends to lower much more than the intake damper.	Axial power lowers most and this is the best method for electric power conservation.

IV- تغییر سرعت چرخش (تغییر موتور یا تغییر قطر بولی)

در بارهای از نوع گریز از مرکز مانند فن‌ها و پمپ‌ها، تغییرات جریان، فشار و توان با دور مطابق روابط معروف زیر است:

$$Q \approx n \quad \text{جریان } Q$$

$$P \approx n^2 \quad \text{فشار } P$$

$$L \approx n^3 \quad \text{توان } L$$

n دور

یعنی جریان متناسب با دور، فشار متناسب با توان دوم دور و توان مصرفی متناسب با توان سوم دور می‌باشد.

در صورتی که جریان مورد نیاز، کمتر از ظرفیت فن باشد، با جایگزینی الکتروموتور با یک الکتروموتور سرعت پایین‌تر می‌توان از انرژی مصرفی کاست.

در صورت استفاده از سیم، یکی از روش‌های کاهش دور، تغییر قطر بولی است. این دو روش، روش‌های

منطقی نیستند چون برگشت به حالت اولیه به آسانی امکان‌پذیر نیست.

۷- استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت در فن‌ها

نا پیدایش سیستم‌های کنترل سرعت^۱ (VSD) مدرن و اینورترها، از موتورهای القایی روتور سیم‌بندی شده و موتورهای DC برای کنترل سرعت استفاده می‌شد. ولی پیدایش این سیستم‌های پیشرفته سبب شده که موتورهای القایی قفس سنجایی نیز از نظر قابلیت کنترل دور با دو موتور فوق‌الذکر بتوانند رقابت کنند.

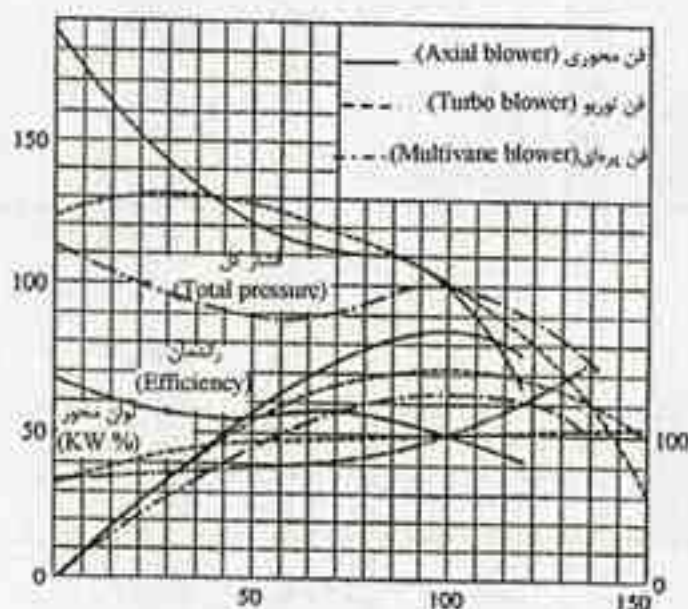
فقط در استفاده از این سیستم‌های کنترل سرعت، باید به نکات زیر توجه داشت:

الف) توان ورودی الکتروموتور بسادگی رابطه ارائه شده با توان سوم دور کاهش نمی‌یابد. این مسئله به دلیل بدتر شدن راندمان الکتروموتور فن اتفاق می‌افتد.

راندمان کلی سیستم‌های محرک مجموعه (الکتروموتور- فن) در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده‌اند.

ب) مبدل‌های الکترونیک قدرت مولد هارمونیک‌های بالا هستند. لذا در استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت بایستی ملاحظات حذف هارمونیک‌های مزاحم در نظر گرفته شود.

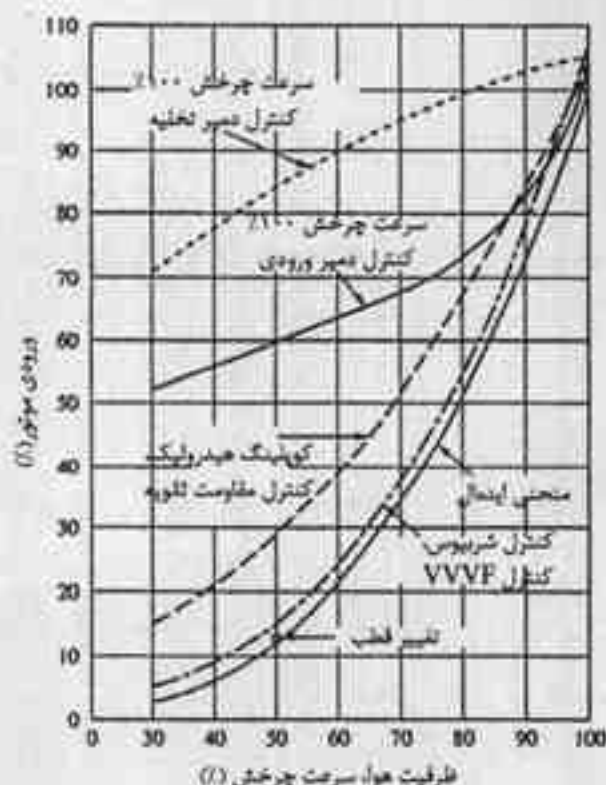
در شکل (۳-۱۲) مقایسه‌ای روی عملکرد انواع سیستم‌های کنترل جریان (دبی) هوا به عمل آمده است. همانطور که از شکل پیداست کارآترین سیستم محرک‌های دور متغیر (ولتاژ متغیر- فرکانس متغیر^۲ می‌باشد.



شکل شماره ۳-۱۱: منحنی مشخصه برای فن‌های مختلف

1. VSD: Variable Speed Drives

2. VVVF: Variable Voltage-Variable Frequency



شکل شماره ۳-۱۲ مقایسه توان ورودی در موتورهای

۲- پمپ‌ها

۱-۲ طبقه‌بندی پمپ‌ها

الف- نوع توربو^۱

الف-۱- پمپ گریز از مرکز^۲ (سانتریفوژ)

فشار آب و سرعت آن اساساً توسط نیروی گریز از مرکز پروانه تأمین می‌شود. جریان آب در جهت عمود یا مایل بر محور پروانه وارد شده و در جهت شعاعی خارج می‌شود. در این پمپ‌ها که بیشترین کاربرد را در صنعت دارا هستند انرژی جنبشی سیال با افزایش سرعت سیال، افزایش پیدا می‌کند و در نهایت انرژی جنبشی ایجاد شده فشار آب را تأمین می‌کند.

الف-۲- پمپ جریان مرکب^۳

ورود و خروج جریان آب در پمپ به صورت مایل بر محور پروانه صورت می‌گیرد. در این پمپ فشار و سرعت

1. Turbo Type
2. Centrifugal Pumps
3. Mixed Flow Pumps

آب توسط نیروی گریز از مرکز پروانه و تغییر پره^۱ تأمین می‌شود.

الف-۳- پمپ جریان محوری^۲

جریان ورودی و خروجی آب در جهت محور پروانه می‌باشد. در این پمپ فشار و سرعت آب، توسط تغییر در پره صورت می‌گیرد.

در شکل (۱۳-۳) پمپ‌های نوع توربو نشان داده شده است و در جدول (۹-۳) طبقه‌بندی و انواع مختلف پمپ‌های توربو ارائه گردیده‌اند.

ب- پمپ‌های از نوع جابجایی مثبت^۳

این نوع از پمپ‌ها، برای جریانهای با آهنگ جرمی پائین ولی فشار نسبتاً بالا مناسب بوده و به دو نوع پمپ رفت و برگشتی و چرخان تقسیم می‌شوند.

ب-۱- پمپ رفت و برگشتی^۴

با یک پیستون رفت و برگشتی داخل یک سیلندر، آب تحت فشار توسط باز و بسته کردن مرحله‌ای شیرها به بیرون ارسال می‌شود. یک محفظه هوا بنام مخزن هوا یا جمع‌کننده^۵ جهت جلوگیری از ضربه^۶ در محل تحویل آب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۱۴-۳) نشانگر پمپ رفت و برگشتی و مخزن هوا است.

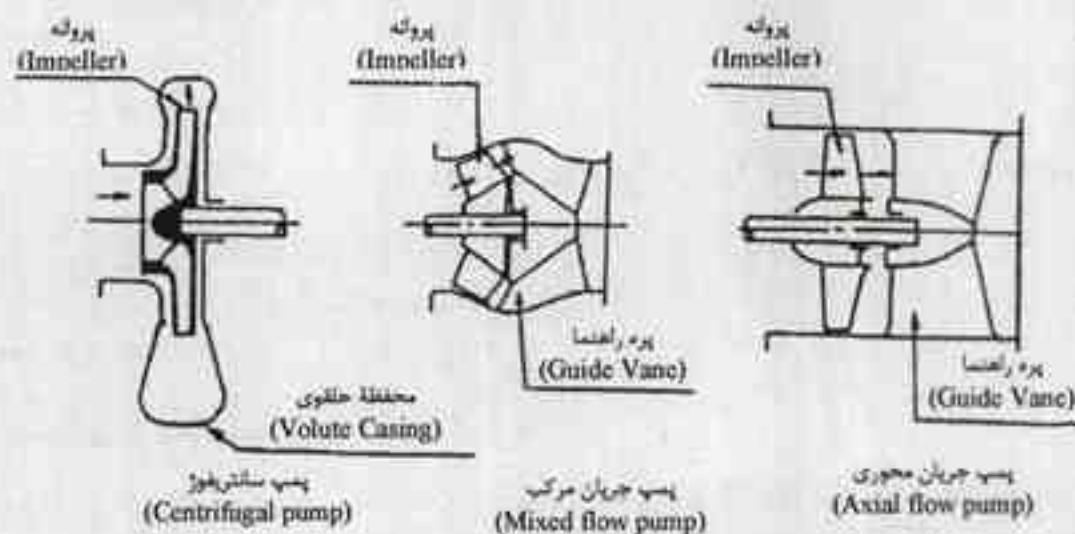
ب-۲- پمپ چرخان^۷

این نوع از پمپ‌ها بطور وسیع در پمپاژ سیالات با ویسکوزیته نسبتاً بالا (مانند روغن)، فشرده‌سازی و روغن کاری استفاده می‌شود. شکل (۱۵-۳) پمپ‌های نوع چرخان را نشان می‌دهد.

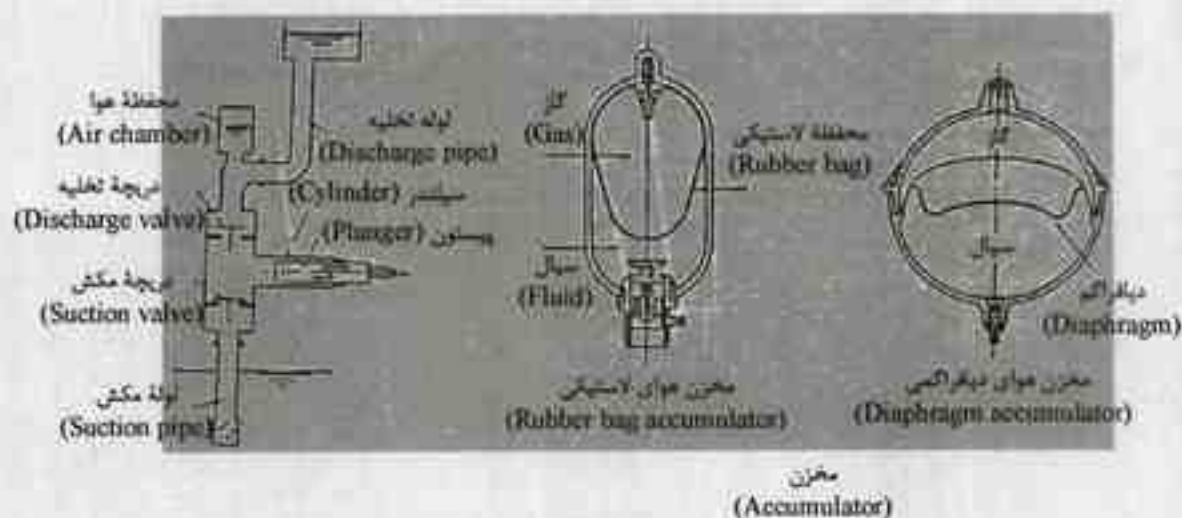
شکل (۱۶-۳) و (۱۷-۳) و (۱۸-۳) و (۱۹-۳) و (۲۰-۳) به ترتیب نشانگر ساختار یک پمپ گریز از مرکز کوچک، یک پمپ گریز از مرکز چند مرحله‌ای، یک پمپ گریز از مرکز یا مکش دویبل، یک پمپ جریان مرکب و یک پمپ جریان محوری هستند.

شکل (۲۱-۳) نشان‌دهنده گستره کاربرد انواع پمپ‌هاست.

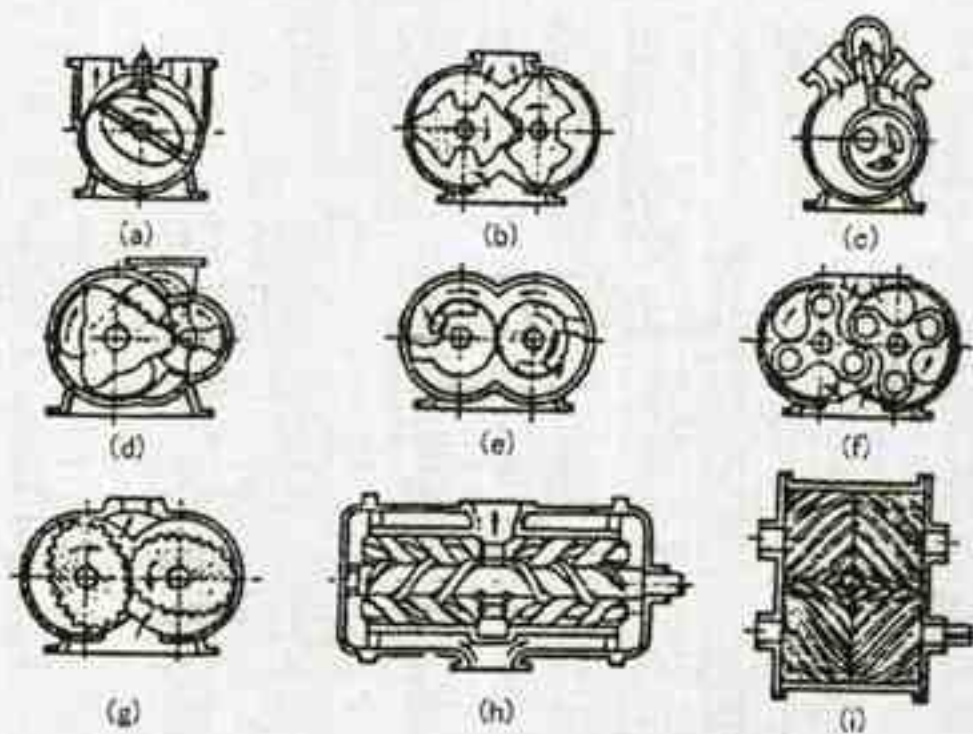
1. Vane
2. Axial Flow Pumps
3. Positive Displacement type
4. Reciprocating Pump
5. Accumulator
6. Pulsation
7. Rotary Pump



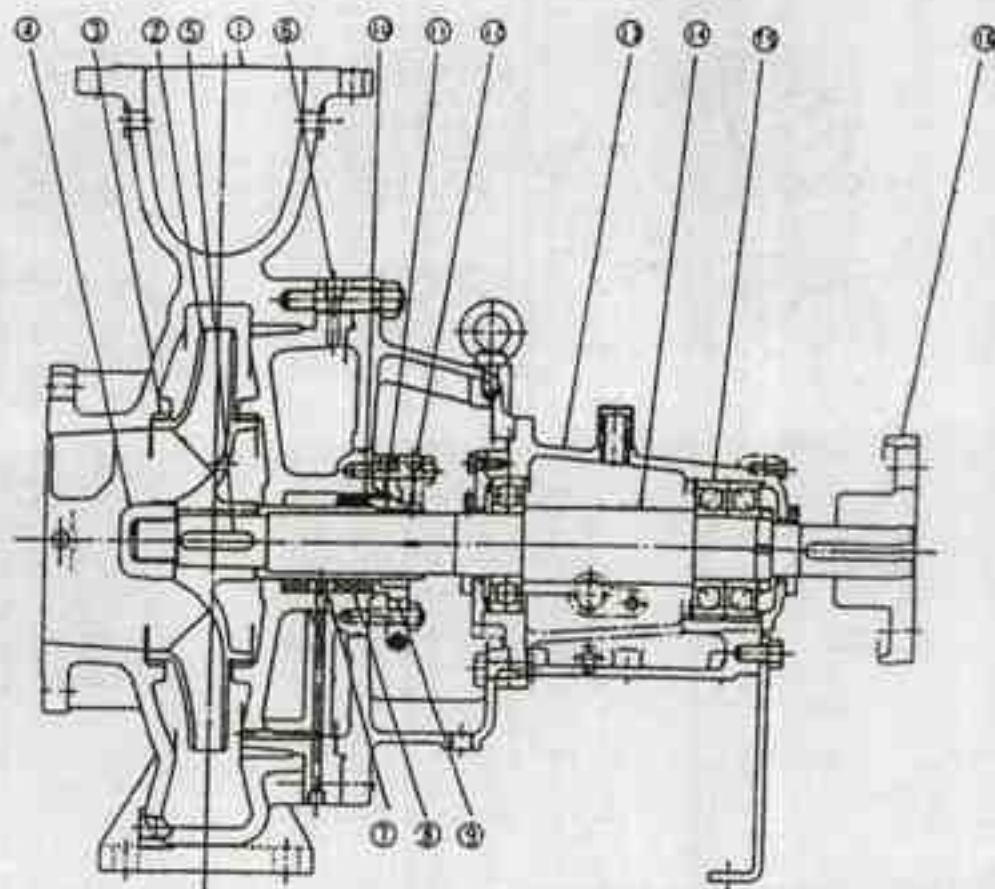
شکل شماره ۳-۱۳: پمپ‌های نوع توربو



شکل شماره ۳-۱۴: پمپ رفت و برگشتی و مخزن هوا



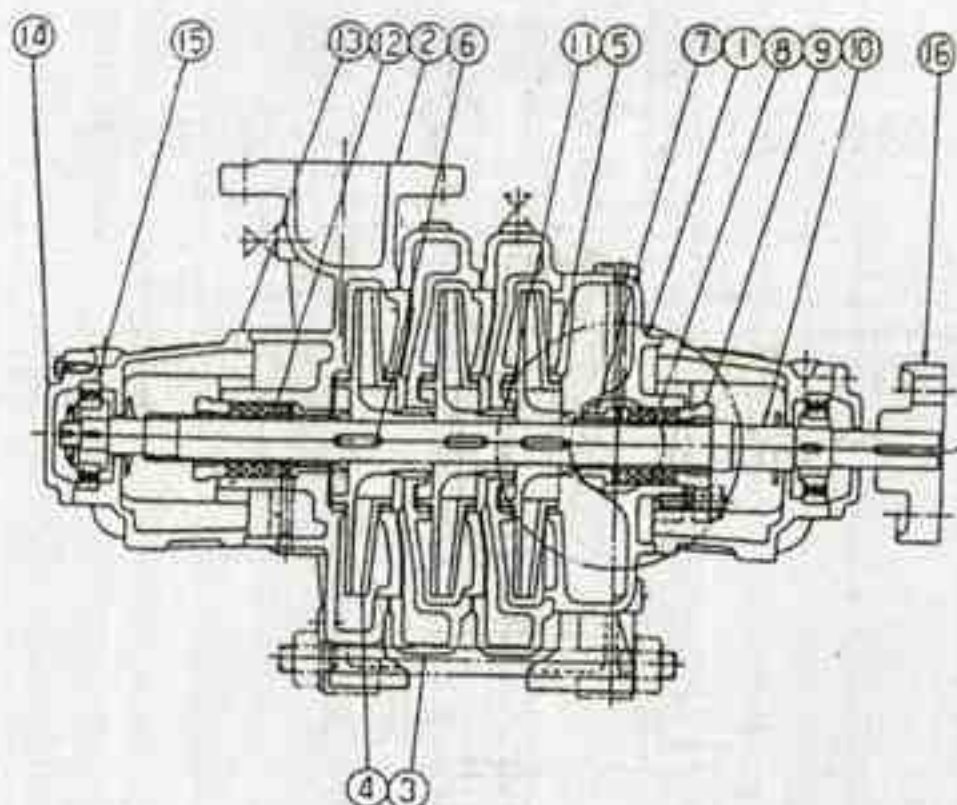
شکل شماره ۳-۱۵: پمپ‌های نوع جریخان



Parts number	Parts name	Parts number	Parts name
1	Casing	9	Packing gland
2	Impeller	10	Mechanical seal sleeve
3	Liner ring	11	Mechanical seal
4	Impeller nut	12	Mechanical seal cover
5	Key	13	Bearing
6	Stuffing box	14	Ball bearing shaft
7	Water sealing	15	Ball bearing
8	Gland packing	16	Shaft coupling

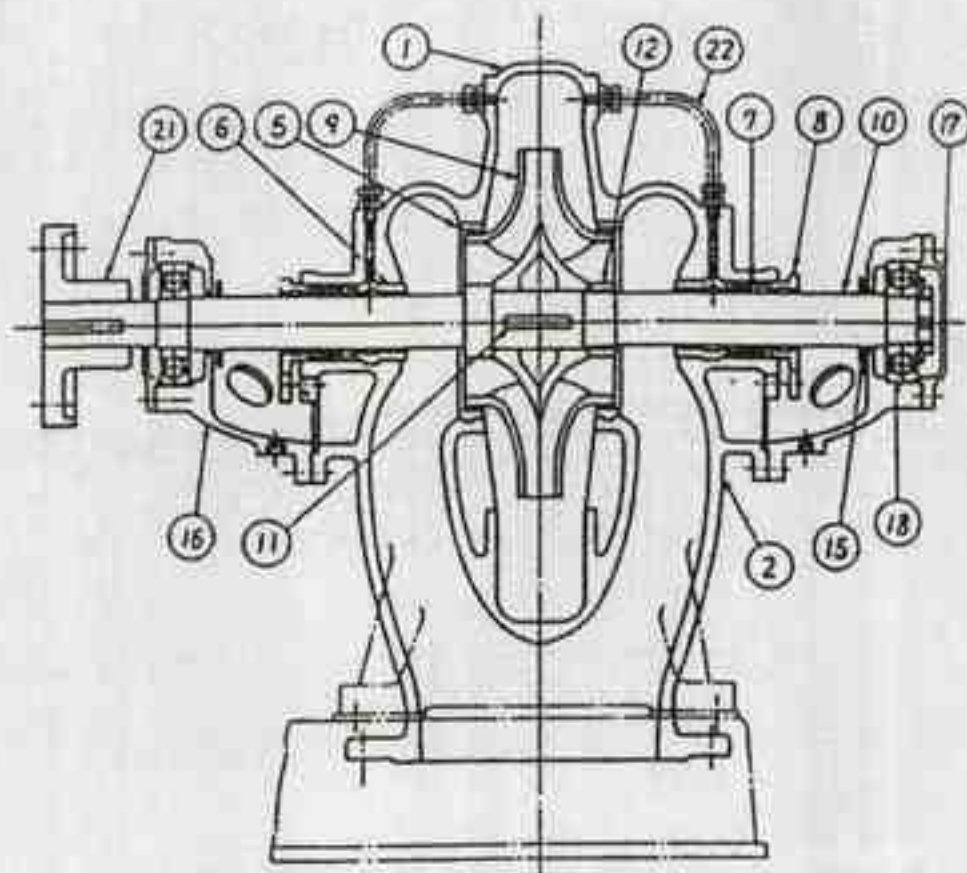
Either 7-9 or 10-12 is selected according to usage

شکل شماره ۳-۱۶: ساختار یک پمپ گریز از مرکز کوچک



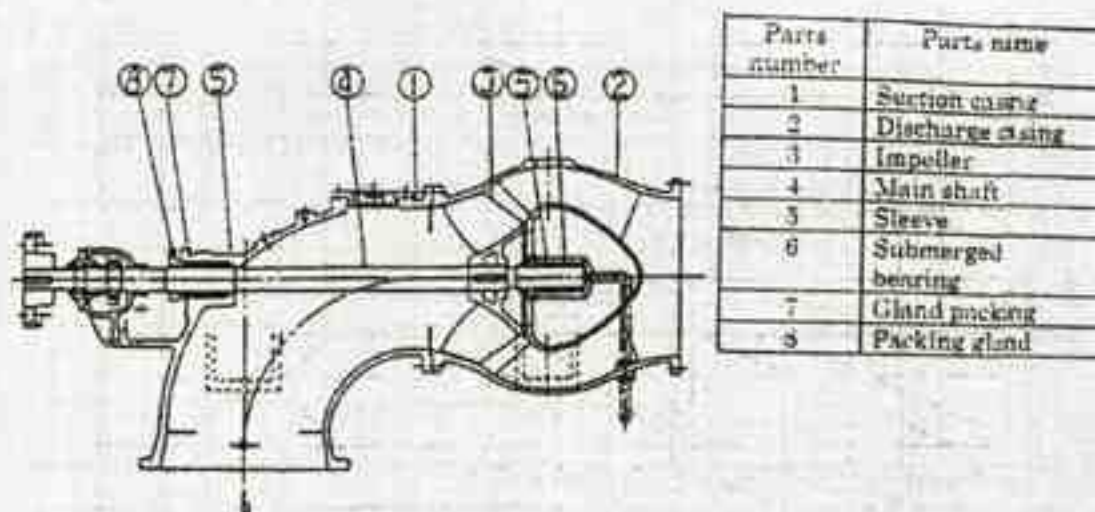
Parts number	Parts name	Parts number	Parts name
1	Suction casing	9	Packing gland
2	Discharge casing	10	Main shaft
3	Middle casing	11	Bush
4	Impeller	12	Packing sleeve
5	Liner ring	13	Bearing case
6	Key	14	Bearing cover
7	Water seal ring	15	Ball bearing
8	Gland packing	16	Shaft coupling

شکل شماره ۳-۱۷: ساختار یک پمپ سانتریفوژ چند مرحله‌ای

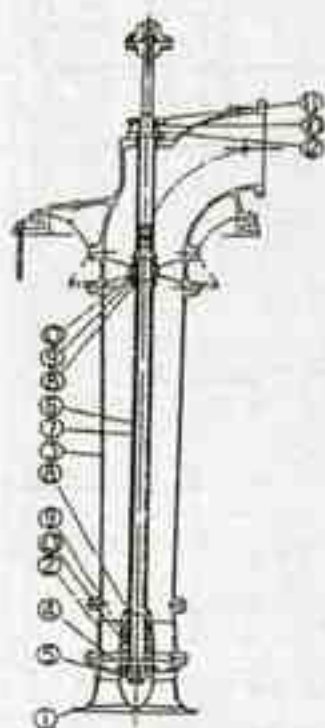


Parts number	Parts name	Parts number	Parts name
1	Upper casing	15	Deflector
2	Lower casing	16	Bearing
5	Liner ring	17	Bearing cover
6	Water seal ring	18	Ball bearing
7	Packing	21	Shaft coupling
8	Packing gland	22	Water seal tube
9	Impeller		
10	Main shaft		
11	Key		
12	Impeller nut		

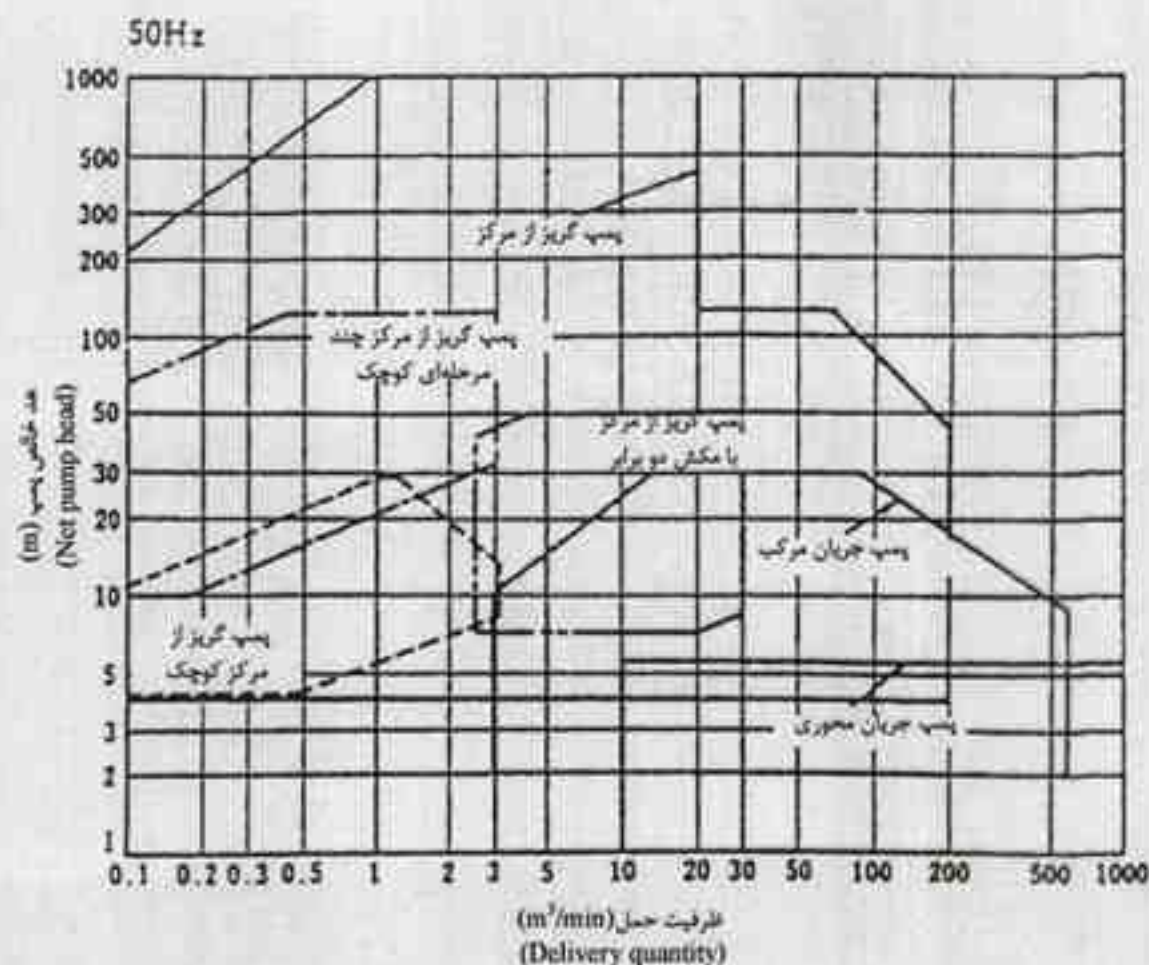
شکل شماره ۳-۱۸: پمپ گریز از مرکز با مکش دوتایی



شکل شماره ۲-۱۹: پمپ جریان مرکب



شکل شماره ۳-۲۰: پمپ جریان محوری

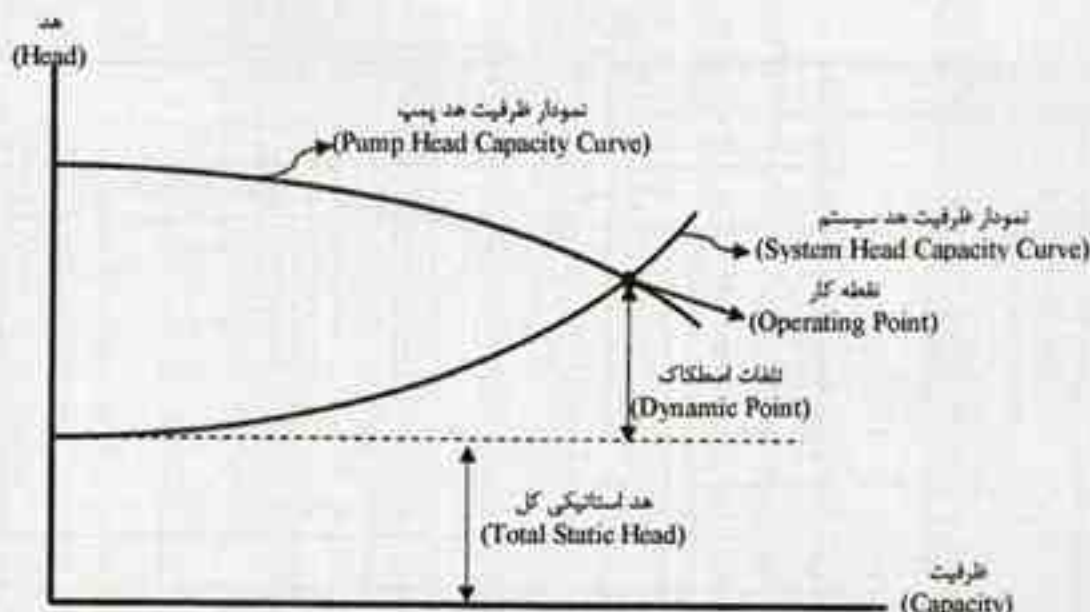


شکل شماره ۲-۳: گستره کاربرد انواع پمپ‌ها (مطابق استاندارد JIS ژاپن)

۲-۲- مشخصات پمپ‌ها

در انتقال و پمپاژ مایعات، گردش پروانه یا نیروی جابجایی ایجاد یک هد (افزایش فشار) می‌کند. این افزایش فشار، مایع را از نقاط پر مقاومت پمپ یا سیستم، حرکت می‌دهد. قدرت هیدرولیکی با گذشتن از این نقاط پر مقاومت، الت می‌کند و انرژی پمپاژ به حرارت تبدیل می‌شود.

شکل (۲-۳) نشان‌دهنده متحنی تغییرات (هد- ظرفیت) برای سیستم و پمپ است. متحنی سیستم وضعیت فرایند را نشان می‌دهد. در هر نقطه، مجموع هدعای استاتیک و هد ناشی از اصطکاک است. هد استاتیک با سرعت جریان تغییر نمی‌کند و تنها تابعی از ارتفاع و فشار پشت پمپ است.



شکل شماره ۳-۲: منحنی تغییرات (هد-ظرفیت) برای سیستم و پمپ

هد ناشی از اصطکاک با توان دوم جریان متناسب بوده و پتانسیل مقاومت ناشی از اصطکاک در لوله است. از تلاقی منحنی سیستم و منحنی پمپ، نقطه کار پمپ در سیستم موجود مشخص می‌شود.

۳-۲- توان مصرفی و راندمان پمپ‌ها

زمانی که حجم آب و هد مشخص هستند، توان مکانیکی مورد نیاز توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{رابطه شماره (۶-۳)} \quad L = \frac{QH\gamma}{102 \times 60 \times \eta_F} = \frac{0.163QH}{\eta_F} \text{ (KW)} \quad \text{توان مکانیکی مورد نیاز}$$

که:

L : توان مکانیکی مورد نیاز (KW)

Q : مقدار آب (m^3/min)

H : هد کلی (m)

γ : وزن مخصوص (Kg/m^3)

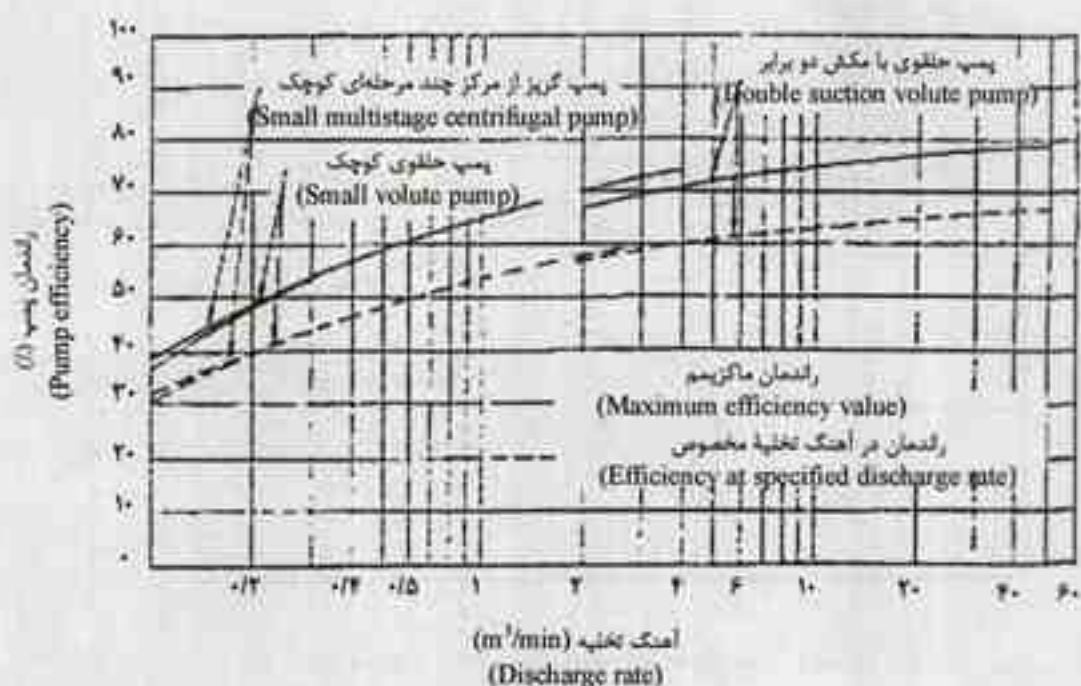
η_F : راندمان پمپ

اگر راندمان موتور η_M و ضریب زردو پمپ ϕ نیز به حساب آورده شود رابطه (۶-۳) به صورت رابطه (۳-۳)

(۷) در می‌آید:

$$\text{رابطه شماره (۷-۳)} \quad L = \frac{0.163QH}{\eta_P \eta_M} \times \phi \text{ (KW)}$$

شکل (۳-۲۳) - منحنی تغییرات راندمان پمپ‌ها را نشان می‌دهد.

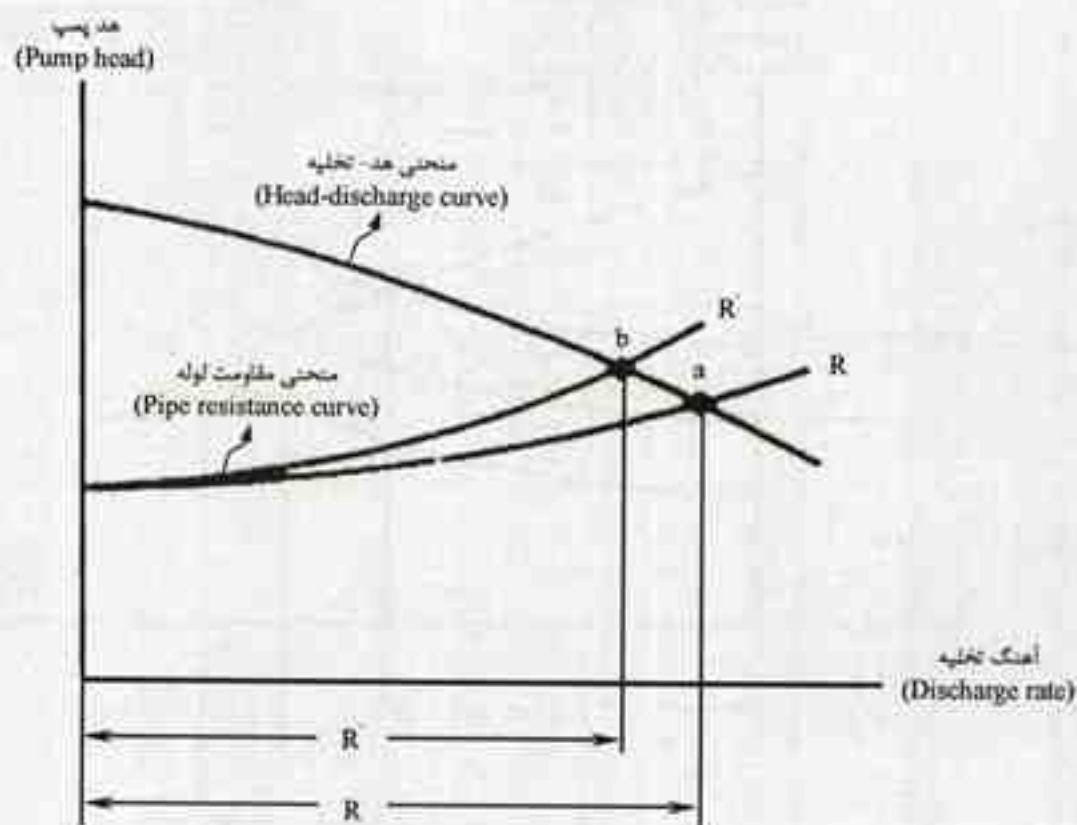


شکل شماره ۲-۲۳: منحنی تغییرات راندمان پمپ‌ها (مطابق استاندارد JIS (ژاپن)

۲-۴- کارکردهای مختلف یک پمپ

الف- تغییر نقطه کار پمپ زمانی که مقاومت سیستم تغییر می‌کند.

به مرور زمان به دلیل زدگی و پرمادگی‌های ایجاد شده در داخل لوله، منحنی مقاومت خطوط لوله (سیستم) از R به R' مطابق شکل (۲-۲۴) تغییر می‌یابد. بنابراین نقطه کار از نقطه a به نقطه b تغییر مکان داده و میزان جریان تخلیه شونده (از Q به Q') کاهش پیدا می‌کند.



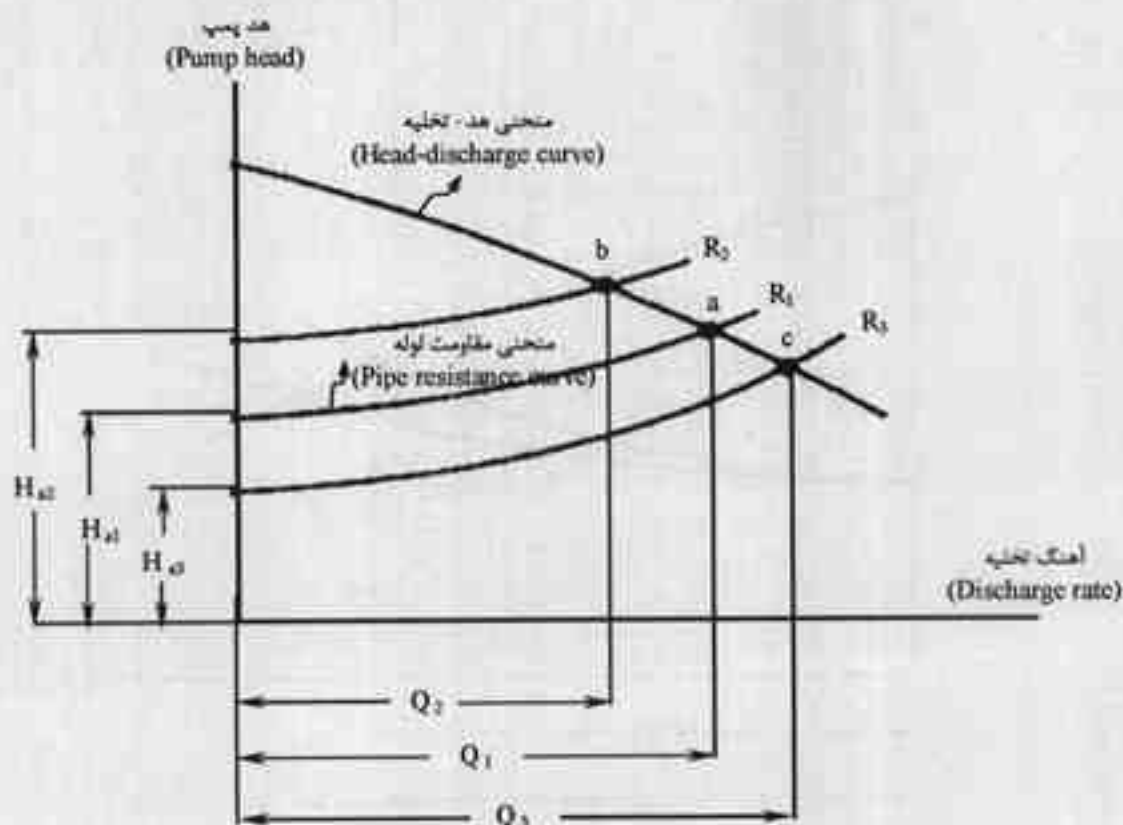
شکل شماره ۳-۲۴: نقطه کار هنگامی که مقاومت سیستم تغییر می‌کند

ب- تغییر نقطه کار پمپ هنگامی که هد واقعی تغییر می‌کند.

اگر ارتفاعی^۱ که آب به آن ارتفاع پمپ می‌شود یا عمقی^۲ که آب از آن عمق پمپ می‌شود تغییر کنند، یا فشارها تغییر کنند، منحنی مقاومت خط لوله (سیستم) بطور موازی و متناظر با R_1 و R_2 به بالا یا پایین تغییر مکان می‌دهد. بنابراین نقطه کار هم مطابق شکل (۳-۲۵) از نقطه a به نقطه b یا c حرکت می‌کند.

در مواردی که هد واقعی تغییر می‌کند، بایستی به این مسئله توجه داشت که با تغییر نقطه کار، راندمان پمپ نیز تغییر پیدا می‌کند. بنابراین با ملاحظه گستره تغییرات و دفعات تغییرات هد واقعی، انتخاب پمپ چنان باید صورت گیرد که بیشترین راندمان حاصل شود.

1. Discharge level
2. Take-in level

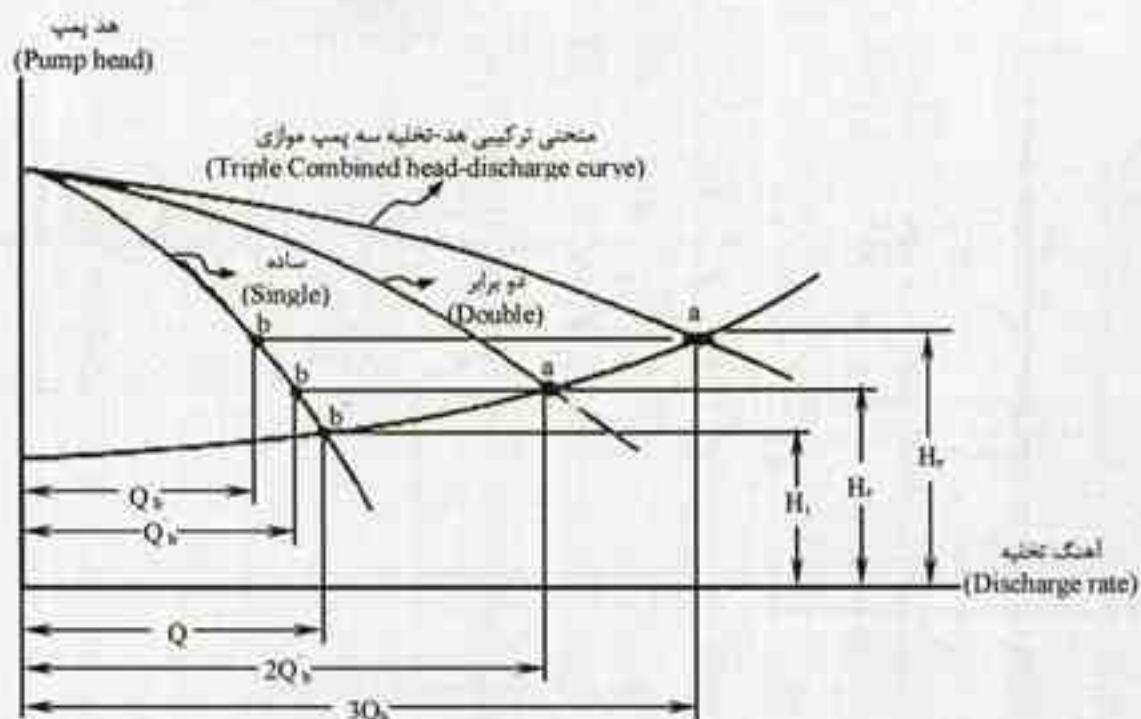


شکل شماره ۳-۲۵ نقطه کار زمانی که هد واقعی تغییر می کند

۲-۵- کارکرد موازی پمپ‌ها

الف- کارکرد موازی دو پمپ با مشخصات یکسان

هنگامی که چند پمپ به صورت موازی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، یک منحنی هد مرکب برای کل پمپ‌ها از روی ترکیب میزان جریان تخلیه شونده از هر پمپ متناظر با یک هد یکسان مطابق شکل (۳-۲۶) می‌تواند بدست آید.



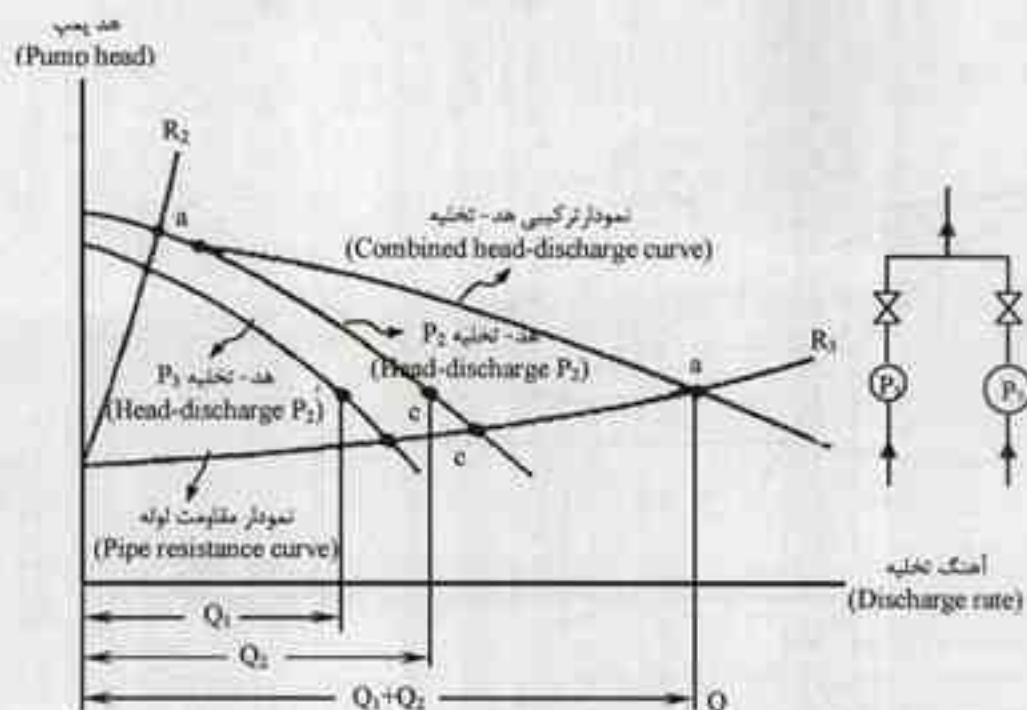
شکل شماره ۳-۲۶: کارکرد موازی پمپ‌ها با مشخصات یکسان

نقطه کار هر پمپ در نقطه b با هدی مساوی با هد نقطه a در نظر گرفته می‌شود. نقطه a در واقع، نقطه کار پمپی فرضی است که منحنی مشخصه این پمپ همان منحنی هد مرکب بوده و از تلاقی این منحنی با منحنی مقاومت خط لوله R این نقطه بدست می‌آید.

نقطه کار در دو حالت دو پمپ یا تک پمپ با فرض منحنی مقاومت یکسان به ترتیب b یا b'' هستند. همانطور که به وضوح از شکل پیدا است نقطه کار بسته به تعداد پمپ‌های مورد بهره‌برداری و با فرض منحنی مقاومت (سیستم) ثابت از b به b'' یا b' تغییر می‌کند.

ب- کارکرد موازی دو پمپ با مشخصات مختلف

منحنی هد مرکب برای کارکرد موازی پمپ‌های با مشخصات مختلف مطابق شکل (۳-۲۷) از طریق جمع جریان تخلیه شونده از هر پمپ در هد یکسان به دست می‌آید.



شکل شماره ۲۷-۳: کارکرد موازی پمپ‌ها با مشخصات مختلف

از روی نقطه تلاقی a بین منحنی هد مرکب و منحنی مقاومت خط لوله R_1 نقطه کار برای هر پمپ روی نقاط b و c می‌افتد. در صورتی که در شرایط کارکرد موازی پمپ‌ها منحنی مقاومت خط لوله به R_2 تغییر یابد، تلاقی آن با منحنی هد مرکب P نقطه a' را به ما می‌دهد. چنانچه از روی شکل نیز پیداست هد بدست آمده بالاتر از هد محدود کننده مربوط به پمپ کوچکتر (P_1) است و بنابراین پمپ P_1 نمی‌تواند در تغذیه آب شرکت کند. تحت این شرایط تنها پمپ با ظرفیت بالاتر یعنی P_2 می‌تواند کار کند.

۲-۶- کارکرد سری پمپ‌ها

الف- کارکرد سری پمپ‌ها با مشخصات یکسان

همانطور که در شکل (۲۸-۳) نشان داده شده، منحنی هد مرکب P از روی حاصل ضرب مقدار هد در جریان یکسان تخلیه شونده از تعدادی پمپ سری به دست می‌آید.

آهنگ جریان در محل تلاقی منحنی مقاومت خط لوله R و منحنی هد مرکب P معادل مقدار آب قابل پمپاژ توسط مجموعه پمپ‌های سری است. نقطه کار برای هر پمپ در این شرایط روی نقطه b می‌افتد.

ب- کارکرد سری پمپ‌ها با مشخصات مختلف

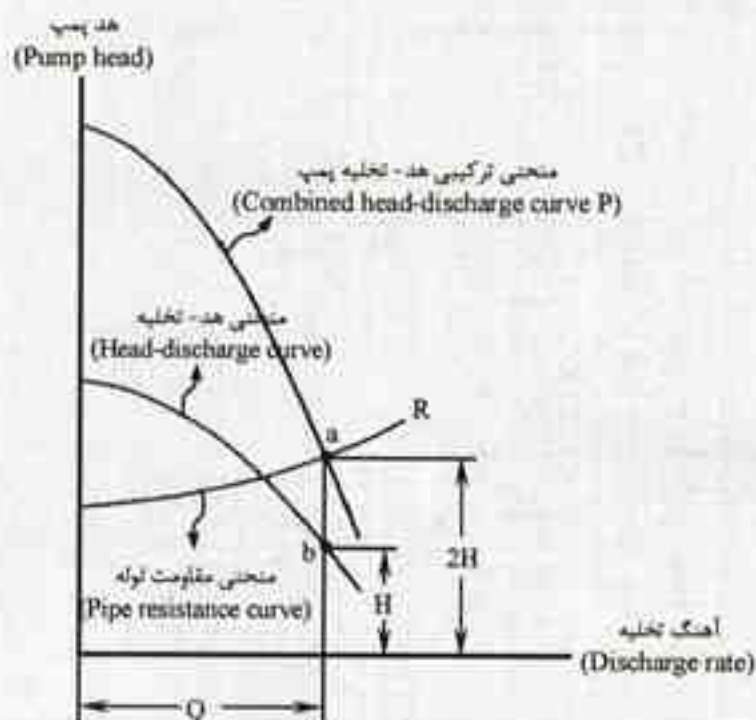
در شکل (۲۹-۳) از تلاقی بین منحنی هد مرکب P و منحنی مقاومت خط R_1 میزان آب قابل پمپاژ مشخص شده

و نقطه کار برای هر پمپ روی نقاط b و c افتاده است.

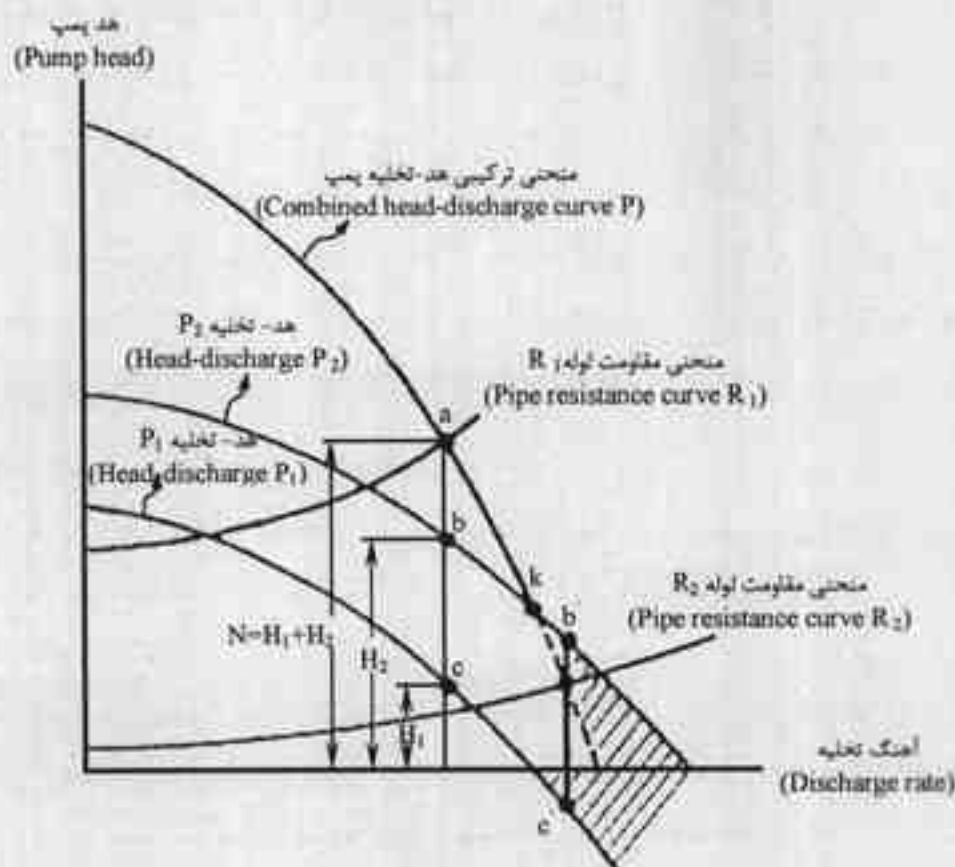
در حالتی که پمپ‌های با منحنی مشخصات متفاوت بصورت سری کار کنند اگر منحنی مقاومت مسیر R_2 از زیر نقطه K عبور کند، بدلیل شرایط مکش پمپ بایستی مراقب وقوع پدیده کاویناسیون باشیم. در صورتی که پمپ با ظرفیت کوچکتر P_1 در ابتدا نصب شود، شرایط مکش پمپ با ظرفیت بزرگتر P_2 بدتر خواهد شد. همچنین در صورتی که آرایش عکس را داشته باشیم یعنی پمپ با ظرفیت بزرگتر را در ابتدا نصب کنیم هد پمپ با ظرفیت بزرگتر P_2 که در ابتدا نصب شده کاهش خواهد یافت. بنابراین باید چنان طراحی انجام شود که منحنی مقاومت مسیر خط لوله از زیر نقطه K عبور ننماید.

۲-۲- شرایط انتخاب کارکرد سری یا موازی

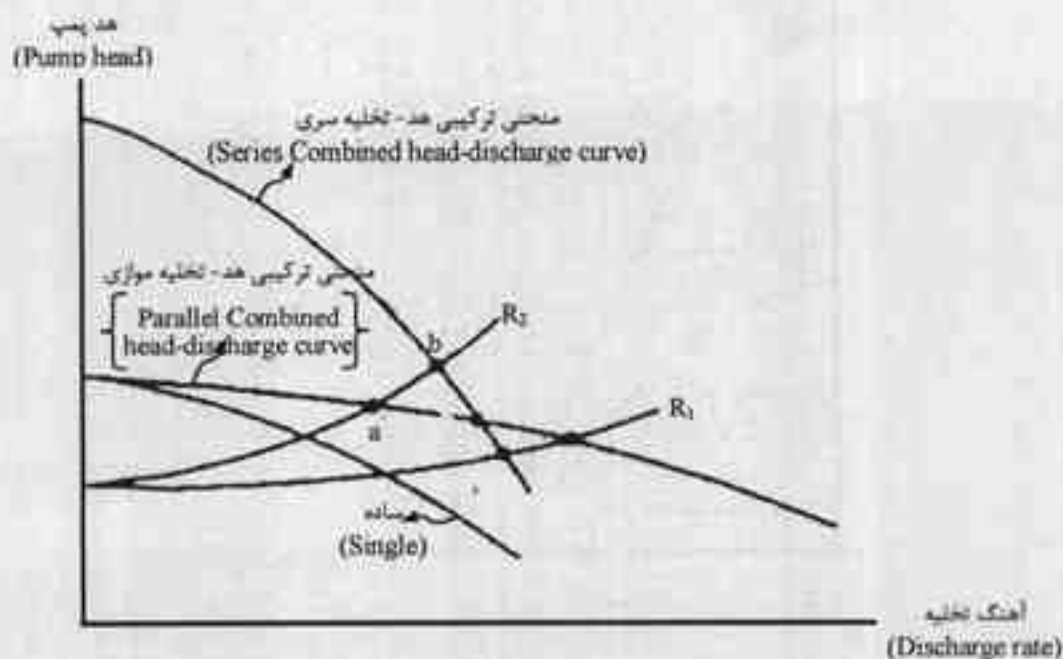
اگر بخواهیم میزان جریان آب را با استفاده از دو پمپ افزایش دهیم از روی شکل منحنی مقاومت مسیر خط لوله مشخص می‌شود که کدام یک از روش‌های کارکرد موازی و یا سری پمپ‌ها سودمندتر است. در شکل (۳-۳۰) مشاهده می‌شود که نقطه تلاقی منحنی هد مرکب حالت سری با منحنی هد مرکب حالت موازی نقطه K بوده و به منزله یک مرز می‌باشد. بهره‌برداری حالت موازی زمانی سودمند خواهد بود که منحنی مقاومت مسیر خط لوله از زیر نقطه K عبور کند (مانند منحنی R_1). بهره‌برداری حالت سری نیز زمانی سودمند خواهد بود که منحنی مقاومت مسیر خط لوله از بالای نقطه K عبور کند (مانند منحنی R_2).



شکل شماره ۳-۳۸: کارکرد سری پمپ‌ها با مشخصات یکسان



شکل شماره ۳-۲۹: کارکرد سری پمپ‌ها با مشخصات مختلف



شکل شماره ۳-۳۰: شرایط انتخاب کارکرد سری یا موازی

۸-۲- راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در پمپ‌ها

الف- تغییر قطر پروانه

اگر جریان تخلیه شونده از پمپ و هد کلی پمپ در هنگام استفاده از آن، بدلیل تخمین ناصحیح در زمان طراحی بیش از میزان مورد نیاز باشد قسمتی از توان مکانیکی پمپ تلف خواهد شد.

در چنین شرایطی کاهش قطر خارجی پروانه پمپ و تطبیق عملکرد پمپ با شرایط جریان و هد مورد نیاز می‌تواند در کاهش مصرف انرژی مؤثر باشد.

عملکرد پمپ پس از برش قطر خارجی پروانه مطابق روابط زیر تغییر می‌کند:

$$Q_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \times Q_1 \quad \text{جریان تخلیه شونده (دبی)}$$

$$H_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \times H_1 \quad \text{هد پمپ}$$

$$P_2 = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \times P_1 \quad \text{توان مکانیکی}$$

D_1 : قطر خارجی اولیه

D_2 : قطر خارجی بعد از برش

Q_1 : جریان تخلیه شونده (دبی) اولیه

H_1 : هد پمپ اولیه

P_1 : توان مکانیکی اولیه

همانطور که از روابط پیداست توان مکانیکی پمپ با تغییر قطر خارجی پروانه به شدت تغییر می‌کند.

هنگامی که برش قطر خارجی پروانه یک پمپ به میزان زیاد باشد راندمان پمپ کاهش خواهد یافت. البته

باید توجه داشت که در برخی از انواع پمپ‌ها برش قطر پروانه غیر ممکن است.

شکل (۳-۳)- تغییر در عملکرد پمپ در اثر برش قطر پروانه را نشان می‌دهد.

ب- انتخاب پمپ‌ها و آثار آن صرفه‌جویی انرژی

در نظر گرفتن حاشیه اضافی برای مقدار جریان و هد در هنگام طراحی و در نظر گرفتن آنها در تعیین مشخصات پمپ، سبب انتخاب یک پمپ با ظرفیت بالاتر از حد نیاز می‌گردد.

تحت این شرایط، بخشی از انرژی ورودی به سیستم پمپ تلف می‌شود و دلیل این امر این است که بخشی از توان مکانیکی نیز همانند آهنگ جرمی آب که اضافی در نظر گرفته شده اضافه بر میزان مورد نیاز می‌باشد.

ج- تغییر سرعت

می‌دانیم که توان مکانیکی یک پمپ با توان سوم سرعت متناسب است.

$$Q_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times Q_1 \quad \text{جریان (دیو)}$$

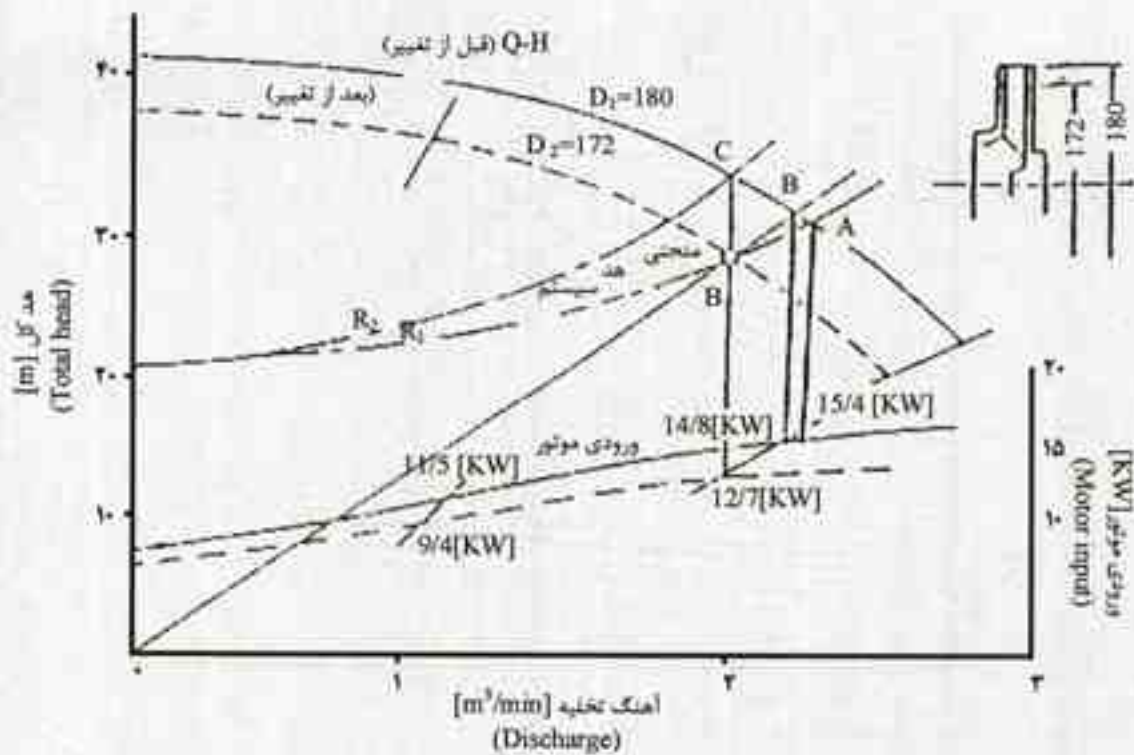
$$H_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \times H_1 \quad \text{هد}$$

$$L_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \times L_1 \quad \text{توان مکانیکی}$$

قبل از تغییر سرعت: L_1, H_1, Q_1, N_1

بعد از تغییر سرعت: L_2, H_2, Q_2, N_2

بنابراین کاهش سرعت در پمپ‌ها یکی از روش‌های بسیار اساسی در کاهش مصرف انرژی در آنهاست. یکی از رهیافت‌ها بدین منظور، استفاده از الکتروپمپ‌های چند سرعت می‌باشد. شکل (۳-۳۲) نشان‌دهنده تغییر عملکرد یکا پمپ با تغییرات سرعت در آن است.



A: نقطه عملکرد پمپ قبل از بریدن پروانه $(2.26[m^3/min] \times 30[m])$

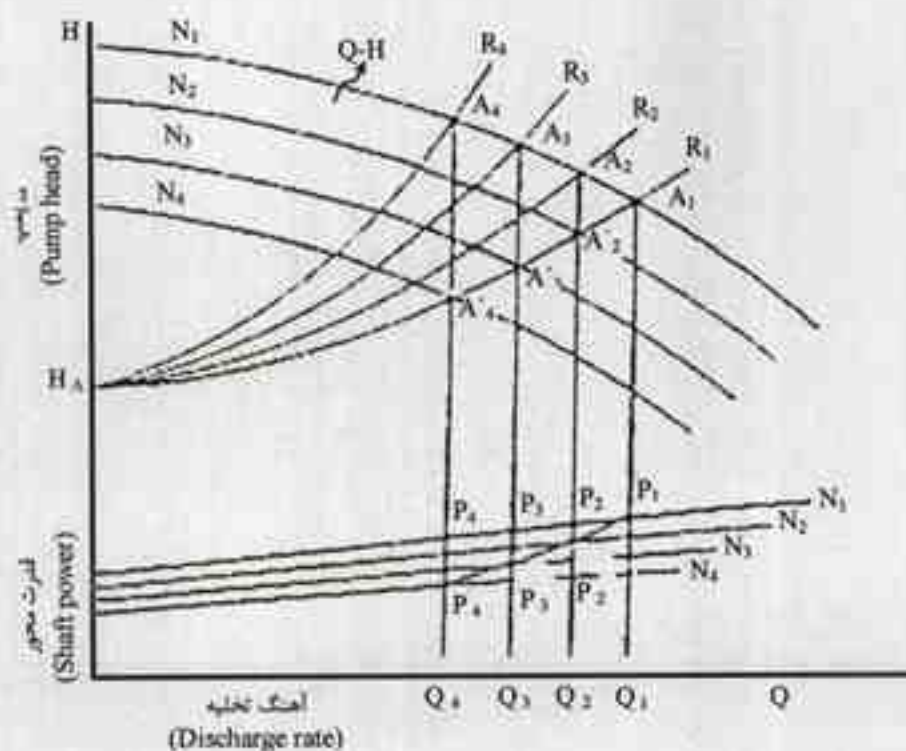
B: نقطه عملکرد پس از بریدن پروانه $(2[m^3/min] \times 28[m])$

B: نقطه متناظر با B قبل از بریدن پروانه $(2.2[m^3/min] \times 30.7[m])$

(نقطه B می‌تواند بر روی B منطبق شود)

C: نقطه کار برای مقدار آب نقطه B در صورت کنترل شیر $(2.2[m^3/min] \times 33[m])$

شکل شماره ۳-۳۱: تغییر در عملکرد پمپ در اثر برش قطر پروانه



$N_1 \sim N_4$: تعداد دور پمپ (منحنی $Q-H$ یک پمپ برای تعداد دورهای متغیر)

$R_1 \sim R_4$: منحنی مقاومت

$A_1 \sim A_4$: نقاط کار در آهنگ ثابت V_1

$A'_1 \sim A'_4$: نقاط کار برای تعداد دورهای متغیر $N_1 \sim N_4$

$Q_1 \sim Q_4$: تغییر مقدار آب

$P_1 \sim P_4$: قدرت محور برای عملکرد ثابت N_1

$P_1 \sim P_4$: قدرت محور برای دورهای متغیر $N_1 \sim N_4$

شکل شماره ۲-۳: تغییر عملکرد پمپ با تغییرات سرعت

د- سیستم‌های کنترل

در مجموع، منظور اصلی از کنترل سرعت، کنترل فشار است. کنترل فشار از دو طریق امکانپذیر است:

۱- کنترل فشار با جریان تخلیه (دی) ثابت

II- تثبیت فشار ترمینال

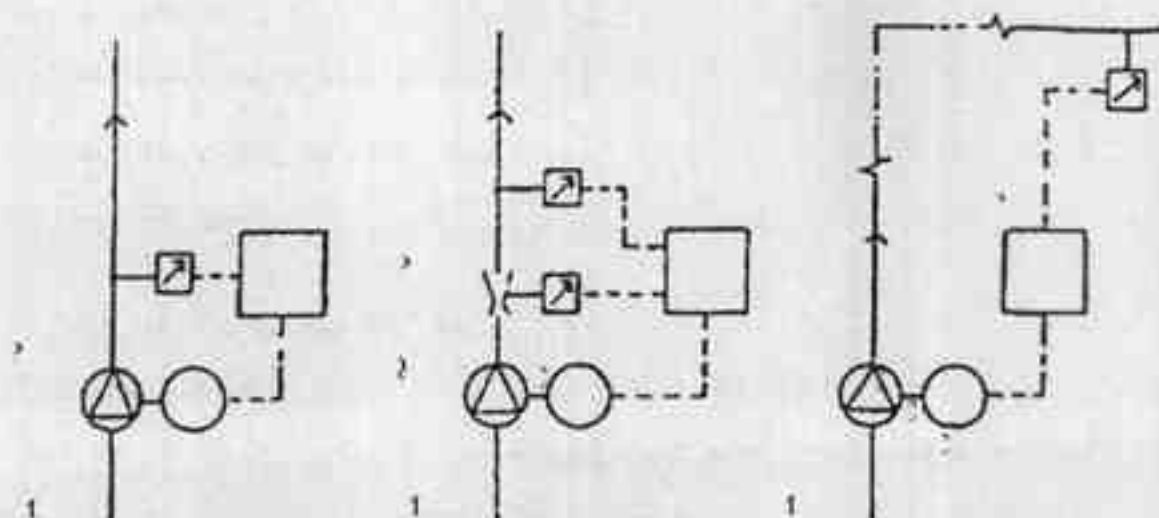
۱- کنترل فشار با جریان تخلیه (دی) ثابت

این سیستم، سرعت گردش پمپ را با فیدبک از فشار تخلیه و ثابت نگه‌داشتن آن تغییر می‌دهد. از آنجایی که گستره تغییرات سرعت کوچک است میزان صرفه‌جویی انرژی حاصل از این سیستم نیز در مقایسه با سیستم کنترل فشار ترمینال ثابت که به آن خواهیم پرداخت کمتر است.

شکل‌های (۳-۳۳) به ترتیب نشانگر اثر تغییر سرعت روی توان مکانیکی و نشانگر نمودار سیستم کنترل برای دو حالت فوق می‌باشند.

II- تثبیت فشار ترمینال

حتی اگر مقدار آب مصرفی نیز تغییر کند، این سیستم با کنترل سرعت پمپ و فیدبک از دی خروجی از پمپ و فشار پا فیدبک از فشار ترمینال بدنیال آن است که فشار آب در ترمینال ورودی به تأسیسات، همواره ثابت نگه داشته شود (در این حالت نقطه کار پمپ چنان کنترل می‌شود که این نقطه به موازات منحنی مشخصه مقاومت سیستم حرکت کند).



کنترل فشار با جریان تخلیه ثابت
(Constant discharge pressure control)

تنظیم فشار ترمینال
(Constant terminal pressure control)

P: فشار سنج (Pressure gauge)

Q: اندازه گیر آهنگ (Flow meter)

C: تابلو کنترل (Control board)

شکل شماره ۲-۳: دیاگرام سیستم کنترل برای دو حالت کنترل فشار با دیس ثابت و تنظیم فشار ترمینال

فصل ۴

صرفه‌جویی انرژی در روش‌های ترانسفورماتورها و سیستم‌های تهویه مطبوع

۱- بهینه‌سازی انرژی در ترانسفورماتورها

۱-۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای توزیع وسایلی هستند که برای تغییر سطح ولتاژ بکار می‌روند. برای انتقال قدرت به منظور کاهش تلفات انتقال از ترانسفورماتورهایی استفاده می‌شود که ولتاژ را افزایش می‌دهند. به این ترانسفورماتورها افزایش می‌گویند. قدرت الکتریکی حاصل ضرب جریان در ولتاژ می‌باشد و چون تلفات خط متناسب با توان دوم جریان است، به همین دلیل برای انتقال یک مقدار مشخص قدرت الکتریکی، با افزایش ولتاژ جریان مورد نیاز را کاهش می‌دهند و به تبع آن تلفات انتقال کاهش یابد.

در سمت دیگر خط انتقال، جایی که مصرف‌کننده‌های نهایی قرار دارند، مجدداً از ترانسفورماتور برای کاهش ولتاژ به سطحی که برای تجهیزات مناسب باشد، استفاده می‌شود. این ترانسفورماتورها کاهشده نامیده می‌شوند. در صنایع بزرگ سعی می‌شود در سیستم توزیع داخلی تا جایی که ممکن است ولتاژ را از پست ورودی کارخانه (پست پاساژ) تا نزدیکی مصرف‌کننده بالا نگه دارند که موجب ایجاد پست‌های فرعی و کاهش تلفات توزیع در داخل کارخانه می‌شود.

۱-۲- تلفات ترانسفورمرها

نمودار درختی زیر انواع تلفات ترانسفورمرها را نمایش می‌دهد.



۳-۱- تلفات هسته و مس

الف- تلفات هسته (تلفات بی‌باری)

مقدار این تلفات در بارهای مختلف ثابت می‌باشد و رابطه آن به صورت زیر است:

$$\text{وزن هسته} = (\text{تلفات جریان گردابی} + \text{تلفات هیستریزس}) = m = \text{تلفات بی‌باری}$$

m ضریب ساختمان ترانسفورمر می‌باشد.

ب- تلفات مس (تلفات بار)

این تلفات از نوع مقاومتی بوده و با توان دوم بار متناسب است.

۴-۱- ضریب تلفات

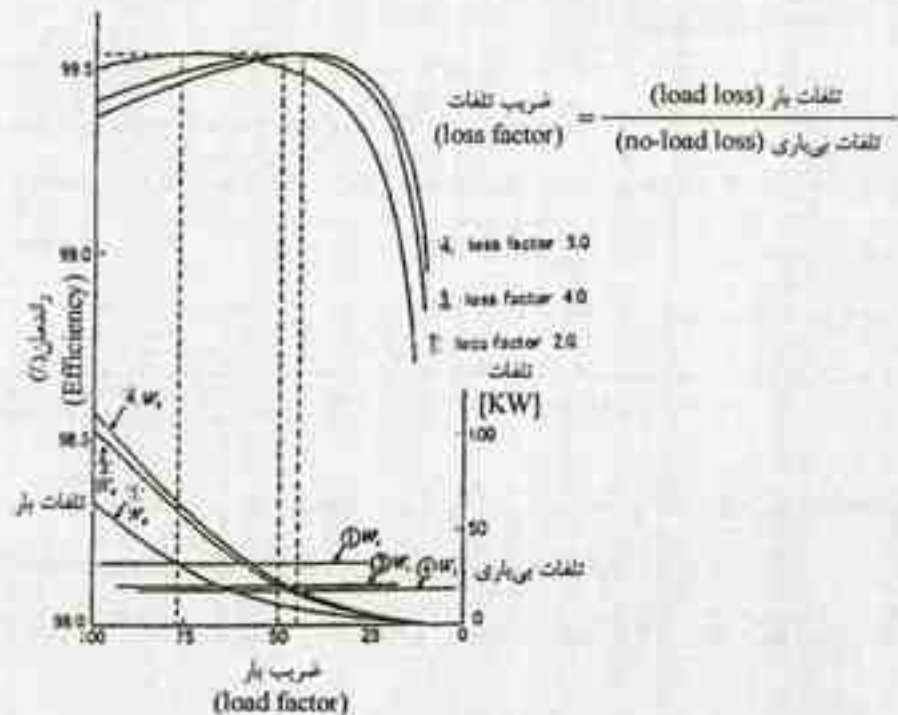
نسبت تلفات بار به تلفات بی‌باری را ضریب تلفات گویند.

$$r = \frac{\text{تلفات بار}}{\text{تلفات بی‌باری}} = \text{ضریب تلفات}$$

از آنجائی که حداکثر راندمان ترانسفورماتورها (ماتی رخ می‌دهد که تلفات بار مساوی تلفات بی‌باری باشد نتیجه می‌گیریم هر چه مقدار ضریب تلفات بزرگتر باشد حداکثر راندمان ترانسفورماتور در ضریب بار پائین‌تر رخ می‌دهد.

شکل (۱-۴) رابطه بین راندمان ترانسفورماتورهای (نوع معمولی) و تلفات بی‌باری (W_i) و تلفات بار (W_c) را برای چند ترانسفورماتور با ضریب تلفات متفاوت نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش بار، تلفات بار

افزایش یافته در صورتی که تلفات بی‌باری ثابت می‌ماند و زمانی که تلفات بار و تلفات بی‌باری با هم برابر می‌شود راندمان ترانسفورماتور به مقدار حداکثر می‌رسد.



شکل شماره ۴-۱: منحنی تغییرات راندمان تلفات بی‌باری و تلفات بار برای ۳ ترانسفورماتور با ضریب تلفات مختلف

۴-۵- راندمان ترانسفورمرها

راندمان ترانسفورمر بر اساس تلفات آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{راندمان} = \frac{\text{توان خروجی} - \text{توان تلفات}}{\text{توان خروجی}} = \frac{\text{توان خروجی} \times 100 - \text{توان تلفات}}{\text{توان خروجی} \times 100}$$

می‌توان با استفاده از روابط ریاضی ثابت نمود که حداکثر راندمان زمانی اتفاق می‌افتد که تلفات بی‌باری با تلفات بار برابر باشد.

جدول شماره ۴-۱ مشخصات ترانسفورماتورهای مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول‌ها راندمان در بار نامی و با فرض ضریب توان برابر ۱ محاسبه شده است. راندمان حداکثر از راندمان داده شده در جدول بیشتر می‌باشد و می‌توان آن را برای یک ترانسفورماتور خاص از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\eta_{\text{MAX}} (\text{راندمان حداکثر}) = \frac{P_n}{P_n - 2 \times T \times \sqrt{a}} \times 100$$

به عنوان مثال برای ترانسفورمر ۵۰۰ KVA سه فاز در جدول ترانسفورماتورها راندمان در بار نامی برای فرکانس ۵۰ HZ، ۹۸/۵۹ ذکر شده در صورتی که حداکثر راندمان آن عبارتست از:

$$f = \frac{6150}{990} = 6.21$$

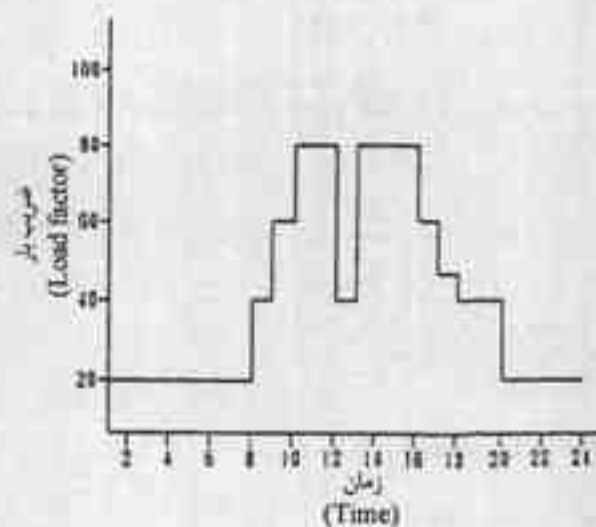
$$\eta_{MAX} = \frac{500}{500 + 2 \times 0.99 \times \sqrt{6.21}} \times 100 = 99.02$$

جدول (۴-۳) خواص ترانسفورماتورهای تک‌فاز و ۳ فاز بطور نسی نشان داده شده است. چون بار ترانسفورماتورها در طول شبانه‌روز تغییر می‌کند (بسته به منحنی بار مصرف‌کننده) برای محاسبه راندمان متوسط در بارهای مختلف در طول شبانه‌روز از راندمان شبانه‌روزی استفاده می‌شود. راندمان شبانه‌روزی ترانسفورماتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{راندمان شبانه‌روزی} = \frac{\text{انرژی الکتریکی مصرفی روزانه}}{\text{تلفات انرژی الکتریکی روزانه} + \text{انرژی الکتریکی مصرفی روزانه}}$$

مثال (۴-۱): فرض کنید منحنی مصرف شبانه‌روزی یک ترانسفورماتور با تلفات بی‌باری W_i و تلفات بارگیری W_c مطابق شکل (۴-۲) باشد. آنگاه تلفات انرژی الکتریکی شبانه‌روزی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$W = W_i \times 24 + W_c \times (0.8^2 \times 5 + 0.6^2 \times 2 + 0.5^2 \times 1 + 0.4^2 \times 4 + 0.2^2 \times 12) = W_i \times 24 + 5.05 W_c$$



شکل شماره ۴-۲: منحنی شبانه‌روزی بار یک ترانسفورماتور

جدول شماره ۴-۱: مشخصات ترانسفورماتورهای تک‌فاز و ۳ فاز برای ظرفیتهای مختلف

Characteristics of oil-filled transformers (for reference)
Efficiency: at 100% load, power factor=1

(1) 6.6 KV/ 200V class (over 750 KVA: 400V class)

Capacity (kVA)	Frequency	Single phase						3 Phases					
	No-load loss (Hz)	Load loss (W)	Eff. (%)	Oil vol. (L)	Weight (kg)	Impedance Voltage	No-load loss (W)	Load loss (W)	Eff. (%)	Oil vol. (L)	Weight (kg)	Impedance Voltage	
10	50	45	210	97.51	29	105	133~163V	—	—	—	—	—	161~193V
	60	50	180	97.75	30	100	137~167	—	—	—	—	—	143~175
20	50	80	350	97.90	38	168	138~168	120	400	97.47	45	308	137~169
	60	80	315	98.06	38	156	147~177	135	360	97.58	17	191	130~162
30	50	105	455	98.17	39	180	118~146	150	550	97.72	53	259	143~175
	60	105	440	98.22	42	168	122~152	175	490	97.83	66	265	135~167
50	50	150	710	98.31	63	250	131~161	250	810	97.92	63	370	114~146
	60	155	680	98.36	63	225	144~174	255	750	98.03	62	360	120~152
75	50	190	1100	98.31	85	345	1.9~2.8%	300	1250	97.98	125	430	2.1~3.2%
	60	200	1050	98.36	85	310	2.6~2.9	320	1200	98.01	125	400	2.3~2.4
100	50	235	1280	98.51	1.0	430	2.0~2.9	365	1650	98.02	125	500	2.2~2.3
	60	240	1230	98.55	1.0	385	2.2~2.1	385	1600	98.05	135	470	2.4~2.5
150	50	315	1720	98.66	150	620	1.9~2.8	450	2250	98.23	150	650	2.2~2.1
	60	330	1680	98.68	150	565	2.1~2.0	475	2100	98.31	145	590	2.4~2.7
200	50	380	2500	98.58	205	745	1.9~2.1	535	3000	98.26	180	750	2.6~2.7
	60	410	2420	98.60	205	680	2.2~2.3	565	2800	98.35	175	720	2.8~2.9
300	50	460	3700	98.63	245	960	2.2~2.4	700	4150	98.40	240	1090	2.7~2.8
	60	500	3500	98.68	245	880	2.5~2.7	725	4150	98.40	240	950	3.0~2.1
500	50	—	—	—	—	—	—	990	6150	98.59	380	1330	2.9~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	1080	5600	98.64	350	1420	3.2~2.4
750	50	—	—	—	—	—	—	1200	10600	98.19	—	2020	4.3~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	1405	9640	98.29	—	1900	4.5~2.8
1000	50	—	—	—	—	—	—	1500	14800	98.20	—	2470	4.5~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	1725	13480	98.31	—	2320	4.5~2.8
1500	50	—	—	—	—	—	—	2050	19700	98.25	—	3280	5.0~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	2373	17920	98.47	—	3085	5.0~2.8
2000	50	—	—	—	—	—	—	2300	27300	98.30	—	4010	6.5~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	2767	24800	98.40	—	3770	6.5~2.8
2500	50	—	—	—	—	—	—	3100	28100	98.52	—	4690	6.5~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	3618	25570	98.65	—	4410	6.5~2.8
3000	50	—	—	—	—	—	—	3400	28900	98.74	—	5330	6.5~2.0
	60	—	—	—	—	—	—	10000	25700	98.82	—	5010	6.5~2.8

Impedance voltage: voltage drop due to leakage impedance between primary/secondary coils at rated current, to be measured by short-circuiting one coil at rated current, shown in % of rated voltage

ادامه جدول ۱-۴

(2) 22KV/6.6KV 3 phases

Capacity (kVA)	Frequency (Hz)	No-load loss (kW)	Load loss (kW)	Efficiency (%)	Oil vol. (L)	Weight (kg)	Impedance Voltage (%)
1000	50	4.50	12.70	98.30	1200	4500	5.5
	60	4.80	11.00	98.44	1150	4200	5.5
1500	50	6.10	17.20	98.47	1360	5300	5.5
	60	6.50	14.80	98.60	1300	5000	5.5
2000	50	7.50	22.40	98.52	1570	6200	5.5
	60	7.90	19.50	98.65	1500	5800	5.5
2500	50	8.50	25.40	98.66	1900	7500	5.5
	60	8.90	22.10	98.77	1800	7000	5.5
3000	50	9.40	28.90	98.74	2400	10200	5.5
	60	10.00	25.70	98.82	2300	9000	5.5
4000	50	10.50	36.00	98.85	2700	13000	5.5
	60	11.00	32.00	98.94	2500	11700	5.5
4500	50	11.00	44.00	98.79	3200	13300	5.5
	60	12.00	39.00	98.88	2900	12000	5.5
5000	50	11.50	46.00	98.86	3300	15000	5.5
	60	12.40	41.00	98.94	2800	13400	5.5
6000	50	11.60	46.50	99.04	3500	15000	5.5
	60	12.40	42.00	99.10	3300	14000	5.5
7500	50	12.00	61.00	99.04	4400	18000	5.5
	60	15.50	63.50	99.09	4100	16300	5.5
10000	50	14.50	75.00	99.11	4900	22000	6.0
	60	17.00	68.00	99.16	4600	20300	6.0
12000	50	20.50	80.00	99.17	5600	24500	6.0
	60	23.50	74.50	99.19	5200	23000	6.0
15000	50	25.00	90.00	99.24	6200	30000	6.0
	60	25.00	86.00	99.19	5800	28000	6.0
20000	50	32.00	108.00	99.30	7500	35000	6.5
	60	32.00	103.00	99.33	7000	33000	6.5
25000	50	36.50	125.00	99.36	8600	40000	6.5
	60	36.50	120.00	99.38	8000	38000	6.5

ادامه جدول ۱-۴

(3) 66KV/6.6Kv 3 phases (over 30MVA: 66KV/22KV or 33KV)

Capacity (kVA)	Frequency (Hz)	No-load loss (kW)	Load loss (kW)	Efficiency (%)	Oil vol. (L)	Weight (kg)	Impedance Voltage (%)
3000	50	10.50	31.00	98.64	5000	13800	7.5
	60	11.20	27.00	98.74	4200	12300	7.5
4000	50	11.50	40.00	98.73	5100	15800	7.5
	60	12.80	33.50	98.86	4800	14400	7.5
4500	50	12.50	43.00	98.78	5300	16200	7.5
	60	13.30	37.00	98.89	5100	14800	7.5
5000	50	13.00	45.00	98.85	5200	18700	7.5
	60	14.00	42.00	98.89	5700	18200	7.5
6000	50	12.10	47.70	99.01	6200	20100	7.5
	60	13.70	43.00	99.06	6400	18800	7.5
7500	50	14.50	60.60	99.01	6500	22100	7.5
	60	17.60	54.40	99.05	6500	20900	7.5
10000	50	15.50	75.50	99.08	8700	27700	8.5
	60	18.00	71.00	99.12	8600	26300	8.5
12000	50	25.50	81.50	99.11	10200	32100	8.5
	60	25.50	77.00	99.15	9500	30000	8.5
15000	50	30.00	95.00	99.17	10700	35300	8.5
	60	30.00	90.00	99.20	10000	33000	8.5
20000	50	38.00	115.00	99.24	12800	40700	8.5
	60	38.00	109.00	99.27	12000	38000	8.5
25000	50	45.00	134.00	99.29	14500	48200	8.5
	60	45.00	127.00	99.31	13500	45000	8.5
30000	50	50.00	150.00	99.33	16100	56700	8.5
	60	50.00	142.00	99.36	15000	53000	8.5
40000	50	60.00	180.00	99.40	19900	69600	8.5
	60	60.00	171.00	99.42	18600	65000	8.5
50000	50	67.00	205.00	99.46	23500	83500	8.5
	60	67.00	194.00	99.48	22200	78000	8.5

جدول شماره ۴-۲: مشخصات ترانسفورماتورهای تک فاز و ۳ فاز

ترانسفورماتورهای تک فاز

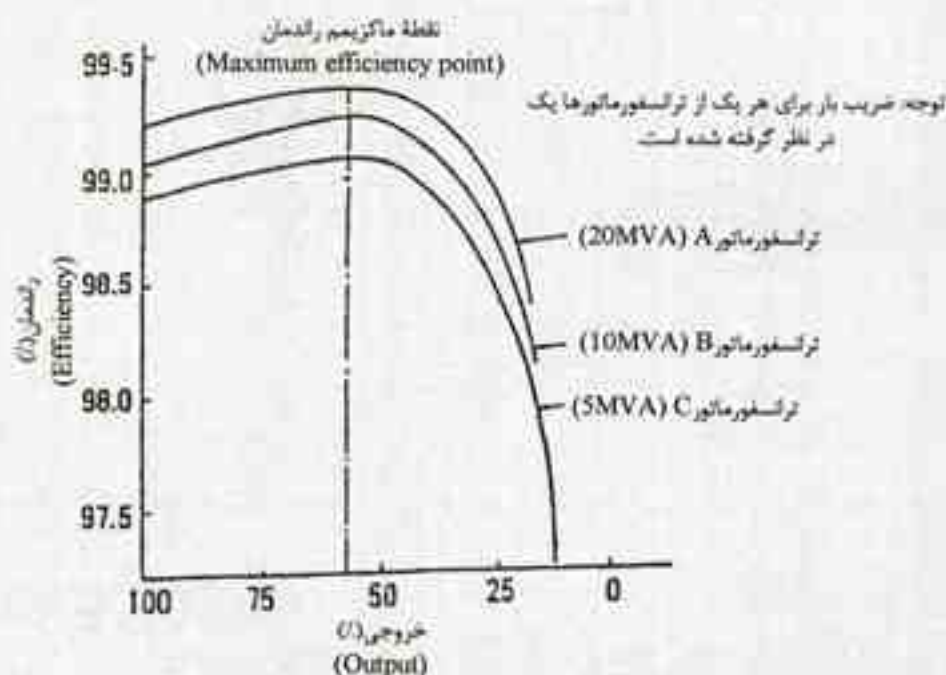
Rated capacity [kVA]	Efficiency η at rated capacity output and 80% output [%]		Voltage fluctuation γ at rated capacity output [%]		No-load current i_0 [%]	
	50[Hz]	60[Hz]	50[Hz]	60[Hz]	50[Hz]	60[Hz]
	or more	or more	or less	or less	or less	or less
(3)	95.2~	96.0~	-2.1	-2.5	-11.0	-9.0
5	96.3~	96.8~	-2.7	-2.5	-9.0	-8.0
(7.5)	96.7~	97.0~	-2.5	-2.1	-8.0	-7.0
10	96.9~	97.2~	-2.3	-2.1	-7.0	-6.0
(15)	97.2~	97.4~	-2.1	-1.9	-6.0	-5.0
20	97.4~	97.5~	-1.9	-1.8	-5.5	-5.0
30	97.6~	97.7~	-1.7	-1.6	-5.5	-5.0
50	97.7~	97.8~	-1.6	-1.6	-5.0	-5.0
75	97.8~	97.9~	-1.6	-1.6	-5.0	-5.0
100	97.9~	98.0~	-1.6	-1.6	-5.0	-5.0
150	98.0~	98.1~	-1.5	-1.5	-5.0	-5.0
200	98.1~	98.2~	-1.5	-1.5	-5.0	-5.0
300	98.2~	98.3~	-1.4	-1.4	-5.0	-5.0
500	98.3~	98.4~	-1.3	-1.3	-4.5	-4.5

ترانسفورماتورهای سه فاز

Rated capacity [kVA]	Efficiency η at rated capacity output and 80% output [%]		Voltage fluctuation γ at rated capacity output [%]		No-load current i_0 [%]	
	50[Hz]	60[Hz]	50[Hz]	60[Hz]	50[Hz]	60[Hz]
	or more	or more	or less	or less	or less	or less
(3)	94.9~	95.2	-3.0	-3.4	-13.0	-11.8
5	95.7~	96.0~	-3.0	-2.8	-11.0	-9.0
(7.5)	96.0~	96.4~	-2.8	-2.6	-9.0	-8.0
10	96.3~	96.8~	-2.6	-2.3	-9.0	-7.0
(15)	96.6~	96.9~	-2.4	-2.2	-8.0	-7.0
20	96.8~	97.1~	-2.2	-2.0	-7.0	-6.0
30	97.1~	97.3~	-2.0	-1.9	-6.0	-6.0
50	97.2~	97.4~	-1.9	-1.8	-6.0	-6.0
75	97.3~	97.5~	-1.8	-1.8	-6.0	-6.0
100	97.4~	97.6~	-1.8	-1.8	-6.0	-6.0
150	97.6~	97.7~	-1.7	-1.7	-6.0	-6.0
200	97.7~	97.8~	-1.7	-1.7	-6.0	-6.0
300	97.9~	98.0~	-1.6	-1.6	-5.5	-5.5
500	98.1~	98.2~	-1.5	-1.5	-5.0	-5.0

۶-۱- رابطه بین ظرفیت ترانسفورمرها و راندمان آنها

وقتی که ضریب تلفات ثابت باشد آنگاه، افزایش ظرفیت ترانسفورماتورها، افزایش راندمان را بدنبال خواهد داشت. شکل (۳-۴) منحنی تغییرات راندمان به ازای ضریب بار را برای ۳ ترانسفورماتور نمونه ۵ و ۱۰ و ۲۰ مگاوات آمپری نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده با افزایش ظرفیت، منحنی به سمت بالا شیفت پیدا کرده و حداکثر راندمان آن افزایش می‌یابد ولی به علت برابر بودن ضریب تلفات، نقطه حداکثر راندمان برای همه آنها در یک نقطه اتفاق می‌افتد.

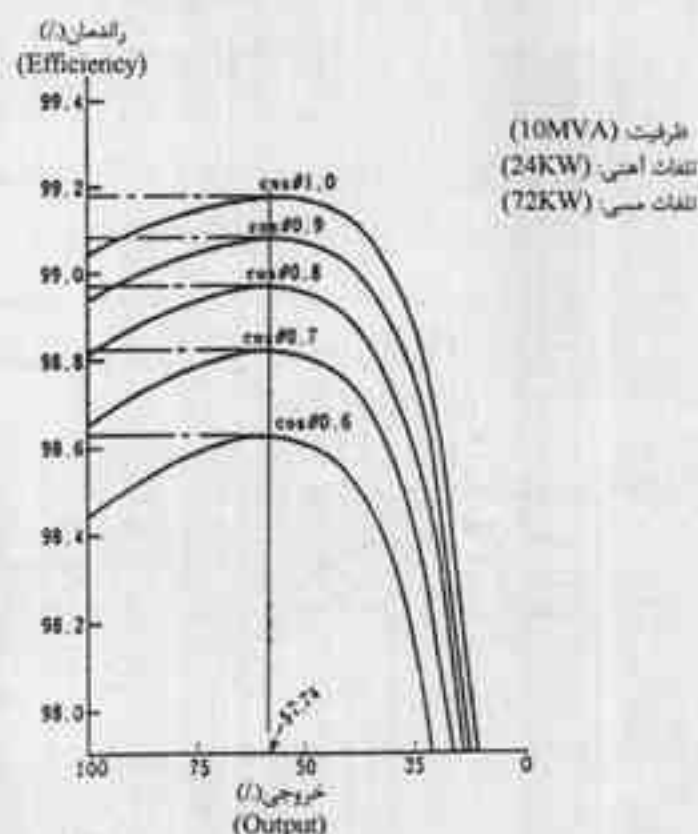


شکل شماره ۳-۴: تغییرات راندمان ترانسفورماتور برای ظرفیتهای مختلف

۷-۱- رابطه بین ضریب توان بار و راندمان ترانسفورمرها

با کاهش ضریب توان، جریان برای تأمین یک مقدار مشخص توان، افزایش می‌یابد، و افزایش جریان به معنی افزایش تلفات مس (یا تلفات بار) در ترانسفورماتورها و همچنین سیستم توزیع می‌باشد، به همین دلیل افزایش ضریب توان موجب افزایش راندمان ترانسفورماتور می‌گردد.

شکل (۴-۴) تغییرات منحنی‌های راندمان بازای تغییرات ضریب توان را برای یک ترانسفورماتور ۱۰ MVA نمایش می‌دهد.



شکل شماره ۴-۳: منحنی تغییرات راندمان یک ترانسفورماتور ۱۰ مگاوات آمپری بازاری ضریب توان‌های مختلف

۸-۱- ترانسفورماتورهای با راندمان بالا

ترانسفورماتورهای راندمان بالا به ترانسفورماتورهایی گفته می‌شود که در ساخت آنها از موادی استفاده شده که منجر به تلفات کمتر هسته و مس گشته و نتیجتاً راندمان ترانسفورماتور افزایش یافته است. قیمت این ترانسفورماتورها نسبت به نوع معمولی آن، بیشتر بوده و افزایش ۱ درصد راندمان باید بیش از ۱۰ الی ۱۵ درصد افزایش قیمت ترانسفورماتور را توجیه کند. احتمالاً در آینده با کاهش تلفات و اختلاف قیمت ترانسفورماتورهای راندمان بالا نسبت به نوع معمولی و افزایش بهای انرژی استفاده از ترانسفورماتورهای راندمان بالا توجیه پذیرتر گردد.

جدول (۳-۲) ترانسفورماتورهای معمولی و راندمان بالا را در ظرفیت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌کند.

۹-۱- تلفات مختلف با تغییر تعداد ترانسفورمورها

این کار را با طرح یک مثال انجام می‌دهیم. فرض کنید یک بار ۱۲۰ KVA را با سه ترکیب متفاوت از ترانسفورماتورها می‌خواهیم تأمین کنیم. [شکل (۵-۲)]

حالت الف: حالتی که تنها با یک ترانسفورمر ۱۵۰ KVA تأمین شود. اطلاعات ترانسفورماتورها از جداول

مربوطه قابل استخراج است. در این حالت تلفات کل عبارت است:

$$W = W_f + W_C = 0.45 + 2.25 \times 0.8^2 = 1.89 \text{ KW}$$

حالت ب: حالتی که با یک ترانسفورماتور ۵۰ و ۱۰۰ کیلوولت آمپری تغذیه شود:

$$W = W_{f1} + W_{C1} + W_{f2} + W_{C2} = (0.25 + 0.365) + (1.65 + 0.81) \times 0.82 = 2.2 \text{ KW}$$

حالت ج: حالتی که با ۳ ترانسفورماتور ۵۰ KVA تغذیه شود:

$$W = 3 W_f + 3 W_C = (3 \times 0.25) + (3 \times 0.81) \times 0.8^2 = 2.3 \text{ KW}$$

همانطور که مشاهده می‌کنید، حالت الف کمترین تلفات را در بر خواهد داشت.

۱-۱۰- کنترل ترانسفورمرها با تعداد آنها

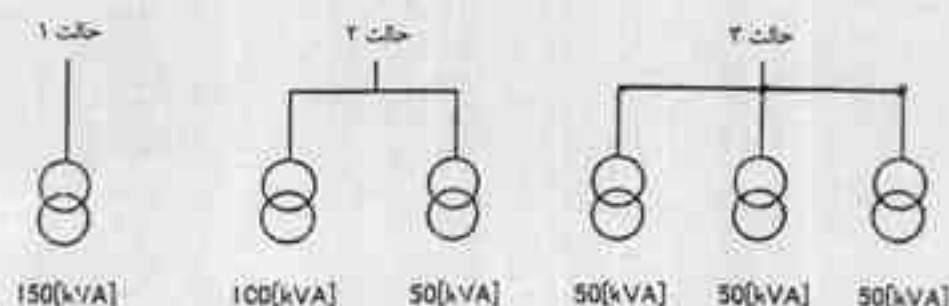
شکل (۶-۴) دو حالت را برای ایجاد یک ظرفیت ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.

شکل (۷-۴) منحنی کل تلفات را برای این دو حالت نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود این دو منحنی در یک نقطه با هم تلاقی داشته، که در آن نقطه، تلفات برای دو حالت برابر است و در طرف چپ نقطه یا بارگذاری پائین‌تر، استفاده از ۲ ترانسفورماتور با ظرفیت ۱۰۰ بهتر است و در سمت راست نقطه تلاقی یا ضریب بار بالاتر استفاده از یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۲۰۰ بهتر است. بطور مثال برای دو ضریب بار ۸۰ و ۳۰ درصد میزان تلفات عبارتند از:

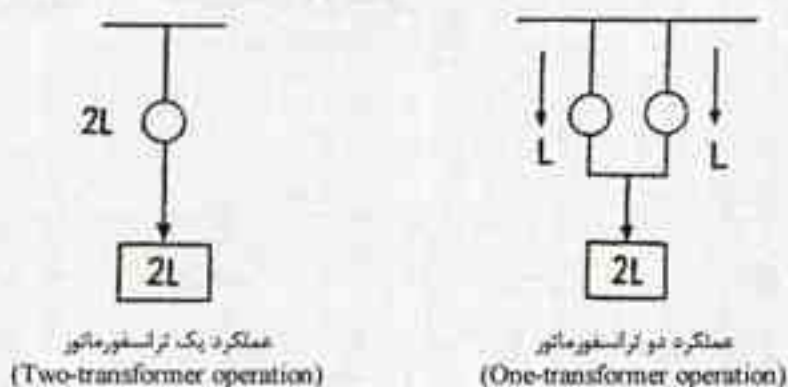
	دو ترانسفورماتور با ظرفیت ۱۰۰	دو ترانسفورماتور با ظرفیت ۲۰۰
تلفات در ۸۰ درصد ضریب بار	۵۳	۷۶
تلفات در ۳۰ درصد ضریب بار	۲۵	۲۰

جدول شماره ۳-۴: پارامترهای استاندارد برای ترانسفورماتورهای با عایق روغنی (معمولی و راندمان بالا)

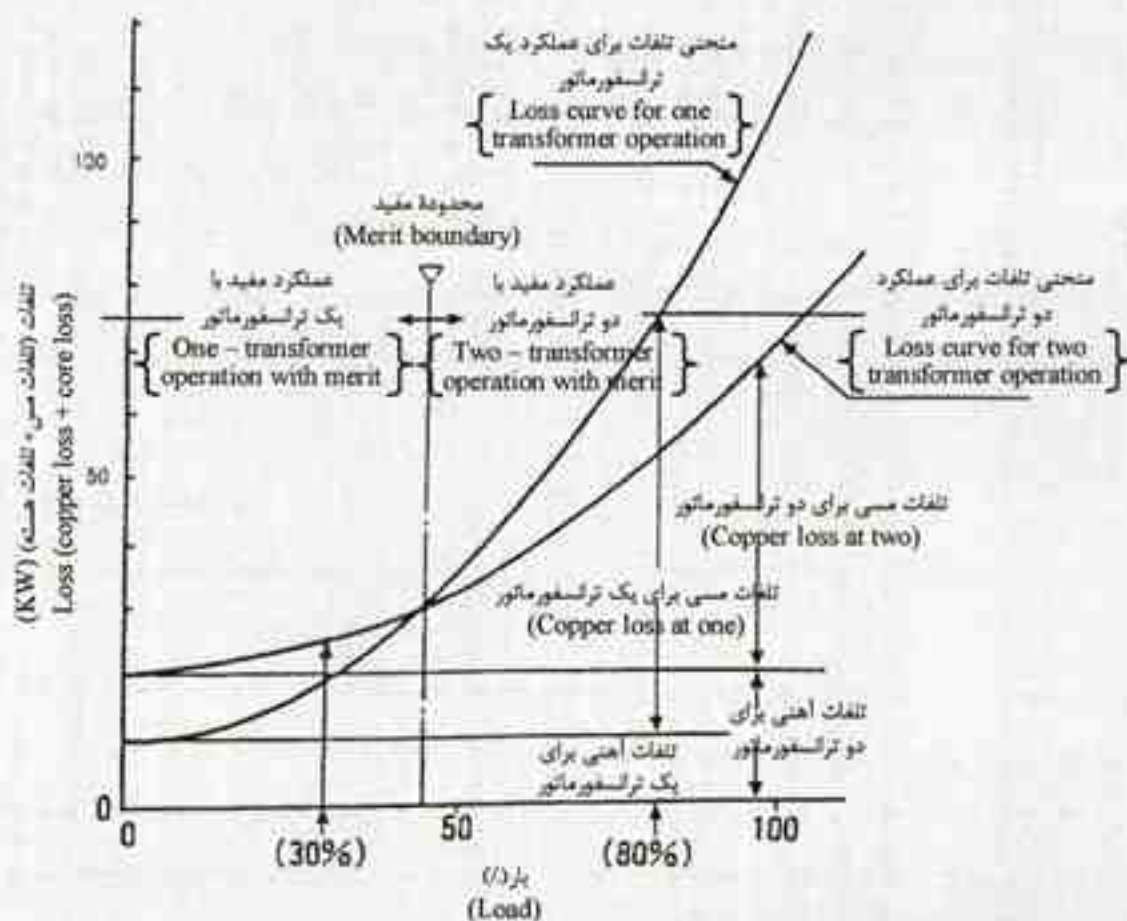
معمولی (Normal losses)					
V_{oc} (%)	جریان بی‌باری (%)	$r = P_{cu}/P_o$	تلفات بار $P_{cu}(W)$	تلفات بی‌باری $P_o(W)$	توان نامی $S_n(KVA)$
۲	۲/۵	۵/۸	۱۱۰۰	۱۹۰	۵۰
۲	۲/۵	۵/۵	۱۷۵۰	۳۲۰	۱۰۰
۲	۲/۳	۵/۱	۲۲۵۰	۴۶۰	۱۶۰
۲	۲/۱	۵/۰	۳۲۵۰	۶۵۰	۲۵۰
۲	۱/۹	۴/۹	۴۶۰۰	۹۳۰	۴۰۰
۲	۱/۸	۵/۰	۶۵۰۰	۱۳۰۰	۶۰۰
۶	۱/۵	۶/۲	۱۰۵۰۰	۱۷۰۰	۱۰۰۰
۶	۱/۳	۶/۵	۱۷۰۰۰	۲۶۰۰	۱۶۰۰
۶	۱/۲	۶/۹	۲۲۰۰۰	۳۲۰۰	۲۰۰۰
۶	۱/۱	۷/۰	۲۶۵۰۰	۳۸۰۰	۲۵۰۰
راندمان بالا (Reduced losses)					
V_{oc} (%)	جریان بی‌باری (%)	$r = P_{cu}/P_o$	تلفات بار $P_{cu}(W)$	تلفات بی‌باری $P_o(W)$	توان نامی $S_n(KVA)$
۲	۱/۹	۵/۷	۸۵۰	۱۵۰	۵۰
۲	۱/۵	۵/۴	۱۴۰۰	۲۶۰	۱۰۰
۲	۱/۳	۵/۱	۱۸۵۰	۳۶۰	۱۶۰
۲	۱/۱	۵/۰	۲۶۰۰	۵۲۰	۲۵۰
۲	۰/۹	۴/۹	۳۶۵۰	۷۴۰	۴۰۰
۲	۰/۸	۵/۰	۵۲۰۰	۱۰۴۰	۶۳۰
۶	۰/۷	۶/۹	۹۰۰۰	۱۳۰۰	۱۰۰۰
۶	۰/۵	۶/۵	۱۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۶۰۰
۶	۰/۵	۶/۷	۱۶۰۰۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰
۶	۰/۵	۷/۲	۲۱۰۰۰	۲۹۰۰	۲۵۰۰



شکل شماره ۳-۵: ۳ حالت مختلف برای تأمین یک ظرفیت مشخص با ترانسفورماتورهای مختلف



شکل شماره ۴-۶: دو ترکیب مختلف از ترانسفورماتورها برای تأمین یک ظرفیت مشخص



شکل شماره ۴-۷: محدوده مفید برای عملکرد ۱ و ۲ ترانسفورماتور [حالت‌های شکل (۴-۶)]

۲- بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های روشنایی

۲-۱- مقدمه

زمانی انسان برای مطالعه کتاب از نور یک شمع استفاده می‌کرد اما امروزه با پیشرفت فناوری و فراهم آوردن منابع مختلف روشنایی، نوری که برای این فعالیت استفاده می‌شود شاید چند صد برابر شده باشد. این روند همچنان با پیشرفت فناوری و اتوماسیون ادامه دارد. بعنوان مثال، مصرف برق در ساختمانهای اداری اروپا از ۵۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال به مقدار ۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع افزایش یافته است و یا در آمریکا رشد سالانه مصرف انرژی در دو دهه اخیر بطور متوسط رشد سالانه ۴ درصد بوده در صورتی که رشد مصرف الکتریسیته تقریباً دو برابر یعنی حدود ۷ درصد بوده است، و در همین کشور حدود ۱۷ درصد الکتریسیته فروخته شده جهت روشنایی بوده است.

در ساختمان‌های اداری و تجاری بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از کل مصرف، مربوط به روشنایی می‌باشد. در بقیه ساختمان‌ها ۱۰ درصد و یا کمتر و در صنایع نیز مصرف روشنایی بطور معمول، درصد کمی از کل مصرف را تشکیل می‌دهد ولی بطور مطلق مقدار قابل توجهی را در بر دارد.

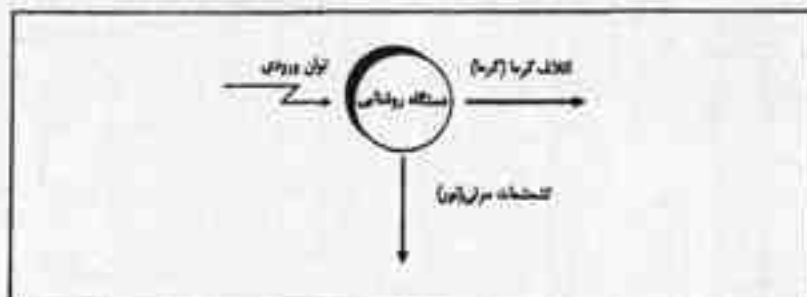
سیستم روشنایی در یک ساختمان نه تنها یک مصرف کننده عمده انرژی است بلکه مهم‌ترین سهم در تولید بار حرارتی داخل ساختمان را دارد بنابراین بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش روشنایی به دو صورت مستقیم و یا غیر مستقیم بر مصرف برق ساختمان مؤثر است. مستقیم به علت کاهش بار مصرف سیستم روشنایی و غیرمستقیم به علت کاهش بار سیستم تهویه مطبوع به همین علت بهینه‌سازی در این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲-۲- چگونگی تولید نور

زمانیکه یک الکترون در مداریک اتم از یک سطح انرژی در حال گردش با دریافت انرژی به سطح بالاتر برود در برگشت به سطح قبلی، این انرژی را بصورت یک فوتون ساطع می‌کند و این فرایند، اساس کار انواع منابع نور می‌باشد. بطور خلاصه، برای ساخت یک منبع نور، ما باید تعداد زیادی الکترون در یک محل داشته باشیم و آنها را برای رفتن به سطح انرژی بالاتر تحریک کنیم، و اجازه دهیم به سطح انرژی قبلی (پایین‌تر) برگردند.

در صورتی که طول موج فوتون در یک محدوده خاص باشد، چشم انسان توانایی دیدن آن را دارد. یک منبع نور خوب، تعداد زیادی فوتون را در این محدوده ساطع می‌کند. مانند لامپ سدیم کم فشار. بعضی از منابع نور، تنها کسری جزئی از فوتون‌های ساطع شده در محدوده بینایی است مانند لامپ‌های رشته‌ای.

شکل (۲-۸) ورودی و خروجی انرژی به یک منبع نور را نمایش می‌دهد.



شکل شماره ۴-۸: تولید نور مرئی در یک دستگاه روشنایی

۲-۳- تعریف

الف- نور خروجی لامپ

میزان شار نوری خروجی از یک منبع نورانی را با واحدی بنام لومن^۱ بیان می‌کنند. کل شاری که از یک کوره شفاف که منبع نور را احاطه کرده عبور می‌کند با لومن اندازه‌گیری می‌شود. لومن نرخ جریان انرژی را نمایش می‌دهد. در نتیجه یک واحد انرژی است نظیر وات یا اسب بخار.

لامپ‌هایی که برای مصارف داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند بطور نوعی از ۵۰ تا ۱۰۰۰۰ لومن می‌باشند. لومن برای سفارش لامپ‌ها، مقایسه آنها، و محاسبه راندمان انرژی (که بر حسب لومن بر وات بیان می‌شود) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

باید توجه داشت که لومن اطلاعاتی راجع به پخش نور لامپ نمی‌دهد و ممکن است سهم بزرگی از روشنایی خروجی یک لامپ بدلیل اینکه به جهت اشتباه می‌رود بلا استفاده بماند.

ب- شدت نور

میزان توان نوری که به واحد سطح می‌رسد شدت نور نامیده می‌شود و با واحد لوکس^۲ یا فوت کندل^۳ بیان می‌شود. لوکس، لومن بر متر مربع و فوت کندل، لومن بر فوت مربع می‌باشد. (یک فوت کندل برابر ۱۰/۷۶ لوکس می‌باشد) روشنایی داخلی در محدوده ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ لوکس و متوسط روشنایی خورشید در فضای خارج حدود ۵۰۰۰۰ لوکس می‌باشد.

ج- بازده

بازده قسمتی از توان ورودی منبع نور که به نور مرئی تبدیل می‌شود را مشخص می‌کند و به درصد (بدون واحد)

1. Lumen

2. Lux

3. Foot candela

بیان می‌شود و برای قسمتی از سیستم روشنایی یا کل سیستم روشنایی تعریف می‌شود.

د- بهره‌وری

بهره‌وری رابطه نور خروجی منبع نور را با توان مصرفی آن بیان می‌کند و می‌توان آن را برای کل یا قسمتی از سیستم روشنایی تعریف نمود و واحد آن لومن بر وات (lm/w) می‌باشد.

ه- چگالی توان روشنایی

چگالی توان روشنایی، توان بکار رفته برای سیستم روشنایی در واحد سطح می‌باشد که واحد آن وات بر متر مربع (W/m^2) بوده و بعنوان یک معیار جهت ارزیابی هر نقشه جانمایی روشنایی استفاده شده و عامل مهمی در مطالعات گرمادهی و سرمادهی ساختمانها نیز محسوب می‌شود.

و- تظاهر رنگ

تظاهر رنگ در کمیت بین‌المللی روشنایی^۱ بصورت تغییر رنگ یک سطح هنگامیکه منبع نور مرجع، جایگزین منبع نور مورد آزمایش شود، تعریف شده است. این شاخص برای اجسام سیاه برابر با ۱۰۰ و درحالیکه برای لامپ فلورسنت با نور سفید گرم حدود ۵۰ است.

ز- دمای رنگ منبع نور

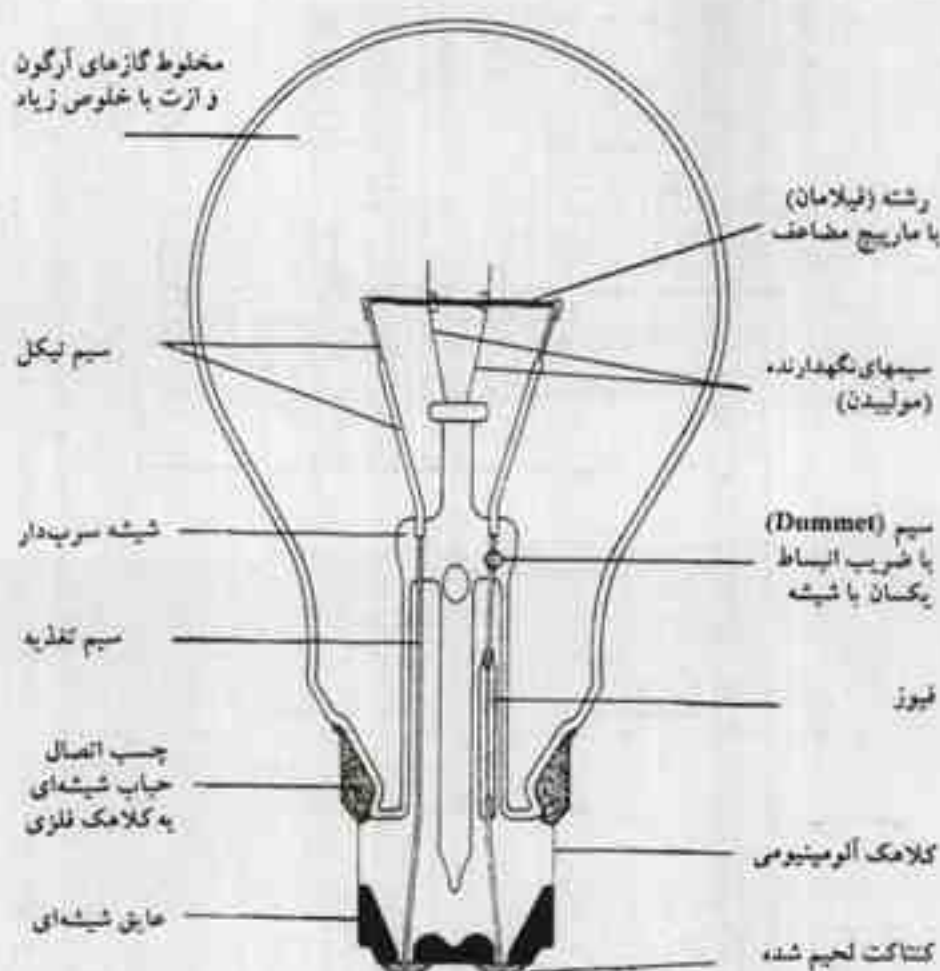
دمای رنگ، بر اساس رنگ تابیده شده از جسمی سیاه در دمای معین تعریف شده است و برحسب درجه کلوین (K) بیان می‌شود. دمای رنگ بیشتر از چهار هزار درجه کلوین به عنوان نور سرد و دمای رنگ پائین‌تر از سه هزار درجه کلوین به عنوان نور گرم در نظر گرفته می‌شود لامپ‌التهایی معمولی دمای رنگی حدود ۲۷۰۰ درجه کلوین دارد.

۲-۴- انواع منابع روشنایی (لامپ)

منابع مختلف برای تأمین نور مصنوعی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو دسته کلی‌التهایی و تخلیه‌ای تقسیم نمود البته دسته سومی هم برای تأمین روشنایی وجود دارد که کاربرد عمومی ندارد و آن روشنایی بوسیله نیمه هادی‌های نوری^۲ (LED) می‌باشد که از بحث در مورد آن صرف نظر شده است.

شکل (۴-۹) دسته‌بندی منابع مختلف روشنایی را نشان می‌دهد.

1. International commission on Illumination
2. LED: Light Emitted Diode



شکل شماره ۴-۱۰: اجزاء مختلف یک لامپ ال‌ئی‌دی

هر منبع نور، خواصی برای الگوی شکل موج تولیدی دارد که اسپکتروم نامیده می‌شود. اسپکتروم یک لامپ رشته‌ای نوعی مطابق شکل (۴-۱۱) می‌باشد که نور مرئی تنها قسمت کوچکی از پائین نمودار نافوسی را تشکیل می‌دهد که نشان دهنده راندمان پائین لامپ‌های ال‌ئی‌دی است. هر چه دمای رشته ملتهب بالاتر برود قسمت بیشتری از این نمودار در محدوده نور مرئی قرار گرفته ولی این باعث کاهش طول عمر لامپ می‌شود. شکل (۴-۱۲) اسپکتروم نور خورشید در زمان ظهر و یک لامپ ال‌ئی‌دی را نشان می‌دهد.

نظائر رنگ لامپ‌های ال‌ئی‌دی خوب بوده و در حدود ۱۰۰ می‌باشد و علت آن پیوستگی اسپکتروم آن می‌باشد نه به علت توزیع خوب آن.

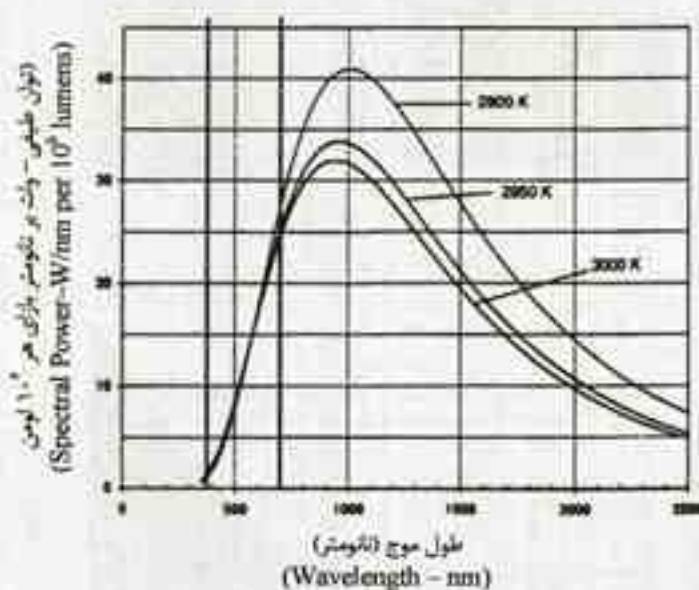
شکل (۴-۱۳) تغییرات مشخصات لامپ با تغییرات ولتاژ را نشان می‌دهد.

یکی از راههای بالا بردن راندمان لامپ‌های رشته‌ای پر کردن حباب با گازهای سنگین است که از تبخیر فیلامان جلوگیری می‌کند. بهترین گاز جهت این کار کریپتون می‌باشد که به علت گرانی تنها برای لامپ‌های

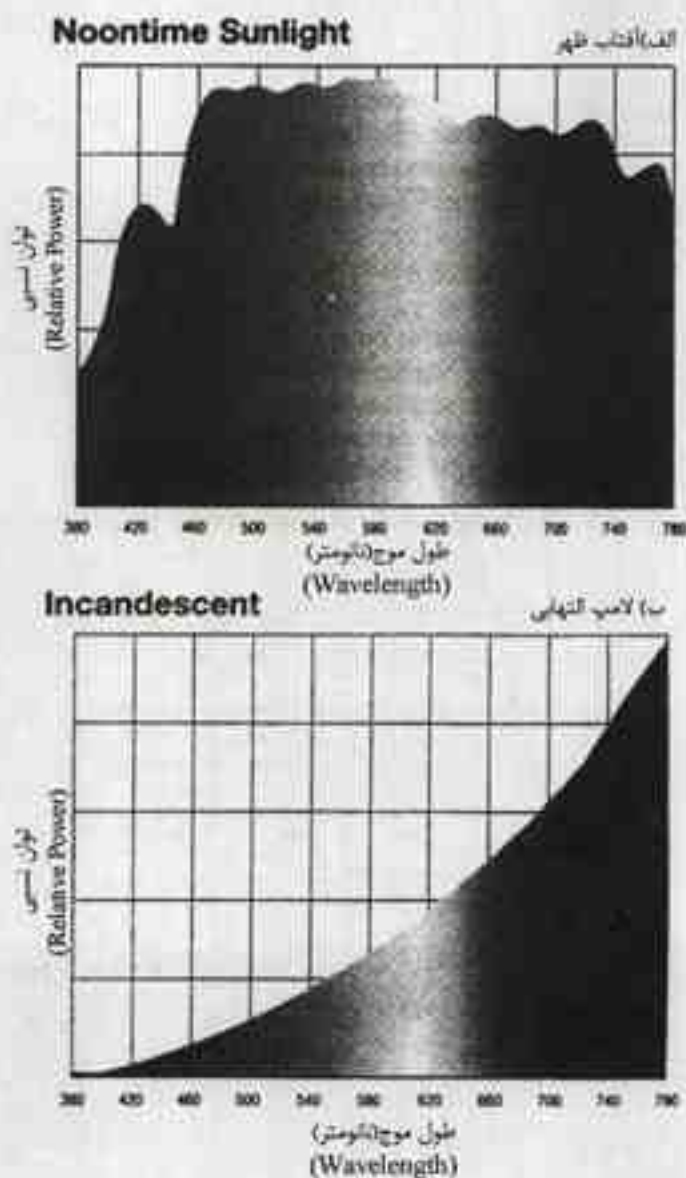
هالوژن به علت حباب کوچک مناسب می‌باشد [شکل (۴-۱۲)] این کار موجب افزایش راندمان بین ۵ تا ۱۵ درصد می‌شود.

لامپ‌های هالوژن تنگستن نیز که با گازهای خانوادگی هالوژن پر شده‌اند از راندمان و طول عمر طولانی‌تری برخوردارند.

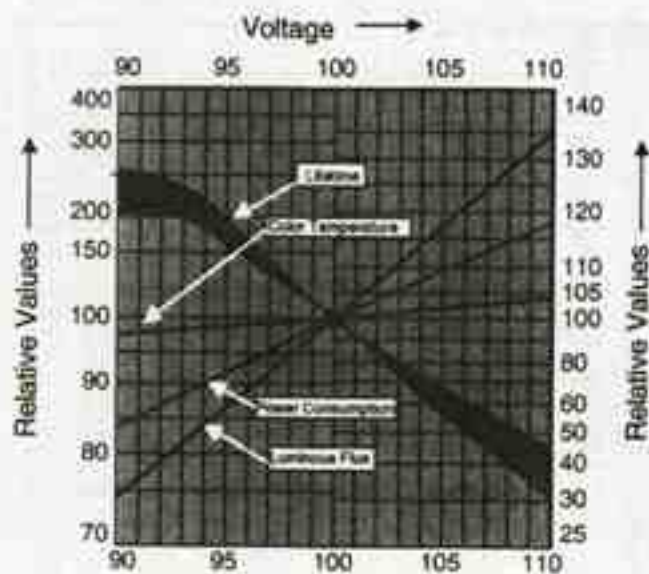
در شکل (۴-۱۵) کاهش نور خروجی لامپ انتهایی معمولی و هالوژن تنگستن آمده است.



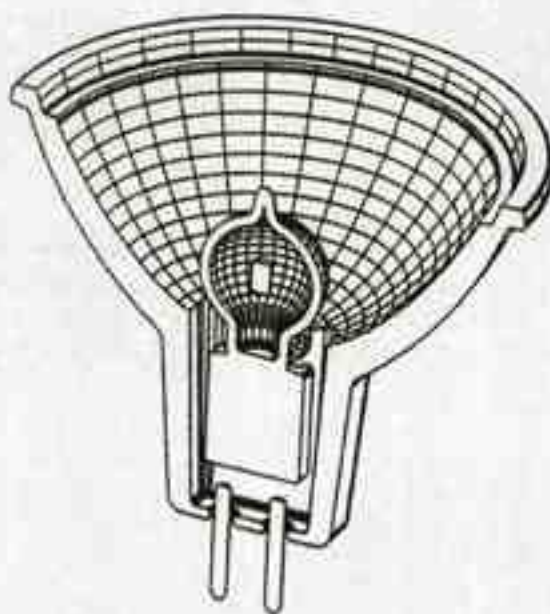
شکل شماره ۴-۱۱: توزیع طول موج نور تولیدی (اسپکتروم) یک لامپ انتهایی



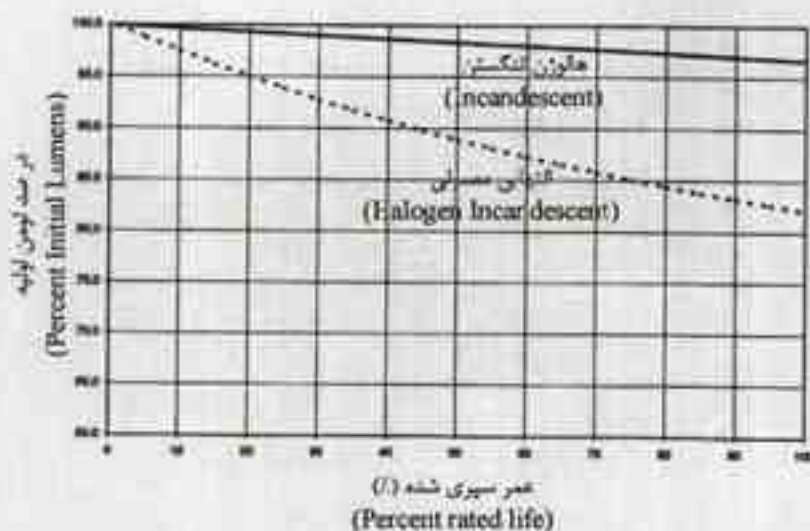
شکل شماره ۴-۱۲: مقایسه توزیع طول موج (اسپکترم) یک لامپ‌های با آفتاب ظهر



شکل شماره ۴-۱۳: منحنی‌های تغییرات مشخصات لامپ‌های تهویه مطبوع و توان



شکل شماره ۴-۱۴: یک لامپ هالوژن با انعکاس دهنده

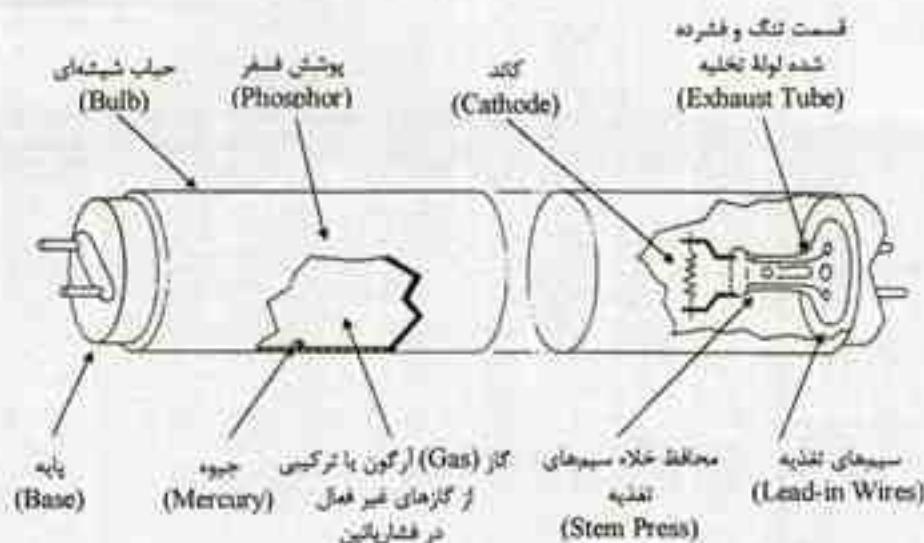


شکل شماره ۴-۱۵: مقایسه افت نور یک لامپ انتهایی معمولی با لامپ هالوژن تنگستن

ب- لامپ فلورسنت

لامپ فلورسنت یک لوله شیشه‌ای با الکتروود در هر انتهای آن می‌باشد داخل لوله از یک یا چند ماده فسفری پوشانده شده است. بخار جیوه با فشار خیلی پائین همراه با یک یا چند گاز اصلاح کننده پر شده است. شکل (۴-۱۶) لامپ‌های فلورسنت متعارف را نشان می‌دهد.

برای ایجاد نور، نیاز به قوس الکتریکی است که بوسیله گاز یا بخاری که بار الکتریکی دارند صورت می‌پذیرد. ابتدا الکترون از الکتروودها جدا شده و در میدان برق بین دو الکتروود شروع به حرکت می‌کنند یا برخورد الکترون‌ها به اتم‌های جیوه، الکترون از جیوه کنده شده تولید یون می‌نماید. یونها و الکترون‌ها خلاف جهت یک دیگر حرکت نموده و قوس الکتریکی را بین دو الکتروود برقرار می‌نمایند.

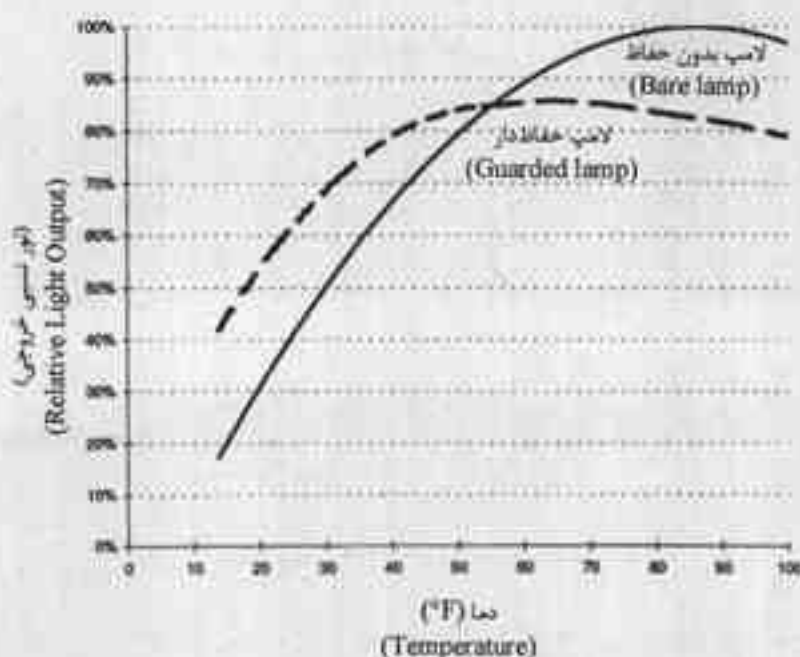


شکل شماره ۴-۱۶: اجزاء یک لامپ فلورسنت

جریان باید مهار شود زیرا در صورت زیاد شدن الکترون‌ها ضربه‌های پیاپی به اتم جیوه وارد کرده و باعث تحریک الکترون‌ها به مدارهای بالاتر انرژی شده و موجب می‌شود که نور با طول موج‌های بالاتر تولید کنند که بلااستفاده می‌باشد. همچنین عمل جدا شدن الکترون‌های اولیه از الکترودها به وسیله ایجاد ولتاژ بالا بین الکترودها با گرم کردن الکترودها انجام می‌شود.

لامپ‌های مهنایی جدید با استفاده از چند نوع فسفر موفق به بالا بردن راندمان از حدود ۷۵ به ۹۰ لومن پروات شده‌اند و تظاهر رنگ آنها نیز بهبود یافته و افت نور آن در مقابل طول عمر آن از ۲۰ درصد به ۷ درصد کاهش یافته است.

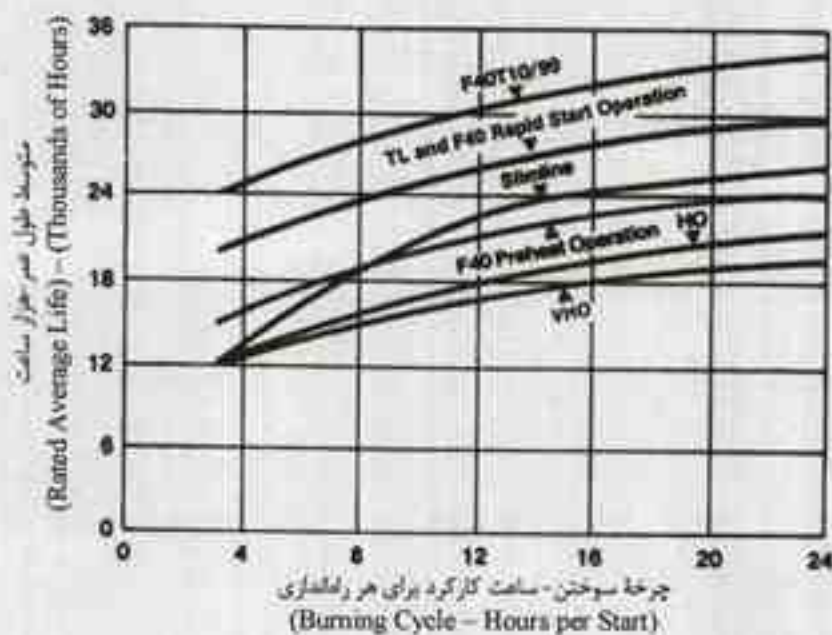
لامپ‌های فلورسنت بر خلاف لامپ‌های تنهایی و تخلیه‌ای فشار بالا، به درجه حرارت محیط حساسند و باید دما در حدود 20°C باشد. شکل (۴-۱۷) تغییرات راندمان را با درجه حرارت محیط برای لامپ‌های فلورسنت نشان می‌دهد.



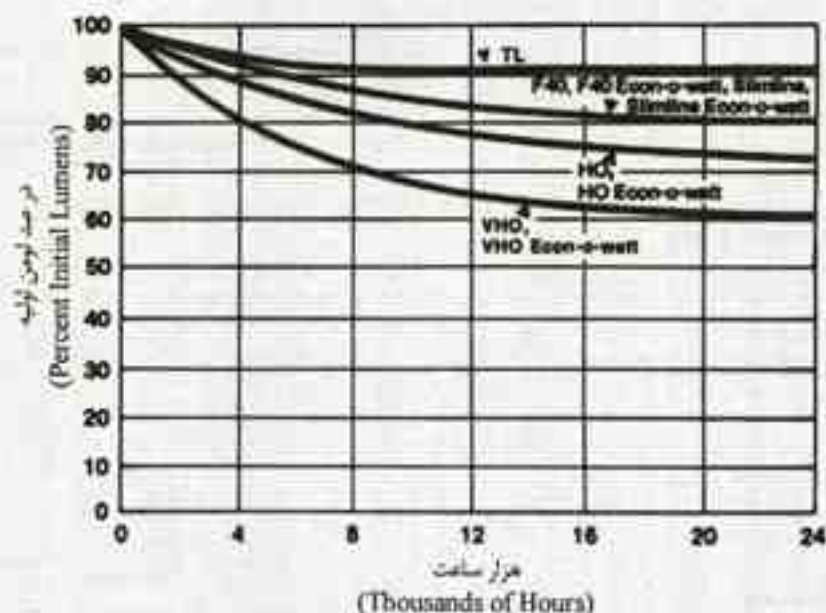
شکل شماره ۱۷-۴: تغییرات نور خروجی لامپ فلورست در دو حالت

لامپ‌های فلورست در جریان‌های بالا طول عمر کوتاه‌تری دارند به همین دلیل زمان روشن بودن به ازای هر کلید زدن یک عامل مهم است که در شکل (۱۸-۲) آمده است و سازندگان معمولاً برای زیر ۳ ساعت عددی ارائه نمی‌دهند.

شکل (۱۹-۲) تغییرات نور خروجی برای انواع فلورست را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۱۸-۴: تغییرات طول عمر فلورست‌های مختلف برای ساعت کارکرد برای هر بار راه‌اندازی



شکل شماره ۴-۱۹: افت نور انواع فلورسنت در طول عمر آنها

ج- لامپ‌های فلورسنت فشرده

با پیشرفت فناوری، امکان تولید لامپ‌های فلورسنت فشرده در دهه ۱۹۷۰ بوجود آمد و امکان رقابت لامپ‌های فلورسنت با لامپ‌های انتهایی از نظر فشرده بودن مهیا شد. امروزه دو نوع لامپ مهتایی فشرده در بازار وجود دارند:

- ♦ لامپ‌های مهتایی فشرده یکپارچه با بالاست^۱ که امکان نصب در سرپیچ لامپ‌های انتهایی را دارند
- ♦ لامپ‌های مهتایی که لوله آنها جدا بوده و با یک آداپتور^۲ که حاوی بالاست است به سرپیچ لامپ انتهایی متصل می‌شود.

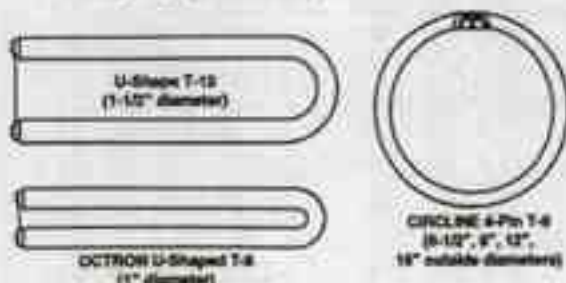
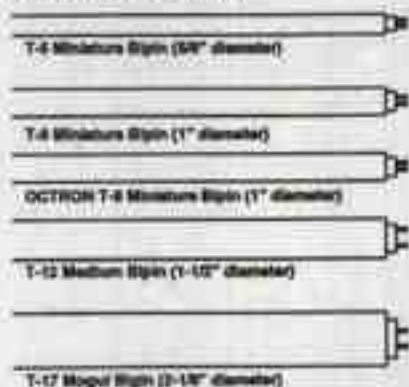
شکل (۴-۲۰) انواع فلورسنت و فلورسنت فشرده را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۲) لامپ‌های فلورسنت فشرده را با لامپ انتهایی مقایسه می‌کند.

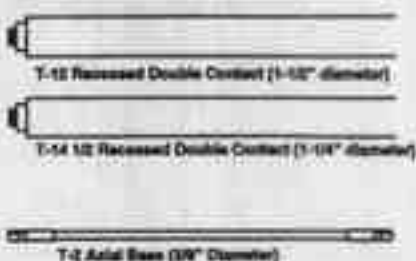
1. Ballast
2. Adapter

FLUORESCENTS:

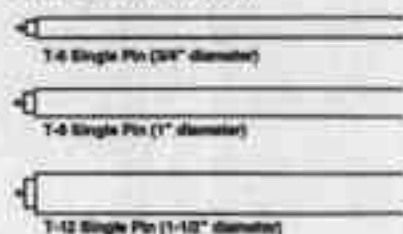
PREHEAT, RAPID START



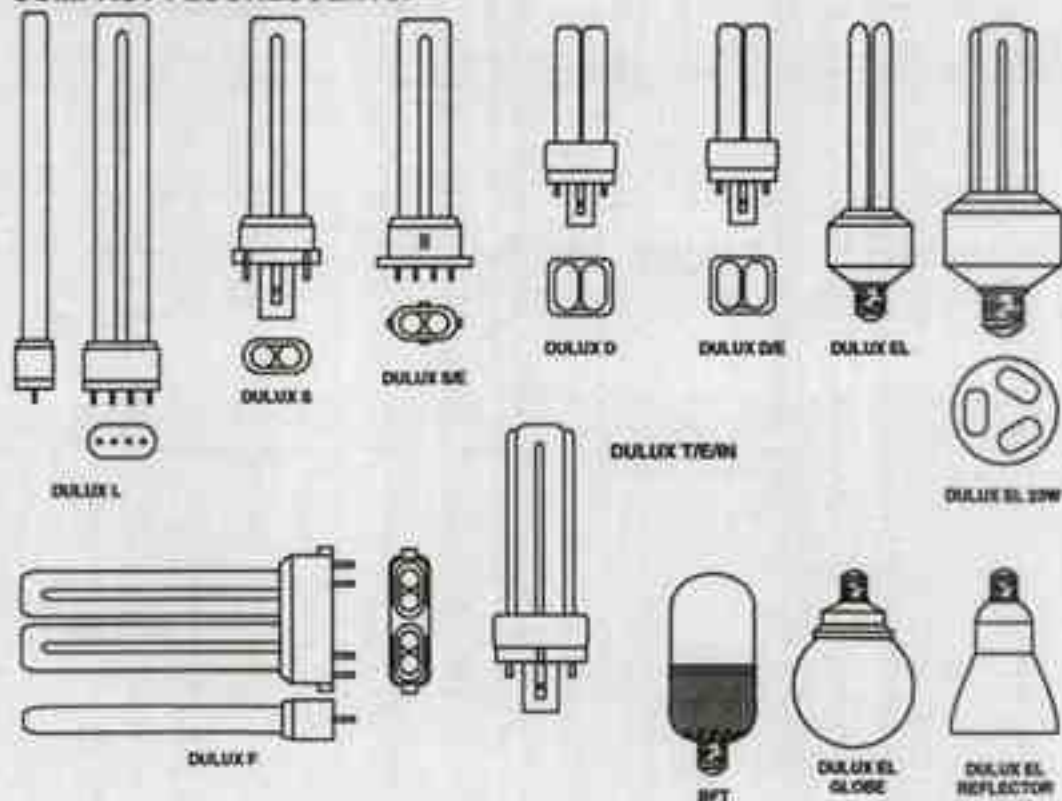
HIGH OUTPUT AND VERY HIGH OUTPUT



SLIMLINE INSTANT START



COMPACT FLUORESCENTS:



شکل شماره ۴-۲۰: انواع مختلف لامپ‌های فلورسنت و فلورسنت فشرده

جدول شماره ۴-۴: مقایسه بین لامپ‌های تنگستن-آرگون عادی و لامپ‌های فلورسنت فشرده با بالاست‌های فرکانس بالا و معمولی

انواع لامپها	توان (W)	فلوی روشنایی (lm)	شاخص تظاهر رنگ (Ra)	بهره‌وری Lm/W
لامپ‌های تنهایی معمولی	۴۰	۲۳۰	۹۹	۱۱
	۶۰	۷۳۰	۹۹	۱۲
	۷۵	۹۶۰	۹۹	۱۳
	۱۰۰	۱۳۸۰	۹۹	۱۴
لامپ فلورسنت فشرده با بالاست معمولی (۱)	۹	۴۱۵	۸۲	۴۶
	۱۳	۶۲۰	۸۲	۴۸
	۱۸	۸۲۵	۸۲	۴۶
	۲۵	۱۰۸۵	۸۲	۴۳
لامپ فلورسنت فشرده با بالاست الکترونیکی (۲)	۷	۴۰	۸۵ - ۹۰	۵۷
	۱۱	۶۰۰	۸۵ - ۹۰	۵۵
	۱۵	۹۰۰	۸۵ - ۹۰	۶۰
	۲۰	۱۲۰۰	۸۵ - ۹۰	۶۰

(۱) - کاتالوگ محصولات روشنایی فیلیپس، ۱۹۹۰
(۲) - کاتالوگ محصولات اسرام، ۱۹۹۰

د- لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا

لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا^۱ (HID) به ۳ دسته عمده تقسیم می‌شوند:

♦ لامپ‌های بخار جیوه با علامت اختصاری^۲ (MV)

♦ لامپ‌های متال هالاید^۳ (MH)

♦ لامپ‌های سدیم فشار بالا^۴ (HPS)

در این دسته از لامپ‌ها، راندمان و ظاهر رنگ بسیار متفاوتی داریم. داشتن علت این تفاوت‌ها جهت انتخاب لوازم جانبی الزامی است. این لامپ‌ها همانند فلورسنت به همراه بالاست بکار برده می‌شوند. لامپ‌های سدیم فشار پائین^۵ (LPS) خواصی مشابه لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا دارند و معمولاً هر دو محصول بوسیله کارخانه‌های سازنده تولید شده و در یک دسته‌بندی قرار می‌گیرند.

1. HID: High intensity Discharge
2. MV: Mercury Vapor
3. MH: Metal Halide
4. HPS: High-Pressure Sodium
5. LPS: Low Pressure Sodium

۵- لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا چگونه کار می‌کنند؟

این لامپ‌ها همانند لامپ‌های فلورسنت، از تحریک بخار فلزات به عنوان منبع اصلی نور استفاده می‌کنند. اما علی‌رغم تشابه، تفاوت‌هایی هم وجود دارد که یکی از آنها فشار گاز داخل لوله می‌باشد که در لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا چند هزار برابر فشار گاز داخل لامپ فلورسنت است. فوس الکتریکی و جریان بالا موجب افزایش دما و فشار گاز در یک لوله کوچک شده و نور بسیار قوی تولید می‌کند. برخلاف لامپ‌های فلورسنت که به علت سطح بزرگشان قدرت نورشان کم است. محدوده منبع نور به قدری کوچک است که می‌تواند در چراغ‌های متمرکز کننده مانند لامپ‌های انتهایی قرار گیرند. شکل (۲۱-۲) شکل‌های چهار نوع لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا و سدیم کم فشار را نشان می‌دهد.

شکل (۲۲-۲) اسپکتروم طول موج‌های لامپ‌های جیوه‌ای شفاف، متال هالاید شفاف و سدیم پر فشار را نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل (۲۲-۲) مشخص است لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا دارای گسترده‌گی طیف بیشتری نسبت به لامپ سدیم فشار پائین می‌باشند. در صورتی که راندمان نوری آنها پائین‌تر می‌باشد. جدول (۲-۵) محدوده راندمان نوری لامپ‌های تخلیه‌ای را نشان می‌دهد.

شکل (۲۳-۲) کاهش نور لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا را در طول عمرشان نشان می‌دهد.

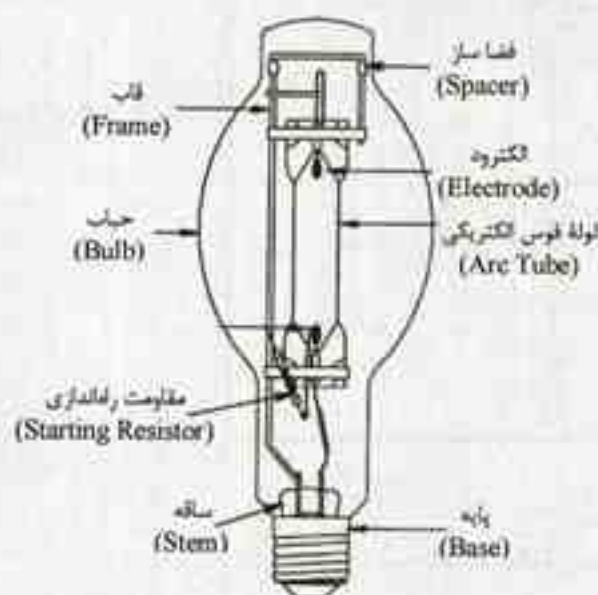
بعضی از لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا نسبت به وضعیت نصب حساسند. شکل (۲۴-۲) تغییر نور یک نوع لامپ متال هالاید را با تغییر زاویه محور آن نسبت به خط عمود نشان می‌دهد.

جدول (۲-۶) بهره نوری انواع لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا را در توان‌های مختلف نشان می‌دهد.

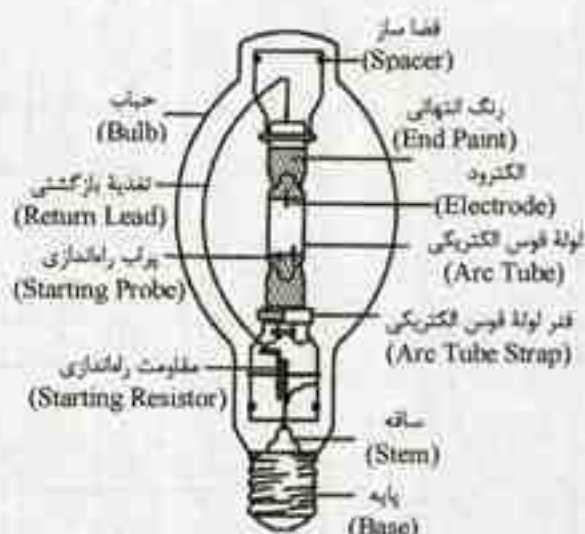
جدول (۲-۷) تلفات بالاست‌های مغناطیسی بر حسب درصدی از مصرف لامپ را نشان می‌دهد.

۵-۲- مقایسه خواص منابع نور مختلف

در جدول (۲-۸)، منابع نور مختلف، با هم مقایسه شده است.

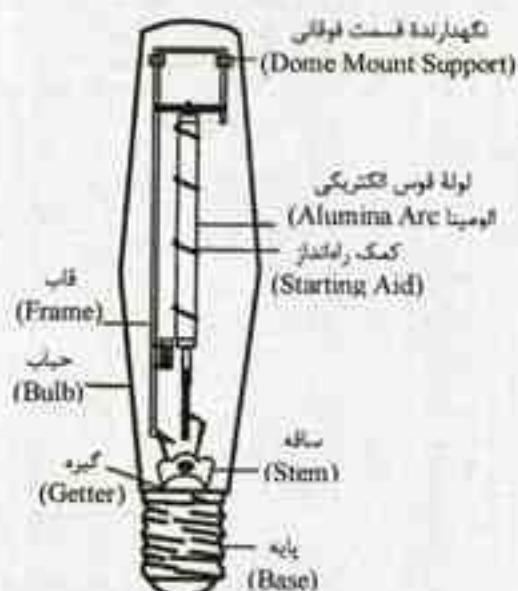


لامپ بخار جیوه
(Mercury Vapor Lamp)

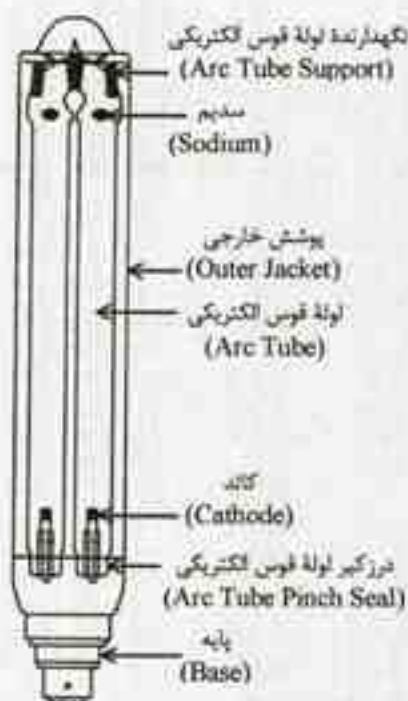


لامپ متال هالید
(Metal Halide Lamp)

تغذیه لوله قوس الکتریکی

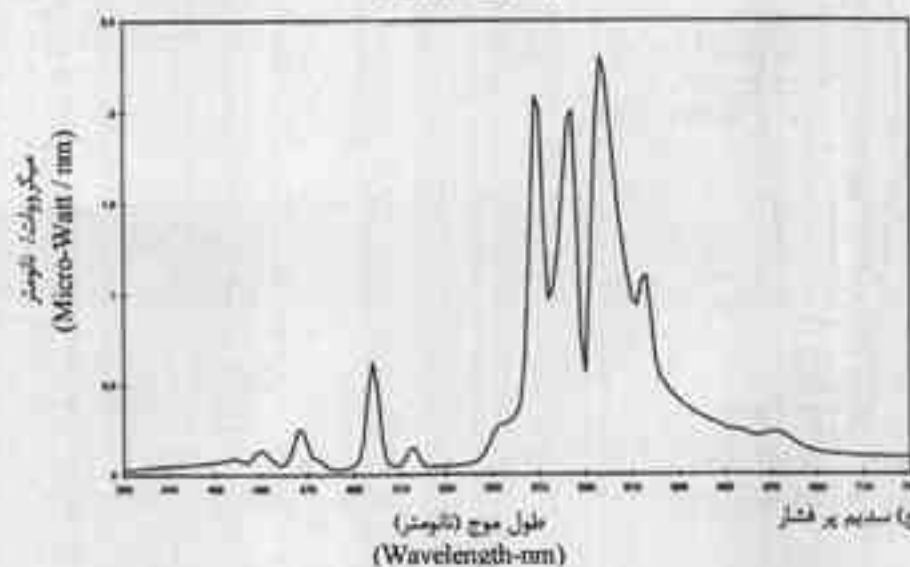
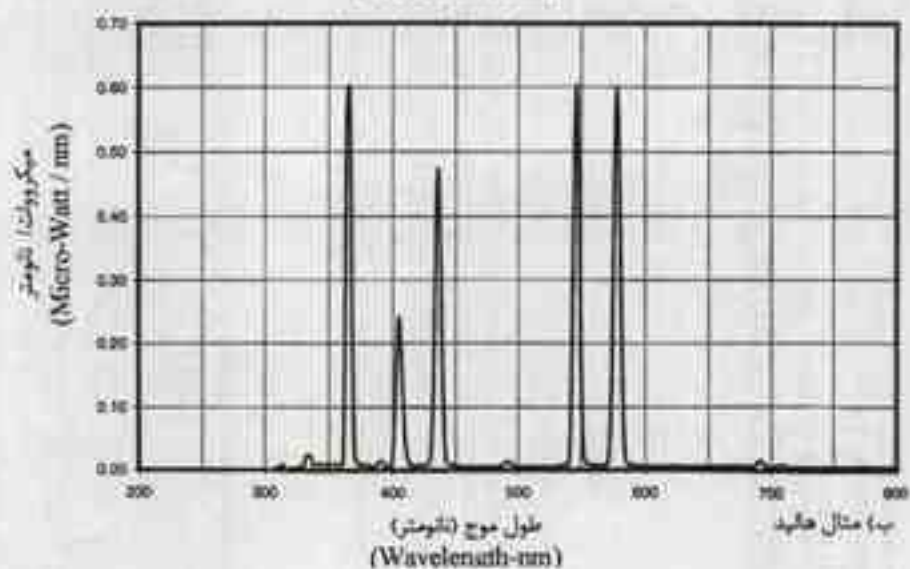
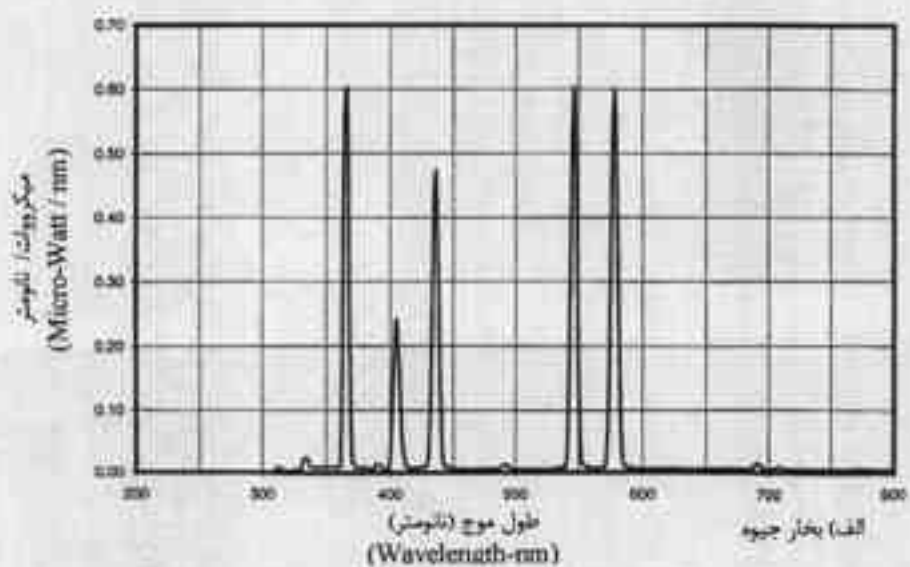


لامپ سدیم پر فشار
(High-pressure Sodium Lamp)

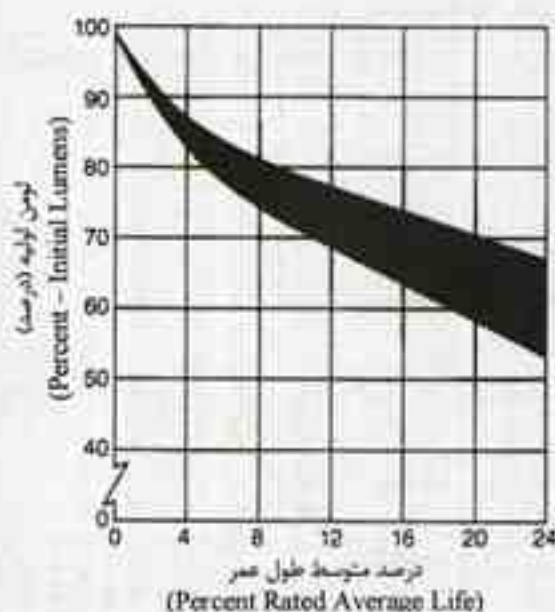


لامپ سدیم کم فشار
(Low-pressure Sodium Lamp)

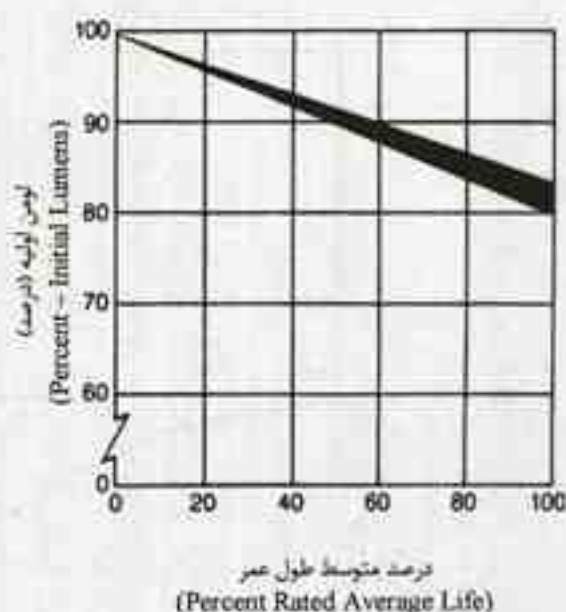
شکل شماره ۴-۴۱: نوع لامپ تخلیه‌ای



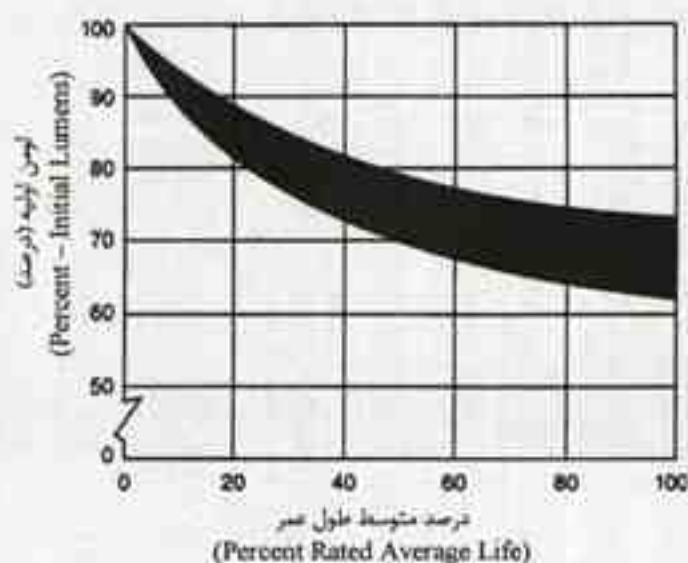
شکل شماره ۴-۲۲: توزیع طول موج تولیدی (اسپکتروم) انواع لامپ‌های التهابی



ب) کاهش نور لامپ بخار جیوه



الف) کاهش نور لامپ پر فشار سدیم

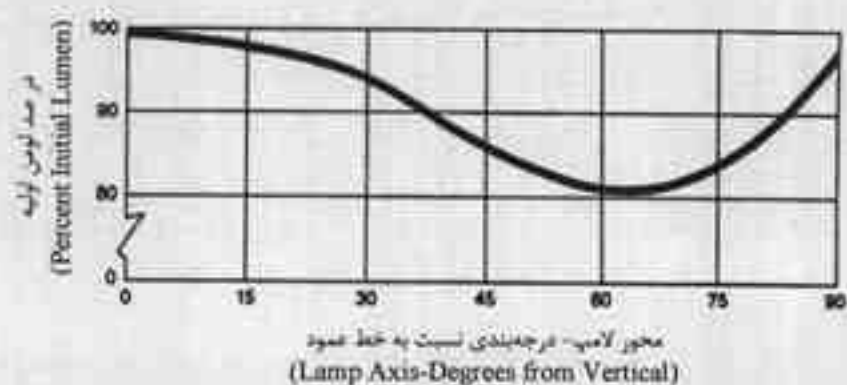


ج) کاهش نور لامپ متال هالید

شکل شماره ۴-۲۳: کاهش نور انواع لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا

جدول شماره ۴-۵: محدوده راندمان انواع لامپ‌های تخلیه‌ای

۳۵-۶۵	بخار جیوه
۷۰-۱۳۰	متال هالید
۵۰-۱۵۰	سدیم فشار بالا
۱۰۰-۱۹۰	سدیم فشار پایین
۳۰-۹۵	فلورسنت



شکل شماره ۴-۲۴: تغییرات نور یک لامپ متال هالید به تغییرات زاویه محور آن به خط عمود

جدول شماره ۴-۶: راندمان لامپ‌های تخلیه‌ای فشار بالا در توان‌های مختلف

Table 1. TYPICAL H.I.D. LAMP EFFICACIES

Watts	CRI	C/P	Efficacy (lumens/watt)		
			MV	MH	HPS
100	15	C	38		
	20+	C			95
	25	C	41		
	40+	P	45		
	50+	P	46		
	60+	C		76	
	80+	C			47
	80+	P			25
250	15	C	45		
	20+	C			110
	20+	P			104
	25	C	48		
	40+	P	52		
	50+	P	50		
	60+	C		92	90
	60+	P			80
	80+	P		92	
400	15	C	52		
	20+	C			125
	20+	P			119
	40+	P	57		
	50+	P	55		
	60+	C		100	94
	60+	P			89
	70	C		90	
	70+	P		100	
1,000	15	C	57		
	20+	C			140
	50+	P	62		
	60+	C		125	
	70+	P		125	

NOTES:

- The figures do not include ballast losses.
- "C" indicates clear lamps.
- "P" indicates phosphor coated lamps.

جدول شماره ۴-۷: تلفات بالاست‌های نوعی لامپ‌های تخلیه فشار بالا بصورت درصدی از توان لامپ

TYPICAL H.I.D. MAGNETIC BALLAST LOSSES
As a Percentage of Lamp Wattage

lamp wattage	MV	MH	HPS	LPS
35				72*
50	48*		32*	
70			30*	
90				38*
100	18	29*	30*	
135				32*
150			29*	
175	13	23		
180				22
200			20	
250	14	18	18	
400	13	14	14	
1,000	8	8	10	
1,500		7		

* The figures with asterisks are for high-power-factor reactor ballasts. The other ballasts are CWA units.

جدول شماره ۴-۸: مقایسه منابع نور مختلف

مثال خالید	بخار جیوه	فلورسنت فشرده	مشخصات
۱۲۰۰۰ ± ۹۰۰	۲۰۰۰ ± ۲۰۰۰	۵۰۰۰۰ ± ۱۰	لومن خروجی
۲۵ ± ۸	۱۵ ± ۸	۲۰ ± ۱۵	تضعیف لومن
۲۰۰۰۰ ± ۷۰۰۰	۶۰۰۰ ± ۲۰۰۰	۲۰۰۰ ± ۷۵۰	عمر مفید
۹۰ ± ۳۰	۲۲ ± ۱۲	۲۲ ± ۷	راندمان (Lm/W)
از ۵ برای بالاست‌های الکترونیکی با کیفیت تا ۲۰ (برای بالاست‌های مغناطیسی بی کیفیت)	ندارد	ندارد	مصرف انرژی بالاست (Ballast)
در محدوده خاصی از توان با توجه به سایز لامپ، شکل سوکت و قابلیت سازگاری بالاست محدود می‌شود	محدودیتی از جهت جایگزینی در صورت قابل نصب بودن در قاب و تحمل حرارت ایجاد شده توسط قاب وجود ندارد	محدودیتی از جهت جایگزینی در صورت قابل نصب بودن در قاب و تحمل حرارت ایجاد شده توسط قاب وجود ندارد	پتانسیل جایگزینی و عدم تطابق لامپ
باز به انواع خاصی از بالاست‌های تنظیم‌کننده می‌باشد	نامحدود، (بجز در مواردیکه از دیود استفاده شده باشد قابلیت تنظیم نور وجود ندارد)	نامحدود	قابلیت تنظیم نور
۹۵ ± ۵۰	۱۰۰	۱۰۰	ضریب ظاهر رنگ
تقریباً انتخاب رنگ آن به دلیل بکارگیری فلز نامحدود است طیف نوری آن می‌تواند جمع و نوک نیز به‌مثل طیف نور خورشید گسترده باشد	سفید به نظر می‌رسد اما رنگ واقعی آن زرد مایل به قرمز باشد طیف آن پیوسته بوده، اما تمرکز آن سمت انتهای قرمز اما تا حدی رنگ آن از لامپ‌های انتهایی معمولی متفاوت است	سفید به نظر می‌رسد اما رنگ واقعی آن زرد مایل به قرمز باشد طیف آن پیوسته بوده، اما تمرکز آن سمت انتهای قرمز رنگ بیشتر بوده و در انتهای آبی انرژی کمی دارد	رنگ لامپ
برای لامپ‌های راندمان بالا 60°F (15°C) و برای لامپ‌های معمولی 50°F (10°C) می‌باشد. بالاست‌های مخصوصی وجود دارد که با بکار گرفتن آنها به دمای راه اندازی بسیار کمتری می‌توان دست یافت	محدودیتی ندارد	محدودیتی ندارد	دمای راه‌اندازی
تلفات جدی نور خروجی در بالا و پائین نقطه ایستیم دمای لامپ (حدود ۱۰۰°F) خواهیم داشت	کم است	کم است	تأثیر دما بر روی نور

مثال هالید	بخار جیوه	فلورسنت فشرده	مشخصات
در لامپهای که از بالاستهای راهاندازی فوری استفاده می کنند فوری می باشد. در مورد لامپهای با بالاست سریع، یک ثانیه و در مورد لامپهای با بالاست پیشگرم از یک تا چندین ثانیه می باشد.	فوری	فوری	وقفه راهاندازی
در مقایسه با راهاندازی اولیه کوتاه تر می باشد.	فوری	فوری	زمان راهاندازی دوباره
قابلیت کنترل و متحرک سازی در آنها بسیار ضعیف می باشد. کنترل بیشتر بر روی خط عمود بر محور لامپ امکان پذیر است.	در بعضی از انواع می توان نور را متحرک کرد	در بعضی از انواع می توان نور را متحرک کرد	کنترل توزیع نور
ندارد	تنوع زیادی دارند	تنوع زیادی دارند	استفاده بصورت لامپهای تزئینی
لامپهای با طول زیاد باید بصورت افقی نصب شوند.	محدودیتی ندارد	محدودیتی ندارد. در بعضی از لامپهای نیز است که از قاب استفاده شود	محدودیت های نصب
تمام بالاستهای مغناطیسی سر و صدا تولید می کنند و حفاظت از دستگاههای آسیب پذیر در مقابل سر و صدا در این موارد ضروری است. همچنین برخی بالاستهای الکترونیکی هم مقدور قابل توجهی سر و صدا تولید می کنند.	کم است	کم است	تداخل صوتی
از بالاستهای با ضریب توان بالا می توان استفاده کرد. برخی از بالاستها ضریب توان پائین دارند.	مشکلی ندارد	مشکلی ندارد	ضریب توان
امواج شدید رخ می دهد و شدت آن در بالاستهای الکترونیکی با کیفیت پائین بیشتر است.	ندارد	ندارد	امواج هارمونیک
بالاستهای الکترونیکی مشکلات زیادی را بوجود می آورند. با یکارگیری بالاستهای با کیفیت پائین این مشکلات افزایش می یابد.	ندارد	ندارد	تداخل الکترو مغناطیسی
مثال هالید	بخار جیوه	فلورسنت فشرده	مشخصات
۶۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰	۶۰۰۰ تا ۱۲۰۰	۱۸۰۰ تا ۲۵۰	لومن خروجی

تضعیف لومن	۲۰ تا ۱۵	۲۵ تا ۲۰	۲۵ تا ۲۰
عمر مفید	۱۰۰۰۰	۲۲۰۰۰	۲۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰
راندمان (lm/W)	۷۰ تا ۲۵ (با در نظر گرفتن تلفات بالاست)	۶۵ تا ۳۵	۱۳۰ تا ۷۰
مصرف انرژی بالاست	۱۰ (برای بالاست‌های الکترونیکی) تا ۲۰ (برای بالاست‌های مغناطیسی)	۸ (برای لامپ‌های بزرگ) تا ۵۰ (برای لامپ‌های کوچک)	۷ (برای لامپ‌های بزرگ) تا ۳۰ (برای لامپ‌های کوچک)
بتأسیل جابجایی و عدم تطابق لامپ	لامپ‌های سر پیچدار، بجز مواردی که اندازی آنها برای نصب بزرگ باشد، می‌توانند جایگزین یکدیگر یا سایر لامپ‌های انتهایی شوند. در فلهایی که برای کنترل توزیع نور طراحی شده‌اند قابل نصب نمی‌باشند. سایر لامپ‌های فشرده، سرپیچ‌های خاصی دارند که موجب محدودیت در امر جابجایی آنها می‌گردد.	جابجایی شدت به سازگاری بالاست و بسته است. برخی از لامپ‌های بخار جیوه بدون بالاست‌های خارجی می‌توانند جایگزین لامپ‌های انتهایی معمولی شوند. اما اینکار راندمان را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.	جابجایی شدت به سازگاری بالاست و بسته است.
قابلیت تنظیم نور	انواعی که بالاست‌های انگرانی دارند نمی‌توانند در تنظیم نور مورد استفاده قرار گیرند.	تنظیم نور بصورت تک مرحله‌ای تا ۵۰٪ خروجی فقط با استفاده از ترانسفورمری امکانپذیر است.	تنظیم نور بصورت تک مرحله‌ای تا ۵۰٪ خروجی فقط با استفاده از ترانسفورمری امکانپذیر است. قسمت عمده رنگ، لامپ تغییر می‌کند.
ضریب نظاهرنگ	۸۵ تا ۶۵	۵۰ تا ۴۰	۷۰ تا ۶۰
رنگ لامپ	مانند لامپ‌های فلورسنت معمولی امکان انتخاب انواع رنگ از دمای K ۲۷۰۰ تا ۵۰۰۰ وجود دارد.	رنگ آن مشخصاً سبز-آبی است. قسمت عمده انرژی لامپ در خطوط باریک انتشار جیوه‌ای متمرکز می‌شود. لامپ‌هایی که پوشش فسفری دارند می‌توانند خطوط رنگی امپایی و طیف متناوب تولید کنند.	رنگ آن سفید متعادل به زرد است. لامپ‌های شفاف تعداد زیادی خطوط باریک در کنار طیف مرئی تولید می‌کنند. لامپ‌هایی که پوشش فسفر دارند تعداد بیشتری طیف پیوسته تولید می‌کنند.
دمای رانندازی	از $20^{\circ}\text{F} (-29^{\circ}\text{C})$ تا $33^{\circ}\text{F} (0^{\circ}\text{C})$	معمولاً $20^{\circ}\text{F} (-29^{\circ}\text{C})$	معمولاً $20^{\circ}\text{F} (-29^{\circ}\text{C})$
تأثیر دما بر روی نور	تلفات جدی نور خروجی در بالا و پایین نقطهٔ اینیمم دمای لامپ (در حدود 100°F) خواهیم داشت. لامپ‌هایی که از آلیاژهای جیوه استفاده می‌کنند در دماهای پایین نور بسیار بهتری دارند.	کمترین تلفات خروجی در دمای بالای $20^{\circ}\text{F} (-29^{\circ}\text{C})$ می‌باشد.	کمترین تلفات خروجی در دمای بالای $20^{\circ}\text{F} (-29^{\circ}\text{C})$ می‌باشد.

مشخصات	فلورسنت فشرده	پخش جیوه	مثال هالید
وقفه راه‌اندازی	از یک تا چندین ثانیه می‌باشد. لامپ‌هایی که از آلیاژهای جیوه استفاده می‌کنند در حدود یک دقیقه زمان نیاز دارند تا به روشنایی کامل برسند.	۲ تا ۸ دقیقه	۳ تا ۱۰ دقیقه
زمان راه‌اندازی دوباره	از راه‌اندازی اولیه کوتاه‌تر است.	مشابه راه‌اندازی اولیه می‌باشد.	۵ تا ۱۰ دقیقه طولانی‌تر از راه‌اندازی اولیه می‌باشد.
کنترل توزیع نور	تقریباً می‌توان نور را متمرکز کرد. مخصوصاً اگر از قاب‌های بزرگ غیر معمول استفاده شود.	تقریباً می‌توان نور را متمرکز کرد.	۵ تا ۱۰ دقیقه طولانی‌تر از راه‌اندازی اولیه می‌باشد.
استفاده بصورت لامپ‌های تزئینی	حباب‌ها برخی از انواع پخش کننده‌ها	ندارد	۵ تا ۱۰ دقیقه طولانی‌تر از راه‌اندازی اولیه می‌باشد.
محدوده پهنای نصب	ندارد	برخی از مدل‌ها برای نصب شدن در وضعیت‌های خاصی طراحی شده‌اند.	اکثر مدل‌ها برای نصب شدن در وضعیت‌های خاص طراحی شده‌اند.
تداخل صوتی	انواع با کیفیت سرو صدا ندارند ولی انواع بی کیفیت ممکن است سرو صدا ایجاد کنند.	بالاست‌ها از نوع مغناطیسی هستند و ممکن است سرو صدا تولید کنند.	بالاست‌ها از نوع مغناطیسی هستند و ممکن است سرو صدا تولید کنند.
ضریب توان	انواع با ضریب توان بالا قابل استفاده هستند. برخی هم ضریب توان پائین دارند.	بالاست‌های با ضریب توان بالا برای استفاده موجود می‌باشد. برخی بالاست‌ها هم ضریب توان پائین دارند.	بالاست‌های با ضریب توان بالا برای استفاده موجود می‌باشد. برخی بالاست‌ها هم ضریب توان پائین دارند.
اعوجاج هارمونیک	همه انواعی که بالاست‌های الکترونیکی دارند. مقدار کالی اعوجاج هارمونیک تولید می‌کنند. طبیعی است که در انواع ضعیف‌تر این مسئله تشدید می‌یابد.	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع مغناطیسی باشد جزئی است.	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع مغناطیسی باشد جزئی است.
تداخل الکترو مغناطیسی	ممکن است پارامی مشکلات در برخی از مدل‌هایی که از بالاست‌های الکترونیکی استفاده می‌کنند رخ دهد. اما اهمیت آنها از مشکلاتی که در فلورسنت‌های معمولی رخ می‌دهد کمتر است. این مشکلات در انواع با کیفیت افزایش می‌یابد.	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع الکترو مغناطیسی باشد مشکل وجود ندارد. در مورد بالاست‌های الکترونیکی تجربه‌ای حاصل نشده است.	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع الکترو مغناطیسی باشد مشکل وجود ندارد. در مورد بالاست‌های الکترونیکی تجربه‌ای حاصل نشده است.

ادامه جدول شماره (۴-۸)

مشخصات	مدیم فشار	مدیم فشار پائین
لومن خروجی	۵۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰	۲۵۰۰ تا ۱۸۰۰
تضعیف لومن	۲۵ تا ۲۵	
عمر مفید	۲۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰	۱۸۰۰۰
راندمان (Lm/W)	۱۵۰ تا ۵۰	۱۹۰ تا ۱۰۰
مصرف انرژی بالاست (Ballast)	۱۰ (برای لامپ‌های بزرگ) تا ۳۵ (برای لامپ‌های کوچک)	۲۰
پتانسیل جایگزینی و عدم تطابق لامپ	جایگزینی شدت به سازگاری بالاست وابسته است. برخی از لامپ‌های مدیم فشار می‌توانند جایگزین لامپ‌های بخار جیوه بشوند. این لامپ‌ها راندمان بالاتری دارند ولی ضریب تطابق رنگ این لامپ‌ها کمتر است.	جایگزینی لامپ شدت توسط قابلیت سازگاری بالاست و شکل سوکت محدود می‌گردد.
قابلیت تنظیم نور	تنظیم نور بصورت تک مرحله‌ای تا ۳۰٪ خروجی فقط با استفاده از بالاست‌های ترانسفورمری امکان‌پذیر است. قسمت عمده رنگ لامپ تغییر می‌کند.	ندارد
ضریب تطابق رنگ	۸۵ تا ۲۰	۲۰ تا ۰
رنگ لامپ	رنگ آن سفید متمایل به زرد است. طیف پیوسته باریک در حدود ۶۰۰ نانومتر متمرکز یافته است. در آن دسته از لامپ‌هایی که رنگ آنها تقویت شده است خروجی در انتهای قرمز رنگ طیف افزایش می‌یابد. این لامپ‌ها در انتهای آبی رنگ خود نقص دارند.	فقط زرد
معمولاً $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$ تا $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$	معمولاً $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$ تا $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$	معمولاً $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$ تا $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$
تأثیر دما بر روی نور	کمترین تلفات خروجی در دمای بالای $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$ می‌باشد.	کمترین تلفات خروجی در دمای بالای $20^{\circ}\text{F}(-29^{\circ}\text{C})$ می‌باشد.
وقفه راهاندازی	۵ تا ۱۰ دقیقه	۷ تا ۱۵ دقیقه
زمان راهاندازی دوباره	بمقدار قابل توجهی کوتاهتر از راهاندازی اولیه می‌باشد.	فوری
کنترل توزیع نور	بمقدار قابل توجهی کوتاهتر از راهاندازی اولیه می‌باشد.	متمرکز سازی نور بسیار ضعیف است. کنترل بیشتری بر روی خط عمود بر محور لامپ امکان‌پذیر است.
استفاده بصورت لامپ‌های تزئینی	بمقدار قابل توجهی کوتاهتر از راهاندازی اولیه می‌باشد.	ندارد
محدودیت‌های نصب	به وضعیت نصب زیاد حساس نمی‌باشد.	
تداخل صوتی	بالاست‌ها از نوع مغناطیسی هستند و ممکن است سرو صدا تولید کنند.	بالاست‌ها از نوع مغناطیسی هستند و مقداری سرو صدا تولید می‌کنند.
ضریب توان	بالاست‌های با ضریب توان بالا برای استفاده موجود می‌باشند. برخی بالاست‌ها هم ضریب توان پائین دارند.	بالاست‌های با ضریب توان بالا برای استفاده موجود می‌باشند. برخی از بالاست‌ها ضریب توان کمتری دارند.

مشخصات	مدیریت فشار پائین	مدیریت فشار بالا
اخراج هارمونیک	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع مغناطیسی باشد جزئی است	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع مغناطیسی باشد جزئی است
تداخل مغناطیسی	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع الکترومغناطیسی باشد مشکل وجود ندارد در مورد بالاست‌های الکترونیکی تجربه‌ای حاصل نشده است	با فرض اینکه بالاست‌ها از نوع الکترومغناطیسی باشد مشکل وجود ندارد در مورد بالاست‌های الکترونیکی تجربه‌ای حاصل نشده است

۲-۶- بالاست‌ها

همانطور که قبلاً گفته شده لامپ‌های تخلیه، جهت رانندگی و ادامه کار به بالاست نیاز دارند. وظیفه بالاست، ابتدا ایجاد ولتاژ بالا برای رانندگی لامپ و سپس محدود کردن جریان، هنگام کار دائم لامپ می‌باشد. در لامپ‌های مهتابی، بالاست‌ها درصد قابل ملاحظه‌ای از مصرف لامپ را به خود اختصاص می‌دهند. دو نوع عمده بالاست وجود دارند:

الف) بالاست‌های مغناطیسی

ب) بالاست‌های الکترونیکی

ج) نوع ترکیبی

شکل (۲-۲۵) انواع بالاست‌های لامپ مهتابی را نشان می‌دهد.

الف- بالاست‌های مغناطیسی

بالست‌های مغناطیسی از یک هسته و سیم پیچ تشکیل شده‌اند که خاصیت سلفی داشته و معمولاً با یک خازن جهت اصلاح ضریب توان یکار می‌روند. تلفات بالاست مغناطیسی به عنوان مثال در یک لامپ ۴۰ وات حدود ۱۰ وات می‌باشد بطوریکه توان مصرفی چراغی با دو لامپ مهتابی ۴۰ وات حدود ۱۰۰ وات می‌باشد زیرا:

$$\text{وات } 100 = 2 \times (40 + 10)$$

ب- بالاست‌های الکترونیکی

این بالاست‌ها برای یکار انداختن لامپ‌ها، از راکتور الکترونیکی استفاده می‌کنند. امتیاز اصلی این بالاست‌ها کاهش تلفات آنها و همچنین افزایش راندمان لامپ‌ها به علت ایجاد فرکانس بالا می‌باشد. به عنوان مثال تلفات بالاست در یک لامپ ۳۶ وات، ۴ وات است.

شکل (۲-۲۶) تغییرات نور خروجی لامپ مهتابی ۴۰W و ۲۰W را به ازای تغییرات فرکانس خروجی بالاست نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است بهره‌وری لامپ مهتابی در فرکانس بالای ۲۰ KHZ، بین ۱۵-۱۰ درصد افزایش می‌یابد. بوسیله این بالاست و مهتابی‌های خاص راندمان لامپ‌های مهتابی تا (lm/w) ۱۰۰ افزایش یافته است.

سازندگان زیادی بالاست‌های الکترونیکی عرضه می‌کنند که مشخصه‌های متفاوتی دارد. بر اساس یک

آزمایش که بوسیله بالاست‌های الکترونیکی بر روی یک لامپ ۴۰W انجام شده راندمان‌هایی از ۶۸ تا ۷۹ لومن بر وات بدست آمده است.

دیگر مشخصه‌های بالاست‌های الکترونیکی

- ♦ افزایش بازده مدار، یعنی کاهش تلفات بالاست
- ♦ کاهش وزن، به ویژه برای لامپ‌های بزرگ
- ♦ افزایش بازده نور
- ♦ محو شو سو زدن
- ♦ ایجاد ضریب توان ۱ بدون نیاز به خازن‌گذاری
- ♦ وسیله تسهیل کنترل دقیق توان با جریان لامپ
- ♦ راه‌اندازی کنترل شده بهتر و شرایط کاری مطلوب‌تر، در نتیجه افزایش عمر لامپ



بالاست مغناطیسی
(Magnetic Ballast)

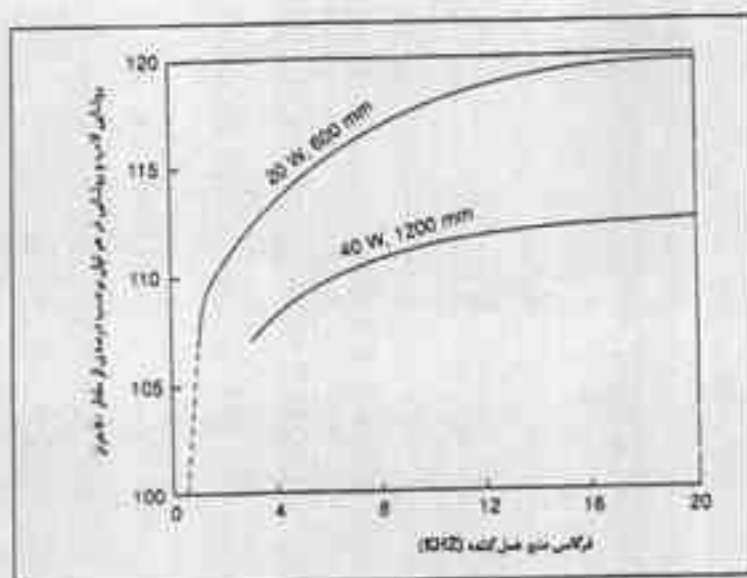


بالاست ترکیبی
(Hybrid Ballast)



بالاست الکترونیکی
(Electronic Ballast)

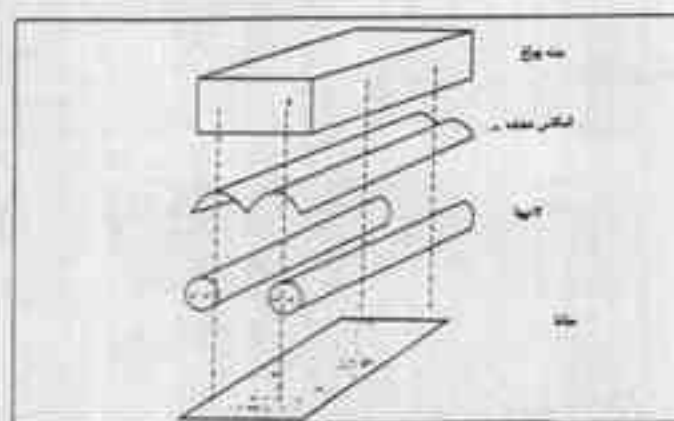
شکل شماره ۴-۲۵: نمایش داخل انواع مختلف بالاست‌های الکترونیکی



شکل شماره ۴-۲۶: مشخصه‌های لامپ فلورسنت فرکانس بالا

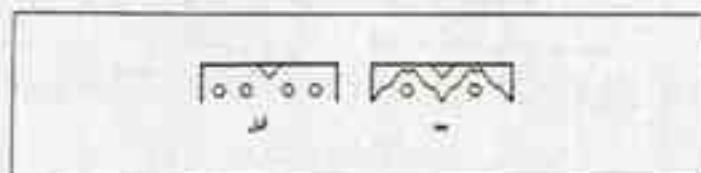
۲-۲- چراغ‌ها

نور افکن‌ها یا چراغ‌ها، جزئی از سیستم روشنایی‌اند که جهت هدایت بهینه نور طراحی می‌شوند و راحتی دیداری را در سطح بالایی تأمین می‌کنند. شکل (۴-۲۷) اجزاء مختلف یک چراغ را بطور نمونه نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴-۲۷: ساختمان چراغ

جدا از لامپ‌ها که تأثیر بسزایی در ولت‌دما و کل مجموعه سیستم دارند، انعکاس دهنده‌ها و حفاظ‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. شکل (۴-۲۸) بدنه چراغ را قبل و بعد از نصب انعکاس دهنده نوری نشان می‌دهد. حفاظ‌ها می‌توانند به صورت عدسی‌ها (لنزها) کرکره‌های فلزی و پلاستیکی و... باشند.



شکل شماره ۴-۲۸: بدنه چراغ قبل و بعد از نصب انعکاس دهنده نوری

راندمان چراغ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{راندمان چراغ} = \frac{\text{کل روشنایی خروجی لامپ‌ها}}{\text{کل روشنایی منتشر شده چراغ}}$$

به طور معمول، چراغ‌هایی بیشترین راندمان را دارند، که کمترین آسایش دیداری را تأمین می‌کنند و متقابلاً لامپ‌هایی که خیرگی را به بهترین وجه کنترل می‌کنند از کمترین راندمان برخوردارند.

جدول (۹-۴) تأثیر انعکاس دهنده‌ها را بر راندمان چراغ نشان می‌دهد که در آن اهمیت تمیز نگه داشتن چراغ‌ها نیز آمده است.

جدول (۱۰-۴) تأثیر حفاظتها را بر روی راندمان چراغ نشان می‌دهد. منظور از VCP^۱ شاخصی است که در صد افرادی را که در یک مکان مشخص میزان درخشندگی نور را قابل قبول می‌دانند نشان می‌دهد.

جدول شماره ۹-۴: مثال‌هایی از نور منتشر شده چراغ و نور تولید شده پس از نصب هر کدام از انعکاس دهنده‌ها

نگهدارنده	نسبت نور انتشار یافته به نور تولید شده
نگهدارنده سفید کثیف و مستعمل با لامپ‌های مستعمل	۴۵ - ۳۵٪
نگهدارنده سفید کثیف و مستعمل با لامپ‌های جدید	۶۷ - ۵۰٪
انعکاس دهنده آلومینیمی با لامپ‌های جدید	۷۳ - ۶۵٪
انعکاس دهنده نقره‌ای با لامپ‌های جدید	۸۵ - ۷۸٪

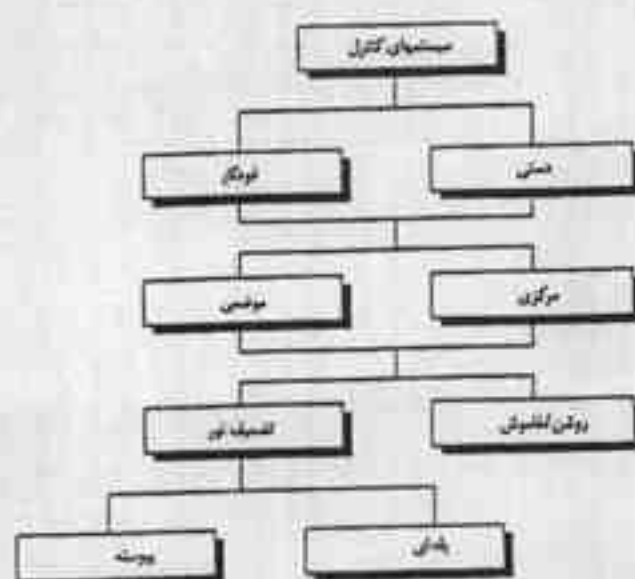
جدول شماره ۴-۱۰: انواع مختلف پوشش چراغ‌های فلورست

Table : Shielding Media Options

Shielding Material	Luminaire Efficiency Range (%)	VCP Range (%)
Standard Clear Lens	60-80	50-70
Low-Glare Clear Lens	60-80	75-85
Deep-Cell Parabolic Louver	50-90	75-99
Translucent Diffuser	40-60	40-50
White Metal Louver	35-45	65-85
Small-Cell Parabolic Louver	40-65	99

۸-۲- کنترل‌های سیستم روشنایی

کنترل کننده‌های روشنایی را می‌توان به دو دسته کلی دستی و خودکار تقسیم نمود. سیستم‌های تمام خودکار معمولاً امکان کنترل دستی هم دارند که به نوعی سیستم کنترل مرکب را بوجود می‌آورند. شکل (۴-۲۹) طرز کار سیستم‌های کنترل را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴-۲۹: سیستم‌های کنترل

کنترل‌های خودکار را نیز می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم نمود:

الف- کنترل‌هایی که بر پایه زمان هستند

این کنترل‌ها برای مکان‌هایی مناسبند که نیازمندی‌های روشنایی‌شان قابل پیش‌بینی و از قبل تعیین شده است. این کنترل‌ها برای روشنایی داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد روشنایی خارجی بر اساس زمان طلوع و غروب خورشید تنظیم می‌شوند و برای روشنایی داخلی با استفاده از جدول زمانی کار تنظیم می‌شود. این کنترل‌ها باید امکان کنترل دستی برای استفاده روشنایی در خارج از جدول زمانی نیز داشته باشد.

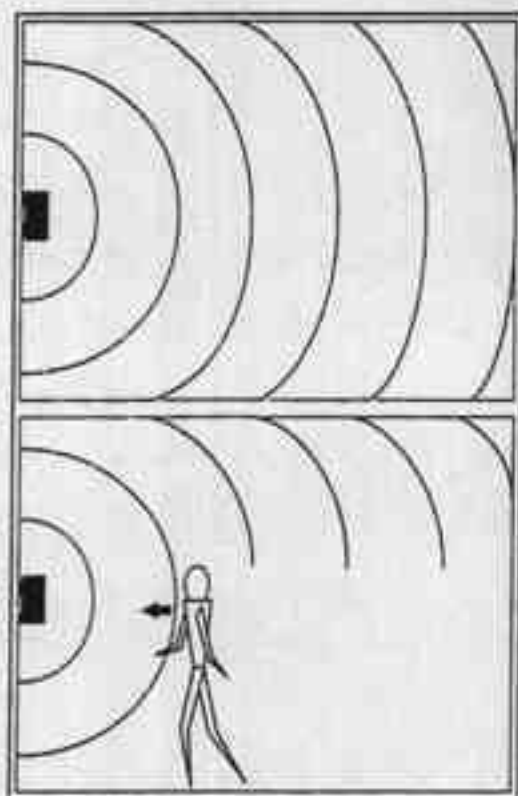
ب- کنترل‌هایی که بر پایه حضور افرادند

این کنترل‌کننده‌ها برای مکان‌هایی مناسب هستند که دارای الگوی غیر قابل پیش‌بینی و متغیر برای حضور افراد می‌باشد. نظیر دستشویی‌ها و آبارها. این کنترل‌کننده‌ها با استفاده از سنسورهای مافوق صوت یا مادون قرمز حضور افراد را در می‌یابند.

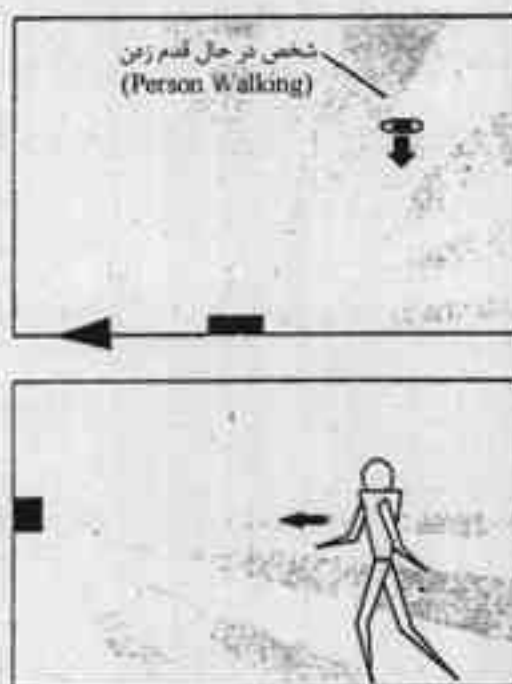
شکل‌های (۳۰-۲) و (۳۱-۲) چگونگی کار این سنسورها را نشان می‌دهند و جدول (۱۱-۲) موارد کاربرد سنسورها را نشان می‌دهد.

ج- کنترل‌هایی که بر پایه سطح روشنایی‌اند

فایده این نوع کنترل استفاده حداکثر از روشنایی طبیعی و استفاده حداقل از روشنایی الکتریکی جهت تأمین سطح روشنایی مورد نظر است. این روش علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، کاهش اضافه روشنایی و درخشندگی و دیپماند مصرفی کلی را نیز به همراه دارد. این سیستم‌ها دارای وسیله تضعیف نور هستند و سنسورها میزان تضعیف نور را که بستگی به میزان روشنایی روز دارد مشخص می‌کنند. به این وسیله اغلب «جبران‌کننده روشنایی» با استفاده از نور روز نیز می‌نامند.



شکل شماره ۳۰-۴: حشرهای مافوق صوت



شکل شماره ۳۱-۴: حشرهای مادون قرمز

جدول شماره ۴-۱۱: محل مناسب برای یکار بودن انواع حسگرهای حضور افراد

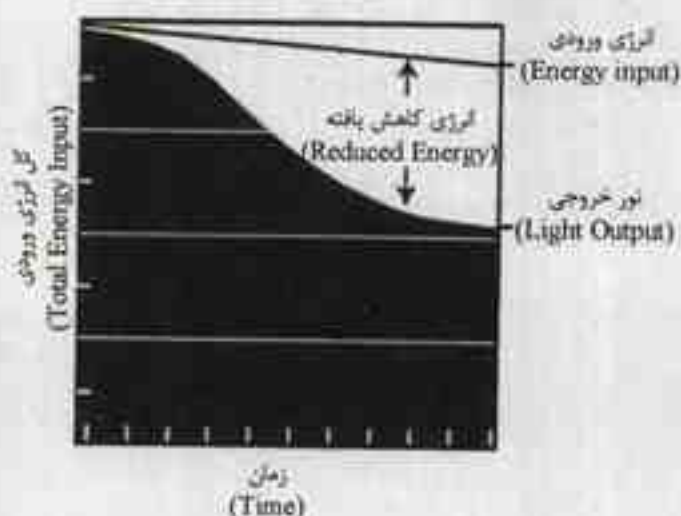
Table : Occupancy Sensor Applications								
Sensor Technology	Private Office	Large Open Office Plan	Partitioned Office Plan	Conference Room	Restroom	Closets/ Copy Rooms	Hallways & Corridors	Warehouse Aisles
Ultrasonic Wall Switch	✓			✓	✓	✓		
Ultrasonic Ceiling Mount	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Infrared Wall Mount	✓			✓		✓		
Infrared Ceiling Mount	✓	✓	✓	✓		✓		
Ultrasonic Narrow View							✓	
Infrared High-Mount Narrow View							✓	✓
Corner-Mount Wide-View Technology		✓		✓				

۴-۹- تعمیر و نگهداری سیستم‌های روشنایی

روشنایی اولیه نصب شده به مرور زمان به دلایل زیر کاهش می‌یابد:

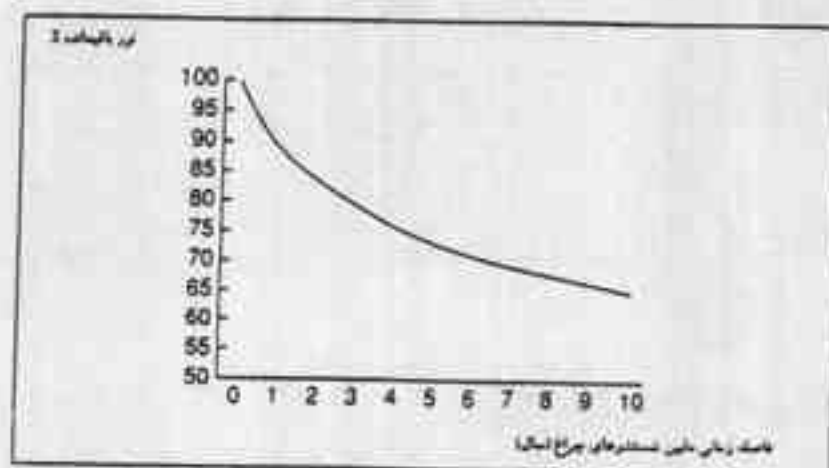
- ♦ کاهش نور لامپ‌ها در طول عمر آنها که برای هر لامپ در میحت مربوطه آمده است
- ♦ کثیف شدن و نشستن گرد و غبار بر روی لامپ
- ♦ کثیف شدن چراغها
- ♦ کثیف شدن سطوح انعکاس دهنده نور از قبیل دیوارها و سقف و...
- ♦ سوختن بعضی از لامپ‌ها

این عوامل موجب می‌شوند تا راندمان سیستم روشنایی تا ۶۰ درصد افت کند. این امر در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است.



شکل شماره ۴-۲۲: افت نور خروجی سیستم روشنایی در طول زمان

شکل (۴-۲۲) افت نور چراغ ناشی از کثیفی آن نشان داده شده است که در آن کاهش نور اولیه لامپ در نظر گرفته نشده است و می‌توان فرض کرد با تمیز کردن چراغ دوباره به حدود ۱۰۰ درصد برگردد مگر بعضی از اجزا نظیر لیزرها طوری تغییر رنگ داده یا کدر شوند که قابل تمیز کردن نباشند.



شکل شماره ۴-۲۳: افت پیش‌بینی شده نور در نتیجه کثیف شدن داخل بدنه چراغ در یک محیط اداری تمیز

یکی از روش‌های مؤثر، تعویض گروهی لامپ‌ها به همراه تمیز کردن چراغ‌ها می‌باشد. این کار بدو صورت موجب صرفه‌جویی می‌شود یکی اینکه مجبور نیستیم نور اولیه را در طراحی، بعلافت زیاد نور در طول زمان، خیلی زیادتر از میزان مورد نیاز در نظر بگیریم که این خود موجب کاهش هزینه اولیه و هزینه جاری انرژی سالانه می‌گردد. دوم اینکه هزینه دستمزد کارگر بازاری تعویض هر لامپ (چیزی در حدود ۲۵ درصد) و قیمت لامپ‌ها به علت خرید عمده کاهش یافته و نیازی به اشغال فضایی از اشیاء جهت لامپ‌ها نمی‌باشد. زمان

اقتصادی برای تعویض لامپ‌ها معمولاً ۷۰ درصد تقویم عمر آنها می‌باشد.
جهت این کار باید یک برنامه بهره‌برداری و نگهداری (O & M)^۱ طرح ریزی کرد که شامل بندهای زیر باشد:

- ♦ اوزالید نقشه تأسیسات
- ♦ جداول مشخصات چراغ‌ها و کنترل‌ها
- ♦ مشخصات وسایل و محصولات
- ♦ تأمین‌کننده‌های تجهیزات و خدمات و شماره تماس‌های آنها
- ♦ جداول تمیز کردن چراغ‌ها و تعویض لامپ‌ها با گزارش‌های انجام خدمات
- ♦ روش‌های تعویض لامپ، بالاست و تمیز کردن چراغ‌ها
- ♦ روش‌های تنظیم سنسورهای نوری و حضور افراد
- ♦ روش‌های درست معدوم کردن چراغ‌ها و بالاست‌ها

۲-۱۰- محاسبات اقتصادی روشنایی

برای محاسبه اقتصادی روشنایی ۲ راه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الف- مدل باز پرداخت ساده

این مدل بر اساس محاسبه مبلغ سرمایه‌گذاری شده و هزینه صرفه‌جویی شده می‌باشد و با تقسیم این دو مقدار «دوره باز پرداخت ساده» را محاسبه می‌کند و ساده‌ترین مدل اقتصادی می‌باشد.
قوانین آن عبارتند از:

- ♦ به آسانی قابل فهم است.
- ♦ نتایج مبنای مثال داده می‌شوند که به معنای آن است که این نتایج مستقل هستند و به طور مثال به تغییرات پولی وابستگی ندارند.

ایرادها عبارتند از:

- ♦ میزان سودآوری را به علت در نظر نگرفتن طول عمر سیستم محاسبه نمی‌کند.
- ♦ نرخ بهره یا هرگونه سرمایه‌گذاری مجدد را در طول عمر سیستم در نظر نمی‌گیرد.

ب- مدل ارزش کنونی خالص

این روش هزینه‌ها را در طول عمر سیستم روشنایی که واقعاً پیش می‌آیند در نظر گرفته و با استفاده از نرخ بهره (تغییر ارزش پول در واحد زمان را در نظر می‌گیرد) به زمان حال بر می‌گردانند که موجب افزایش کیفیت آن به عنوان ابزار تصمیم‌گیری گشته و گسترش روز افزونی یافته است.

۱. O&M: Operation and Maintenance

معادله زیر چگونگی استفاده از این مدل را نشان می‌دهد:

$$C_{tot} = I_{in} + \sum I_l R_{lL} + E \times R_E + M \times R_M + \sum C \times R_{lC} - SV \times R_{lSV}$$

$$R_l = \frac{1}{(1+i)^n} \quad , \quad R_{EM} = \frac{((1+i)^{n-1})}{i(1+i)^n}$$

در این معادله علامت عبارتند از:

I_{in} : کل سرمایه‌گذاری اولیه شامل چراغ‌ها، لامپ‌ها، بالاستها، نصب و...

I_l : سرمایه‌گذاری در قسمت‌های با عمر کوتاه (لامپ‌ها)

E : هزینه سالانه الکتریسیته

M : هزینه نگهداری

C : هزینه تعمیر کردن

R : ضریب ارزش کنونی که برای هر هزینه متناظر آن با تدیس مربوط مشخص شده

i : نرخ بهره

n : تعداد سال

SV : ارزش اسقاط

با استفاده از جداول (۱۲-۴) و (۱۳-۴) را می‌توان R های متناظر برای n و i های مختلف را بدست آورد.

جدول شماره ۴-۱۲: ضریب ارزش کنونی یکپوخت

$$R = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

n	4	5	6	8	10	12	15	18	20	25
1	0.962	0.952	0.943	0.936	0.930	0.893	0.870	0.847	0.833	0.800
2	1.886	1.879	1.873	1.783	1.736	1.690	1.626	1.566	1.528	1.440
3	2.775	2.723	2.673	2.577	2.487	2.402	2.283	2.174	2.106	1.952
4	3.630	3.546	3.463	3.312	3.170	3.037	2.853	2.690	2.588	2.362
5	4.452	4.329	4.212	3.993	3.781	3.605	3.352	3.127	2.991	2.689
6	5.242	5.076	4.917	4.623	4.355	4.111	3.784	3.498	3.326	2.951
7	6.002	5.786	5.582	5.206	4.868	4.564	4.100	3.812	3.605	3.161
8	6.733	6.462	6.210	5.747	5.335	4.968	4.487	4.078	3.837	3.329
9	7.435	7.108	6.802	6.247	5.759	5.328	4.772	4.303	4.031	3.463
10	8.111	7.722	7.360	6.710	6.145	5.650	5.019	4.494	4.192	3.571
11	8.760	8.306	7.887	7.139	6.493	5.938	5.234	4.656	4.327	3.656
12	9.385	8.861	8.384	7.536	6.814	6.194	5.421	4.792	4.439	3.723
13	9.986	9.394	8.857	7.904	7.103	6.424	5.583	4.910	4.533	3.790
14	10.563	9.899	9.295	8.244	7.367	6.628	5.724	5.008	4.611	3.824
15	11.118	10.380	9.713	8.559	7.606	6.811	5.847	5.092	4.675	3.859
16	11.652	10.838	10.106	8.851	7.834	6.974	5.954	5.162	4.730	3.887
17	12.166	11.274	10.477	9.122	8.032	7.120	6.047	5.222	4.775	3.910
18	12.659	11.690	10.838	9.372	8.201	7.250	6.138	5.273	4.812	3.928
19	13.134	12.085	11.158	9.604	8.365	7.366	6.198	5.316	4.843	3.942
20	13.580	12.462	11.470	9.818	8.514	7.469	6.259	5.353	4.870	3.954
25	15.622	14.094	12.783	10.675	9.077	7.843	6.484	5.467	4.948	3.983
30	17.292	15.372	13.765	11.258	9.422	8.053	6.566	5.517	4.979	3.995
40	19.793	17.159	15.046	11.823	9.779	8.244	6.642	5.548	4.997	3.999
50	21.482	18.256	15.562	12.333	9.913	8.304	6.681	5.554	4.999	4.000

جدول شماره ۴-۱۳: ضریب ارزش کنونی برای مقادیر متغیر

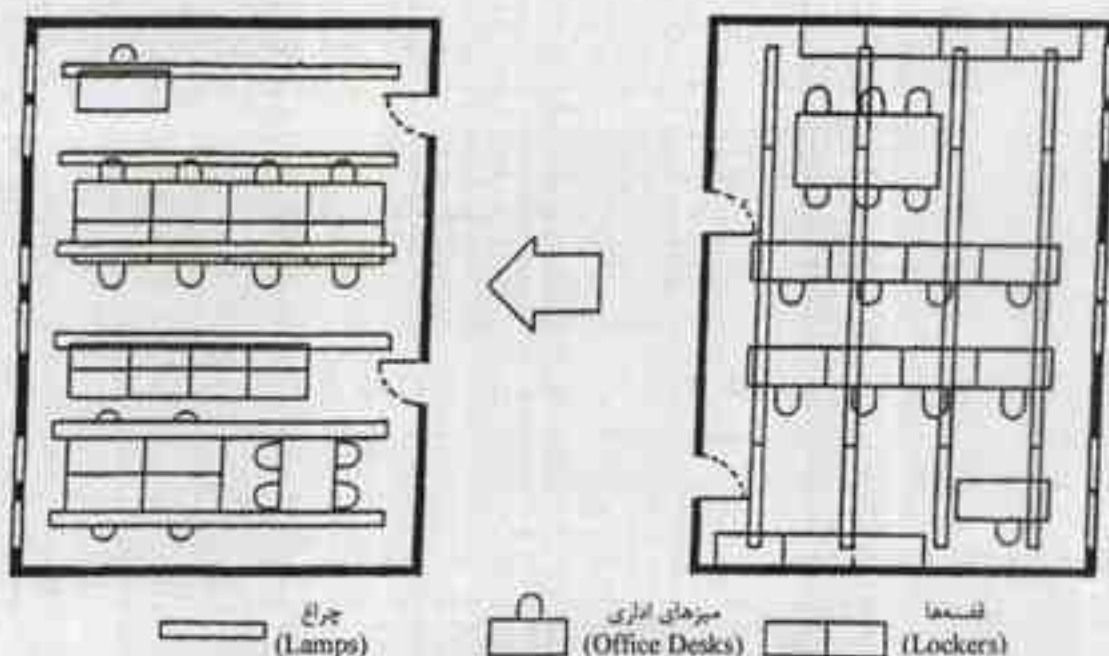
$$R = \frac{i}{(1+i)^n}$$

n	4	5	6	8	10	12	15	18	20	25
1	0.9615	0.9534	0.9434	0.9239	0.9081	0.8929	0.8696	0.8475	0.8333	0.8000
2	0.9246	0.9079	0.8900	0.8573	0.8284	0.7972	0.7581	0.7182	0.6944	0.6400
3	0.8890	0.8638	0.8396	0.7938	0.7513	0.7118	0.6575	0.6066	0.5797	0.5120
4	0.8548	0.8227	0.7921	0.7350	0.6830	0.6355	0.5718	0.5158	0.4823	0.4096
5	0.8219	0.7835	0.7473	0.6806	0.6209	0.5674	0.4972	0.4371	0.4019	0.3277
6	0.7905	0.7462	0.7090	0.6302	0.5645	0.5066	0.4323	0.3704	0.3349	0.2621
7	0.7599	0.7107	0.6651	0.5815	0.5132	0.4523	0.3759	0.3134	0.2791	0.2097
8	0.7301	0.6768	0.6274	0.5403	0.4665	0.4039	0.3269	0.2660	0.2326	0.1678
9	0.7026	0.6446	0.5919	0.5002	0.4241	0.3606	0.2843	0.2255	0.1938	0.1342
10	0.6756	0.6139	0.5584	0.4632	0.3835	0.3220	0.2472	0.1911	0.1613	0.1054
11	0.6496	0.5847	0.5268	0.4289	0.3505	0.2873	0.2149	0.1619	0.1346	0.0839
12	0.6246	0.5548	0.4970	0.3971	0.3186	0.2567	0.1869	0.1372	0.1122	0.0687
13	0.6006	0.5303	0.4668	0.3677	0.2897	0.2292	0.1625	0.1163	0.0935	0.0550
14	0.5775	0.5071	0.4423	0.3405	0.2633	0.2046	0.1413	0.0963	0.0779	0.0440
15	0.5553	0.4810	0.4173	0.3132	0.2394	0.1827	0.1229	0.0833	0.0669	0.0352
16	0.5339	0.4581	0.3936	0.2919	0.2176	0.1631	0.1069	0.0708	0.0541	0.0281
17	0.5134	0.4363	0.3714	0.2703	0.1978	0.1456	0.0929	0.0600	0.0431	0.0223
18	0.4936	0.4155	0.3503	0.2502	0.1799	0.1306	0.0808	0.0508	0.0376	0.0190
19	0.4746	0.3957	0.3305	0.2317	0.1635	0.1161	0.0703	0.0431	0.0313	0.0144
20	0.4564	0.3769	0.3118	0.2145	0.1486	0.1037	0.0611	0.0365	0.0261	0.0113
25	0.3751	0.2953	0.2330	0.1460	0.0923	0.0588	0.0304	0.0160	0.0105	0.0038
30	0.3083	0.2314	0.1741	0.0994	0.0573	0.0334	0.0131	0.0070	0.0042	0.0012
40	0.2083	0.1426	0.0972	0.0460	0.0221	0.0107	0.0037	0.0013	0.0007	0.0001
50	0.1457	0.0872	0.0543	0.0213	0.0085	0.0033	0.0009	0.0003	0.0001	0.0000

۲-۱۱- جانمایی مؤثر روشنایی

تنظیم مؤثر تجهیزات روشنایی و میزهای تحریر کار نسبتاً مشکلی است. وقتی که میزهای تحریر را منظم می‌کنیم، مجبوریم موقعیت تجهیزات اداری، شکل سازمان، حرکت پرسنل و غیره را در نظر بگیریم. به عبارت دیگر، تنظیم روشنایی معمولاً تنها برای مقدار متوسط مقدار روشنایی طراحی می‌گردد. در این حالت که در رابطه با تنظیم موقعیت روشنایی و میزهای تحریر ملاحظه‌ای صورت نمی‌پذیرد، ممکن است باعث بروز مشکلاتی از نقطه نظر مؤثر بودن روشنایی شود.

مثال (۲-۴): وقتی که راستای میز تحریر با راستای روشنایی بر هم عمود باشد، همچنانکه در شکل (۴-۳۳) روشنایی روی میز غیر یکنواخت می‌باشد و زمانی که شخصی روی میز خم می‌شود یک سایه رو به جلو ایجاد می‌شود.



شکل شماره ۴-۳۳: ترتیب قرار گرفتن چراغ‌ها باید موازی پنجره‌ها باشد

مثال (۳-۴): حرکت یک شخصی ممکن است بر روی میز تحریر اشخاص دیگر سایه ایجاد کند این ممکن است جزئی به نظر برسد اما باید در سیستم روشنایی از آن اجتناب شود.

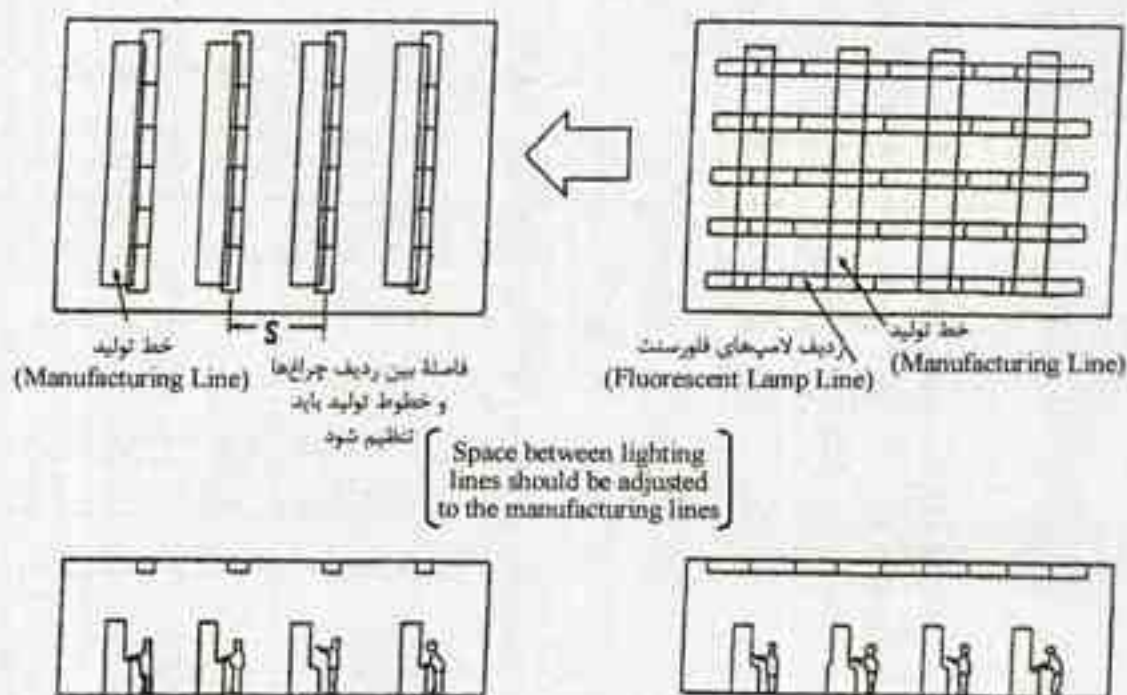
شکل (۴-۳۵الف) نشان می‌دهد که امتداد خط تولید بر امتداد روشنایی عمود است. چنین حالتی، یک مقدار زیادی تلفات روشنایی به همراه خواهد داشت. به روشنایی در مکانهایی که هیچ‌کس در آنجا مشغول کار نیستند توجه فرمایند.

وقتی که راستای روشنایی را عوض می‌کنیم، همچنانکه در شکل (۴-۳۵ب) نشان داده شده، شما از فوائد زیر بهره‌مند خواهید شد:

- ♦ تعداد کمتر تجهیزات
- ♦ یکنواختی روشنایی در محل کار
- ♦ تعمیر و نگهداری آسان تجهیزات الکتریکی

نکات کلیدی برای تنظیم روشنایی عبارتند از:

- ۱- تجهیزات روشنایی در ابتدا نباید کاملاً جایشان تثبیت شود.
- ۲- تعمیر و نگهداری سیستم روشنایی باید در نظر گرفته شود. بخصوص ارتفاع روشنایی باید به اندازه کافی پائین باشد که در محدود کار آسان قرار گیرد.
- ۳- حتی زمانی که یک لامپ می‌سوزد، حرکت پرسنل و موقعیت لامپ‌ها باید به خوبی دقت شود تا عدم یکنواختی روشنایی کمترین مقدار ممکن را دارا باشد.



شکل شماره ۴-۳۵-الف و ب: ترتیب قرار گرفتن چراغ‌ها برای یک خط از میزهای کار

۳- بهینه‌سازی انرژی در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع^۱ (HVAC)

۳-۱- تعریف

تهویه مطبوع فرایندی است که شرایط هوای موجود را با تنظیم دما، رطوبت، پاکیزگی، گازهای موجود در هوا، تابش (تشنع) و فشار، جهت تأمین شرایط مطبوع^۲ برای مصرف‌کننده تغییر می‌دهد.

هدف از تهویه مطبوع ساختمانی، حفظ محیط آسایش و سلامت برای جسم افراد ساکن در آن محل می‌باشد. هدف از تهویه مطبوع صنعتی، حفظ شرایط هوایی مطلوب جهت تولید، تسهیلات تجاری و حفظ مواد انبار شده می‌باشد.

بعنوان مثال، در صنایع نساجی برای اینکه در سالن‌های ریسندگی و بافندگی الیاف دچار پارگی نشوند باید دما و رطوبت هوا در یک محدوده خاص کنترل شود و یا در انبار صنایع شیر باید دما در محدوده ای باشد که از فاسد شدن محصولات جلوگیری کند.

۳-۲- شرایط لازم برای آسایش و سلامت انسان

آسایش انسان در ساختمان، به دمای هوا، سرعت جریان هوا، دمای متوسط تشنع سطوح محیط^۳ (MRT)، رطوبت نسبی و کنترل بو و غبار بستگی دارد. شرایط دقیق آسایش به تناسب افراد، سنین مختلف، نوع و تعداد لباس و نوع فعالیت آنها تغییر می‌کند.

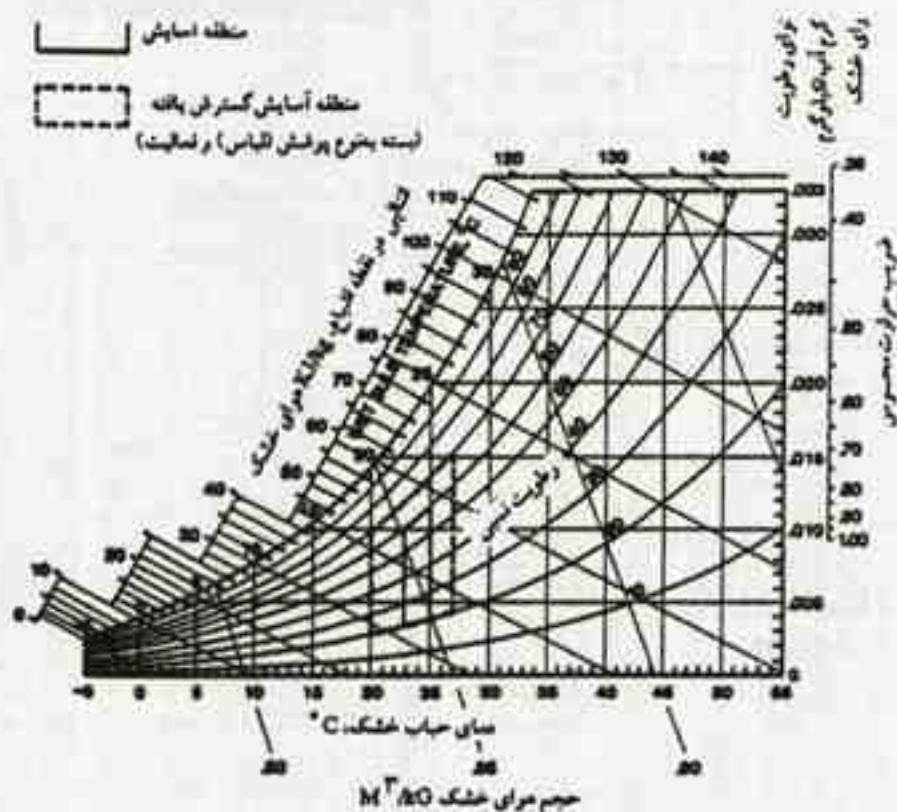
با توجه به اینکه نمی‌توان تمام این متغیرها را بطور دقیق برای هر ساختمان مشخص نمود، یا تعداد افراد را دقیقاً تعیین نمود، در نتیجه سیستم‌های تهویه مطبوع برای ایجاد محدوده‌ایی از شرایط آسایش قابل انتظار، طراحی می‌شود که برای بیشتر ساکنین و در بیشتر مواقع مناسب باشند.

شکل (۲-۳) منطقه تقریبی آسایش و همچنین حد گسترش را مناسب با سطح فعالیت و نوع لباس نشان می‌دهد.

1. HVAC: Heating, Ventilation and Air Condition

2. Comfort Conditions

3. Mean Radiation Temperatures

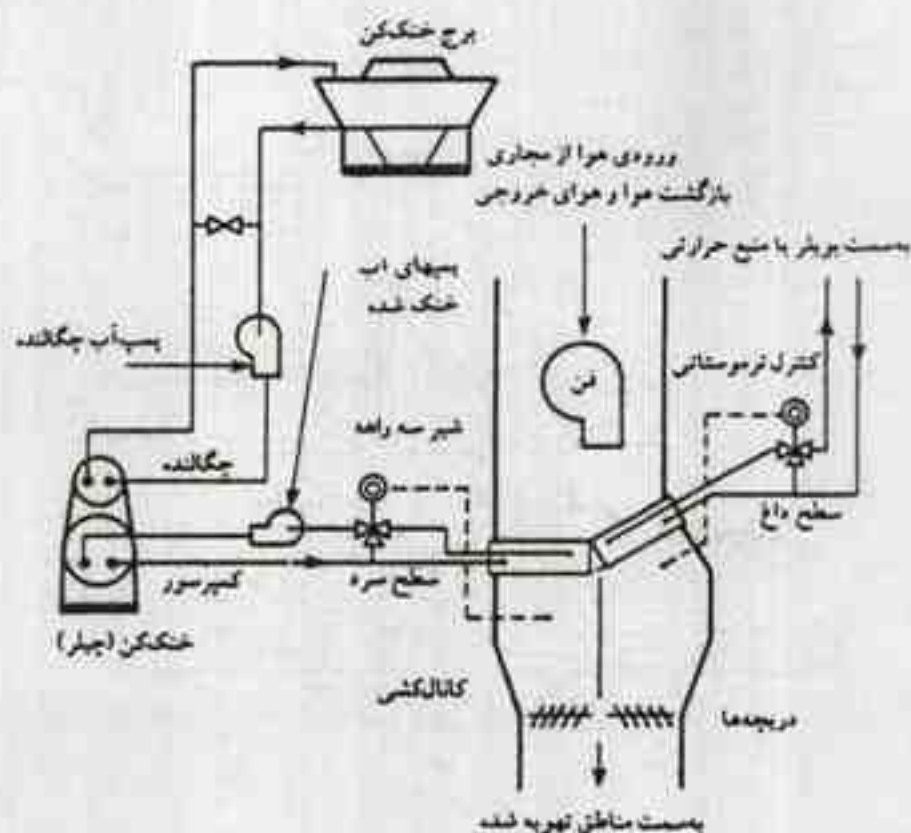


منبع : Smith, *Efficient Electricity Use*.

شکل شماره ۴-۳۶: نمودار سایکومتريک

۳-۳- معرفی سیستم‌های نمونه

شکل (۴-۳۷) عناصر یک سیستم نمونه گرمایش و تهویه مطبوع را نشان می‌دهد. سیستم را می‌توان بر اساس اندازه، نوع عملیات، منبع حرارت یا منبع برودت طبقه‌بندی نمود.



شکل شماره ۴-۳۷: اجزای یک سیستم HVAC نمونه

گرمایش می‌تواند به وسیله هوای داغ، یا جریان همرفت طبیعی (انتقال طبیعی گرما) یا کوران اجباری ایجاد شود، که این روش در تأسیسات کوچکتری از قبیل ساختمانهای مسکونی متداول است. در مورد ساختمانهای تجاری، سیستم‌های آب داغ یا بخار بیشتر به کار می‌روند. در این سیستم‌ها، (نوعی است که در شکل ۴-۳۷ ترسیم شده است)، آب داغ یا بخار به کویل مبدل حرارت بازیک شده واقع در کانالها از طریق خط لوله متغیر می‌شود. هوا در زمانی که از بالای این مبدل گرما عبور می‌نماید، گرم شده و سپس به طرف مصرف می‌رود. یک شیر کنترل شده ترموستاتی دمای مناسب را در داخل فضائی که باید حرارت داده شود ایجاد می‌نماید. یک نوع دیگر منبع حرارت که بعضی از اوقات با آن برخورد می‌شود، یک واحد مولد حرارت است. این مولد ممکن است سوخت یا دستگاه برقی، معمولاً با یک پنکه کوچک باشد و یک محوطه موضعی را پوشش می‌دهد. انواع دیگر مولدهای حرارت موضعی، شامل اجزاء حرارتی مقاومت الکتریکی است که می‌توانند در کانال‌های سیستم تهویه مطبوع یا در اطلاق‌ها (کف، سقف) قرار داده شوند. پمپ‌های حرارتی هنوز هم یک نوع مهم دیگر سیستم‌های حرارتی هستند.

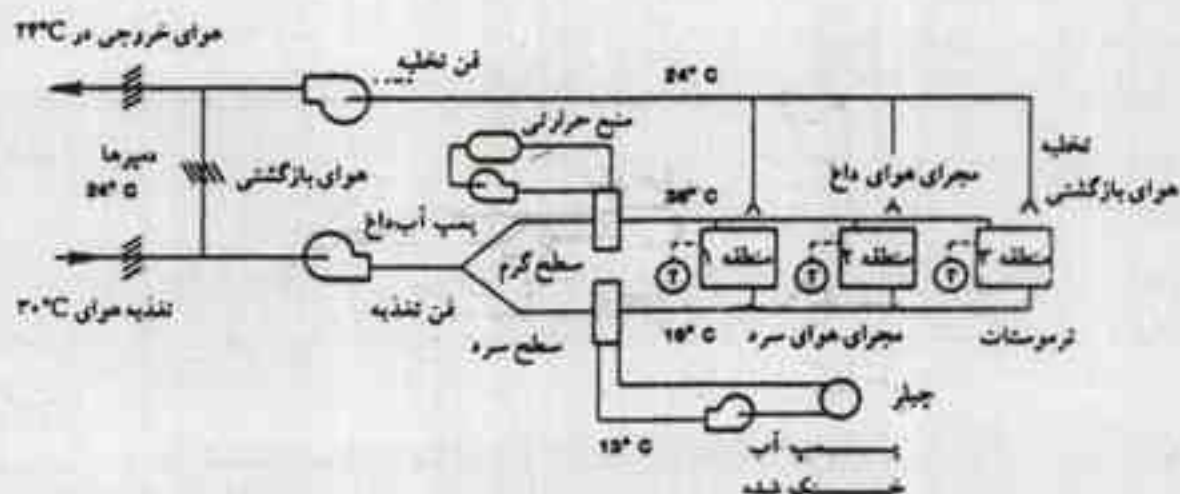
سیستم‌های سرمایشی شامل واحدهای قابل نصب در پنجره، واحدهای درست کوچک و واحدهای مرکزی می‌باشند که دارای دو نوع اصلی سیستم‌های سرمایش و سیستم‌های بخار سازی هستند.

در سیستم‌های سردسازی (یخچال‌ها) برای متراکم کردن مایع میرد از کمپرسورهای رفت و برگشتی یا محرک الکتریکی از نوع پیچی یا گریز از مرکزی استفاده می‌شود. هنگامیکه منبع حرارتی مناسبی در دسترس باشد از خنک کنندهای (چیلرهای) جذبی استفاده می‌شود. سپس ماده میرد در مبدل حرارتی منبسط شده و سرما ایجاد می‌نماید. در سیستم‌های خنک کن آبی، آب از میان مبدل حرارتی (تبخیرکننده) پمپ شده و از طریق خطوط لوله به کویل‌های خنک کن سیستم تهویه هوا منتقل می‌شود. این شیوه ای است که در شکل (۴-۳۷) نشان داده شده است. روش ممکن دیگر یعنی سیستم انبساط مستقیم^۱ (DX) هنگامی مناسب است که بتوان کویل‌های خنک کن را در نزدیکی کمپرسورها جای داد. میرد در کویل‌ها تبخیر می‌شود و در موقع عبور از آنها هوا را خنک می‌نماید.

هر دوی این سیستم‌ها نیازمند وسیله‌ای برای چگالش و خنک کردن میرد می‌باشند. این امر یا توسط چگالنده‌های با هوای خنک (در واحدهای کوچک) یا چگالنده‌های با آب خنک در سیستم‌های بزرگ صورت می‌گیرد. برای خنک کردن آب چگالنده، اغلب از یک برج خنک کن [مطابق شکل (۴-۳۷)] استفاده می‌شود. در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع دو وسیله انرژی بر مهم دیگر وجود دارند که همانا پمپ‌ها (برای انتقال آب سرد و گرم) و پروانه‌ها (فن‌ها) برای ایجاد جریان هوا در ساختمان هستند. توان پمپاژ بر اساس افت‌های فشار در سیستم محاسبه می‌گردد. پروانه‌ها (فن‌ها) را می‌توان یا در کانال‌ها و یا در مواضع مرکزی نصب نمود. معمولاً از پروانه‌های مجزایی برای خط تغذیه و تخلیه استفاده می‌شود.

الف- سیستم مجاری دوگانه

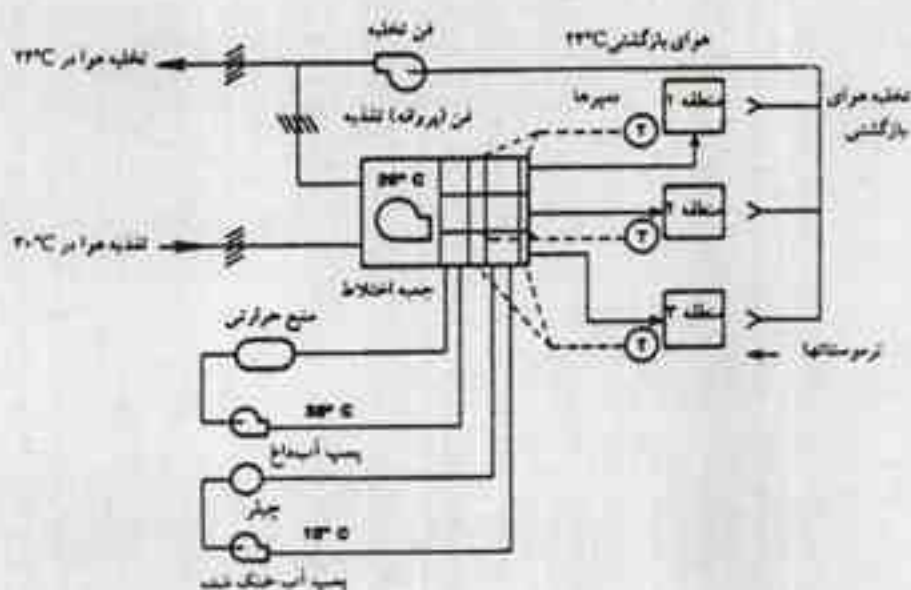
هم هوای گرم و هم هوای سرد از طریق کانال‌های مجزا به هر منطقه تغذیه می‌شوند. هوای گرم و سرد یسته به دمای مورد نیاز ناحیه به نسبت‌های متفاوت مخلوط می‌شوند. هنگامی که درجه حرارت متوسط است مشکلاتی به وجود می‌آید تجربه نشان می‌دهد که در این حالت به محض اختلاط هوای گرم و سرد برای دستیابی به درجه حرارت مطلوب، گرمایش و سرمایش همزمان روی می‌دهد. شکل (۴-۳۸) طرحی از این سیستم است. ترموستات‌های موجود در هر ناحیه میزان هوای گرم و سرد تغذیه شده برای دستیابی به درجه حرارت مطلوب را کنترل می‌کنند.



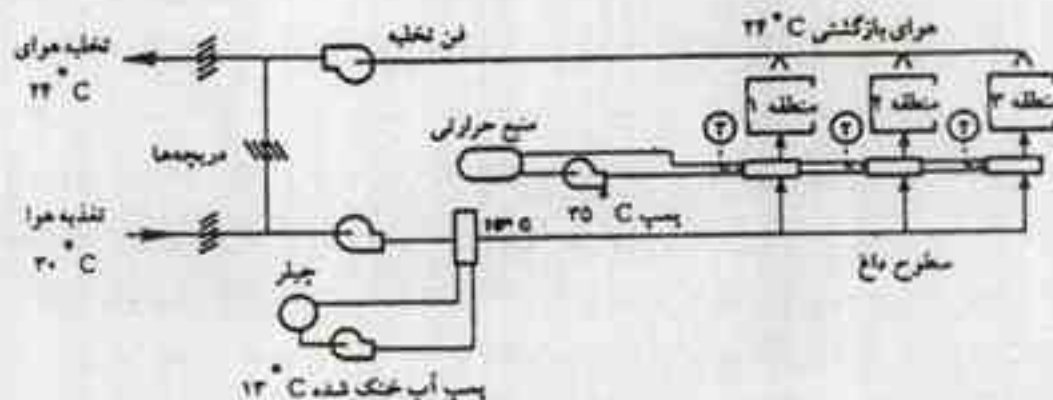
شکل شماره ۳۸-۴: سیستم مجاری دو گانه (درجه حرارت‌های نمونه مربوط به فصل تابستان)

ب- سیستم‌های چند ناحیه‌ای

سیستم چند ناحیه‌ای مشابه سیستم مجرای دوگانه است با این تفاوت که واحدهای (جمع‌های) اختلاط به جای آنکه در سرتاسر ساختمان پخش شده باشند، در پروانه قرار گرفته‌اند. درجه‌های هر ناحیه مخلوط هوای گرم و سرد لازم برای رسیدن به درجه حرارت مطلوب را کنترل می‌کنند. بدین ترتیب واحد تهویه قادر است به طور همزمان هوای گرم را به یک ناحیه و هوای سرد را به ناحیه دیگر تغذیه کند [شکل (۳۹-۴) را ملاحظه کنید] درجه‌ها توسط ترموستات‌های واقع در هر ناحیه کنترل می‌شوند.



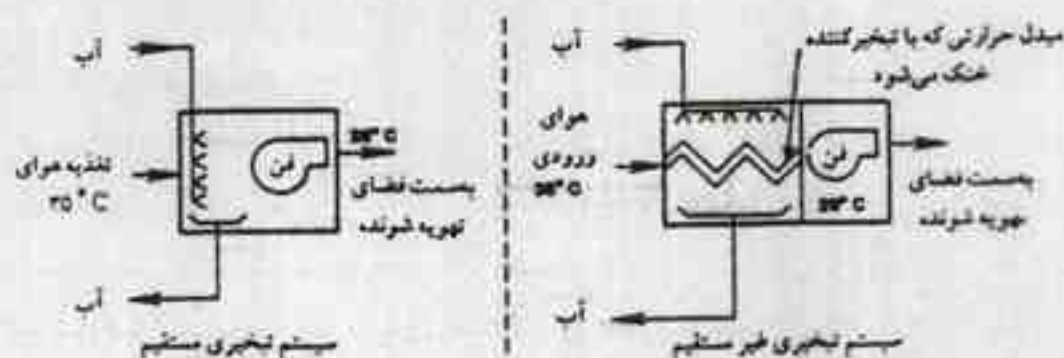
شکل شماره ۳۹-۴: سیستم‌های چند ناحیه



شکل شماره ۴-۴۱: سیستم بار گرمایش پایانه ای

ه- سیستم خنک کاری تبخیری

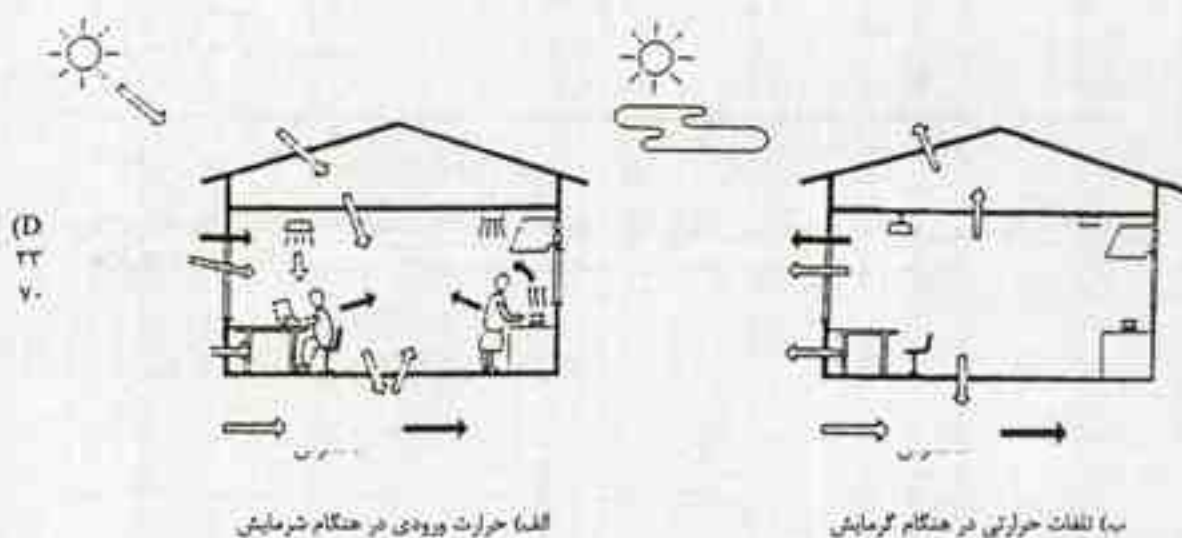
خنک‌کن‌های تبخیری در اماکن مسکونی و سیستم‌های کوچکتر با آب و هوای گرم و خشک به کار می‌روند. این سیستم‌ها با تبخیر آب به هوا و در نتیجه خنک کردن آن کار می‌کنند. هوا، گرما (گرمای نهان تبخیر) را با نرخ تقریبی $2/3 \text{ MJ/Kg}$ (یا 1000 Btu/lb) از آب تبخیر شده (بسته به دمای تبخیر) از دست می‌دهد. این فرایند در امتداد خط دمایی ثابت حباب مرطوب صورت می‌گیرد و در نتیجه دمای حباب مرطوب محیط، حد پائین سرمایش قابل حصول است. در عمل از شرایط اشباع بهره‌بر می‌شود. مصرف انرژی سیستم‌های تبخیری از سیستم‌های تبریدی کمتر است ولی این سیستم‌ها برای ایجاد سرمایش کافی به جریان‌های بیشتری از هوای بیرون نیاز دارند (بیرا درجه حرارت‌های هوای خنک تعادل به افزایش دارند، یک ابتکار جدید خنک کاری غیر مستقیم توسط سیکل تبخیر است [شکل (۴-۲۲) را ملاحظه کنید].



شکل شماره ۴-۲۲: سیستم خنک کاری تبخیری

و- واحدهای سقفی - پنجره‌ای یا (سیستم‌های تک منطقه‌ای)

این واحدها دارای محدوده‌ای از ۰/۳ KW تا ۳۰ KW (۰/۵ hp تا ۴۰ hp) و مستقل هستند. اصول کار آنها مشابه سیستم کلی تشریح شده قبلی [شکل (۲-۳۷)] است با این تفاوت که تمام تجهیزات آن به صورت جمع و جوری در یک واحد نصب شده‌اند. چگالنده یا هوا خنک می‌شود و گرما را به هوای خارج پس می‌دهد. در این واحدها، گردش پنکه (فن) چگالنده و فن کویل خنک کاری، اغلب توسط یک موتور واحد تأمین می‌شود. خنک کاری از طریق یک کویل خنک کاری اتساع مستقیم (DX) صورت می‌گیرد [شکل (۲-۲۳)]. نیازمندیهای تصفیه هوا توسط اشعه^۱ توصیه شده و استاندارد ۷۵-۹۰ آنها را اصلاح نموده است. جدول شماره (۲-۱۴)، فهرست سایر ارزشهای پیشنهادی تهویه هوا را ارائه می‌تواند. کمیت هوای خارج به هیچ عنوان نباید از ۰/۱۴ متر مکعب در دقیقه (۵ فوت مکعب در دقیقه) کمتر باشد. اگر چه باید تشخیص داده شود که این می‌تواند شامل توزیع حاصل از تصفیه باشد.



شکل شماره ۲-۲۳: ورودی و خروجی حرارت در یک خانه تحت تهویه مطبوع

جدول شماره ۴-۱۴: مستلزمات تهویه هوای ASHRAE ۶۲-۷۳ (اصلاح شده بر اساس ۷۵-۹۰)

تهویه کلی به‌ازای هر نفر		تهویه خارج به‌ازای هر نفر*		عملکرد
m ³ /min	CFM	m ³ /min	CFM	
۰٫۲۰	۵	۰٫۲۰	۷	شاپشگاهها و طبقات فروش
۰٫۲۵	۹	۰٫۷۱	۲۵	گزارشگاهها
۰٫۱۴	۵	۰٫۱۴	۵	تالار کنفرانس (سیگار کشیدن ممنوع)
۰٫۱۴	۵	۰٫۲۸	۱۰	سالن کنفرانس (سیگار کشیدن مجاز)
۰٫۱۴	۵	۰٫۲۲	۱۵	دفتر کار
۰٫۱۴	۵	۰٫۱۴	۵	اتاق کامپیوتر
۰٫۲۰	۷	۰٫۵۷	۲۰	هالهای زیرزمینی
۰٫۱۴	۵	۰٫۲۸	۱۰	اتاق فرایند نیمه‌هادیها
۰٫۲۰	۷	۰٫۵۷	۲۰	کارخانه چوب‌بری
۰٫۲۸	۱۰	۰٫۸۵	۳۰	محل آسیاکردن یا بسته‌بندی
۰٫۱۴	۵	۰٫۲۸	۱۰	کلاس درس

* با فرض عدم وجود تجهیزات کنترل گاز و بو

منابع: ASHRAE (انشره) استاندارد شماره ۶۲-۷۳، استانداردهای تهویه هوای مکانیکی و ضمیمه ۱۹۷۳.
ASHRAE استاندارد شماره ۷۵-۹۰، حفظ منابع انرژی در طراحی ساختمان جدید، ۱۹۷۵

۴-۳- محاسبه بار سرمایش و گرمایش ساختمان

شکل (۴-۲۳) ورودی‌ها و خروجی‌های حرارت برای یک خانه را که تحت تهویه مطبوع قرار دارد نشان می‌دهد.

شکل (۴-۲۴) مراحل محاسبه بار تهویه مطبوع را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴-۴۴: مراحل محاسبه بار تهویه مطبوع یک مکان

حرارت تولید شده توسط اشیا با نسبت زیر ایجاد می گردد:

فعالیت	توان - وات
خوابیدن	۷۰
ساکت نشستن	۱۲۰
کار پشت میز	۱۵۰
کار سبک	۲۰۰-۳۰۰
ورزش، کار بدنی سنگین	۲۰۰-۷۰۰

الف- محاسبه بار سرمایش ساختمان

الف-۱- گرمای انتقالی از دیوار

گرمای منتقل شده از دیوار (q_w [Kcal/h]) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q_w = A_w \cdot K_w \cdot \Delta t_e$$

$$\Delta t_e = t_o + I / \alpha_o - t_r$$

علامت بکار رفته عبارتند از:

A_w : (m²) سطح دیوار

K_{10} : ضریب انتقال حرارت کلی دیوار ($\text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)

Δt_0 : اختلاف دمای مؤثر در دو طرف دیوار ($^\circ\text{C}$)

t_0 : دمای هوای خارج ($^\circ\text{C}$)

I : انرژی نور خورشید که بوسیله سطح دیوار جذب می‌شود

α_0 : ضریب انتقال حرارت هوا در سطح خارجی دیوار

جدول (۴-۱۵) انتقال حرارت از ترکیب‌های نمونه دیوار را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۴-۱۵: ضریب انتقال حرارت کلی ترکیبات مختلف دیوار

الف: دیوار خارجی

زمان	تایمتان	ساختار دیوار	
		ضخامت بتن (mm)	اجزای (بازو معمول)
۳/۶۵	۳/۲۲	۱۲۰	کاشی سطح خارجی ۵mm
۳/۳۹	۳/۲۱	۱۵۰	ملاط سطح خارجی ۱۵mm
			بتون (ترکیبات اصلی)
۳/۰۲	۲/۸۷	۲۰۰	ملاط سطح داخلی ۱۵mm
۲/۷۳	۲/۶۱	۲۵۰	تخته گچی ۳mm

ب: سقف

زمان	تایمتان	ترکیبات سقف		
۱/۸۹	۱/۶۲	خانه چوبی با سقف کاذب که بوسیله سنگ پوشانده شده است (۱۲mm فیر)		
۱/۸۸	۱/۶۳	ضخامت بتن ۱۰۰ (mm)	یا سقف	ملاط بتن ضد آب (ترکیبات اصلی) ۲۰ (mm)
۳/۷۹	۲/۹۰	بدون سقف		
۱/۷۶	۱/۵۲	ضخامت بتن ۱۵۰ (mm)	یا سقف	ملاط سطح خارجی ۲۰ (mm) بتون سوز ۶۰ (mm) آسفالت ۱۰ (mm) سیمان (ترکیبات اصلی)
۳/۳۲	۲/۶۳	بدون سقف		
۱/۵۶	۱/۲۲	ضخامت بتن ۱۲۰ (mm)	یا سقف	
۲/۶۷	۲/۲۸	بدون سقف		
۱/۵۱	۱/۳۹	ضخامت بتن ۱۵۰ (mm)	یا سقف	
۲/۵۲	۲/۱۸	بدون سقف		

(توجه) با سقف: فاصله هوایی زیر بتن یا سقف کاذب ساخته شده از فیر قرار دارد

بدون سقف: تخته گچی ۳ mm یا ۱۵mm ملاط زیر بتن کامل می‌شود.

ادامه جدول شماره (۲-۱۵)

ج: دیواره جداکننده

ضریب انتقال حرارت کلی [Kcal/m ² h.°C]	ترکیبات دیواره جداکننده		
۲/۸۵	۱۰۰(mm)	بتون	ترکیبات اصلی:
۲/۷۵	۱۲۰(mm)		بتون با بلوک‌های بتونی
۱/۹۶	۱۰۰ (mm)	بتون	سطوح داخلی و خارجی:
۱/۹۶	۱۵۰ (mm)		ملاط ۱۵(mm)
۱/۸۰			تخته گچ ۳(mm)
۲/۲۹	دیوار ساده چوبی: هر دو سطح کامل شده با گچ		
۱/۳۷	دیوار دوبل چوبی: هر دو سطح کامل شده با گچ		

د: سقف

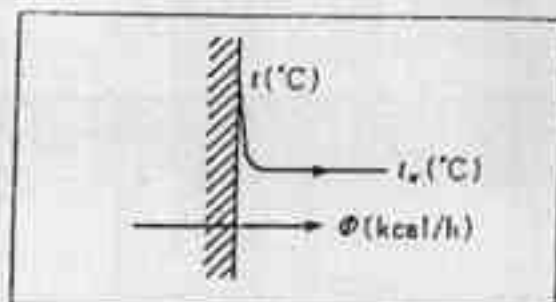
ضریب انتقال حرارت کلی [Kcal/m ² h.°C]	ترکیبات کف و سقف		
۱/۳۶	۱/۱۴	تخته چوبی (۱۰ mm)، تخته کف چوبی (۱۸ mm)، فاصله هوایی، تخته کف (تخته پشمی و تخته ضخیم (۱۲ mm))	
۱/۳۱	۱/۵۷	با سقف	پوشانده شده با
۲/۰۱	۲/۷۱	بدون سقف	ملاط
		ضخامت سیمان (۱۰۰ mm)	سیمان (ترکیبات اصلی)
			همراه با فاصله هوایی سقف و تخته سخت (۱۲ mm)
۱/۲۵	۱/۲۸	با سقف	بدون سقف
۱/۸۸	۲/۲۹	بدون سقف	ملاط (۱۵ mm)
		ضخامت سیمان (۱۵۰ mm)	گچ (۱۳ mm)

الف-۲- انتقال حرارت

اختلاف دما بین سطح جامد و مایع در تماس با آن موجب منتقل شدن گرما می‌شود که انتقال حرارت نامیده می‌شود. زمانی که دمای مایع جاری و سطح جامد t (°C) و t_w (°C) نسبت به هم ثابت نگهداشته شود [شکل (۲-۲۵)]، شار حرارتی منتقل شده از سطح جامد به مایع در زمانی که t از t_w بالاتر است متناسب با اختلاف دما بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \alpha A(t - t_w)$$

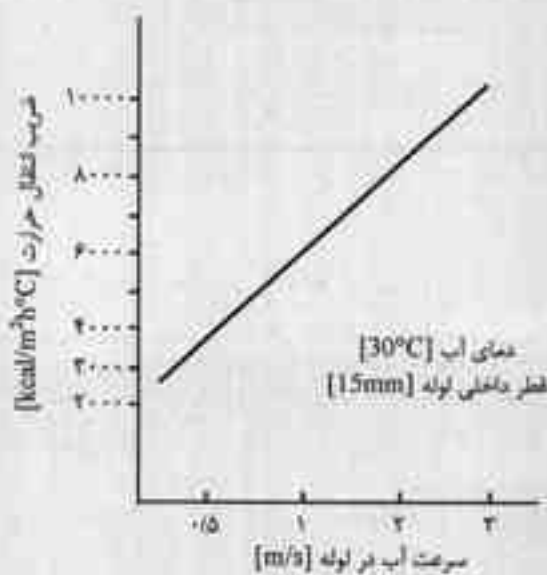
که در آن α عبارتست از ضریب انتقال حرارت (Kcal/m²h.°C) و مساحت A سطح جامد (m²) می‌باشد. جدول شماره (۲-۱۶) ضریب انتقال حرارت برای مواد نمونه را نشان می‌دهد و شکل ضریب (۲-۴۶) انتقال حرارت یک لوله آب نمونه در مجاورت هوا را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴-۴۵: شار حرارتی

جدول شماره ۴-۱۶: ضریب انتقال حرارت برای مواد مختلف

انواع سیال و حالات و حالات مختلف آنها	ضریب انتقال حرارت (α) [kcal/m ² h°C]
گاز	ساکن ۴-۱۰
	جاری ۱۰-۱۰۰
مایع	ساکن ۱۰-۱۰۰
	جاری ۷۰۰-۳۰۰۰
سطح تبخیر	ساکن ۳۰۰-۵۰۰۰
	جاری ۲۵۰۰-۱۵۰۰۰
سطح چگالش	ساکن ۵۰۰۰
	جاری ۲۵۰۰-۳۰۰۰



شکل شماره ۴-۴۶: ضریب انتقال حرارت آب در یک لوله

الف-۳- شار گرما از طریق شیشه

شار گرمایی از طریق شیشه پنجره (q_o [Kcal/h]) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_G = q_{GR} + q_{GC}$$

$$q_{GR} = A_G \times C_S \times q_{SG}$$

$$q_{GC} = A_G \times q_{CG}$$

علائم یکبار رفته در فرمول بالا عبارتند از:

q_{GR} : شار حرارتی تشعشعی (Kcal/h)

q_{GC} : شار حرارتی هدایتی (Kcal/h)

A_G : سطح شیشه (m^2)

C_S : ضریب شفافیت سطح شیشه و غیره

q_{SG} : استاندارد بار تشعشعی خورشید ($Kcal/m^2.h$)

q_{CG} : ضریب انتقال حرارت هدایتی ($Kcal/m^2.h$)

جدول (۴-۱۷) ضریب شفافیت را برای شیشه پنجره با پرده داخلی نمایش می‌دهد.

جدول (۴-۱۸) حرارت دریافتی از تابش استاندارد خورشید از طریق شیشه پنجره که در توکیو اندازه‌گیری

شده آمده است.

جدول شماره ۴-۱۷: ضریب شفافیت شیشه پنجره‌ها با پرده داخلی

پرده (Blind)			گروه (Class)
رنگ ملایم (Medium Color)	رنگ شفاف (Bright Color)	ندارد (None)	
۰/۷۵	۰/۶۵	۱	پرده طبیعی عادی
۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۸	پرده ساده جذاب و مطبوع
-	-	۰/۴	پرده دولایه (یا کرکره میانی)
۰/۷	۰/۶	۰/۹	پرده چند لایه عادی
۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۷۵	قسمت خارجی جذاب حرارت و قسمت داخلی عادی
-	-	۰/۶۵	قسمت خارجی عادی و قسمت داخلی آینه

جدول شماره ۴-۱۸: حرارت دریافتی از تشعشع استاندارد خورشید از میان شیشه پنجره

جهت (Azimuth)	(زمان از زمان خورشیدی) (Solar Time)															جمع روزانه
	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	
افقی	۱	۲۵	۲۰۹	۲۷۹	۳۱۵	۳۲۵	۳۰۲	۲۷۲	۲۰۲	۲۲۹	۲۱۸	۲۷۹	۲۰۹	۲۵	۱	۵۴۷۸
سایه شمالی	-	۷۲	۴۹	۳۸	۲۹	۲۲	۱۷	۱۲	۷	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۳۷۷
شمال شرقی	-	۲۲۲	۲۸۲	۳۲۹	۳۶۵	۳۸۵	۳۹۲	۳۸۲	۳۵۲	۳۰۲	۲۵۲	۲۰۲	۱۵۲	۱۰۲	۵۲	۱۰۲۲۲
شرق	-	۲۲۲	۲۸۲	۳۲۹	۳۶۵	۳۸۵	۳۹۲	۳۸۲	۳۵۲	۳۰۲	۲۵۲	۲۰۲	۱۵۲	۱۰۲	۵۲	۱۰۲۲۲
جنوب شرقی	-	۱۵۰	۲۷۹	۳۲۲	۳۵۲	۳۶۲	۳۵۲	۳۲۲	۲۷۹	۲۲۲	۱۵۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۲۲۲
جنوب	-	۱۲	۲۱	۳۸	۵۲	۶۲	۶۷	۶۷	۶۲	۵۲	۳۸	۲۱	۱۲	۰	۰	۳۷۷
جنوب غربی	-	۱۲	۲۱	۳۸	۵۲	۶۲	۶۷	۶۷	۶۲	۵۲	۳۸	۲۱	۱۲	۰	۰	۱۰۲۲۲
غرب	-	۱۲	۲۱	۳۸	۵۲	۶۲	۶۷	۶۷	۶۲	۵۲	۳۸	۲۱	۱۲	۰	۰	۱۰۲۲۲
شمال غربی	-	۱۲	۲۱	۳۸	۵۲	۶۲	۶۷	۶۷	۶۲	۵۲	۳۸	۲۱	۱۲	۰	۰	۱۰۲۲۲

توجه: مقادیر بر حسب $[kcal/m^2.h]$ در تاریخ (23 July) در شهر توکیو اندازه‌گیری شده‌اند.

الف-۴- شار حرارتی بوسیله تخلیه هوا

برای تخمین شار حرارتی بواسطه تخلیه هوا ($q_v [Kcal/h]$) از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$V_S = \text{دفعه} / \text{دفعه} \times \text{دفعات تهویه} \times (m^3) = \text{حجم اتاق}$$

$$q_v = q_{vS} + q_{vL}$$

$$q_{vS} = 0.29(t_o - t_f) \times V_S$$

$$q_{vS} = 720(x_o - x_f) \times V_S$$

علامت عبارتند از:

q_{vS} : بار حرارت محسوس بوسیله تخلیه

q_{vL} : بار حرارت نهان بوسیله تخلیه

V_S : مقدار تخلیه (m^3/h)

t_o : درجه حرارت خارج ($^{\circ}C$)

t_f : درجه حرارت داخل ($^{\circ}C$)

x_o : رطوبت مطلق هوای خارج ($Kg/Kg\text{-dry}$)

x_f : رطوبت مطلق هوای داخل ($Kg/Kg\text{-dry}$)

0.29 ($Kcal/m^3.^{\circ}C$) حرارت ویژه $\times 1/2$ (Kg/m^3) وزن مخصوص هوا = 0.29 ($Kcal/m^3.^{\circ}C$)

$$600 \text{ (Kcal/Kg)} \times \text{حرارت تهنان بخار} \times 1/2 \text{ (Kg/m}^3\text{)} \times \text{وزن مخصوص هوا} = 720 \text{ (Kcal/m}^3\text{)}$$

الف-۵- بار هوای تازه

بار حرارتی هوای تازه (q_{OA} [Kcal/h]) از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$q_{OA} = 1.2 V_o \times (h_o - h_f)$$

این معادله می‌تواند به صورت مشابه قسمت ۴ نوشته شود.

علامت بکار رفته عبارتند از:

V_o : حجم هوای تازه مورد استفاده (m^3/h)

h_o : آنالهی هوای خارج (Kcal/Kg-day)

h_f : آنالهی هوای داخل (Kcal/Kg-day)

جدول شماره (۴-۱۹) تعداد تهویه لازم را در موقعیت‌های مختلف و در زمان‌های سرمایش و گرمایش نشان

می‌دهد.

جدول شماره ۴-۱۹: دفعات تهویه اتاق‌ها نسبت به ابعاد آنها برای سرمایش و گرمایش

(Ventilation number from a draft)

میزان سرمایش						
۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۵۰۰
۰/۳۵	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۶	۰/۷
میزان گرمایش						
ترکیبات ساختمانی	ترکیبات گران	ترکیبات درجه متوسط	ترکیبات ارزان			
بتون (یا قاب فلزی)	۰/۵	۰/۵-۱/۵	-			
آجر (یا قاب چوبی)		۱/۵-۲/۵	-			
چوب غربی (یا قاب چوبی)	۱-۲	۲-۳	-			
چوب شرقی (یا قاب چوبی)	۲-۳	۳-۴	۴-۶			

الف-۶- سایر بارها

(I) حرارت تولید شده توسط تجهیزات روشنایی

$$1(W) = 0.86 \text{ (Kcal/h)}$$

(II) حرارت تولید شده توسط تجهیزات اداری

$$1(KW) = 860 \text{ (Kcal/h)}$$

جدول شماره (۴-۲۰) حرارت تولید شده بوسیله تعدادی از لوازم خانگی آمده است.

جدول شماره ۴-۲۰: حرارت تولید شده توسط وسایل خانگی مختلف

(Heat generated by various appliances. [kcal/h])

نام وسیله	دمای محسوس [kcal/h]	دمای نهان [kcal/h]
قهوه‌ساز (Coffee maker) (گاز شهری 1/8 Lit)	۱۰۰	۲۵
تستر (Toaster) (گرم‌کن الکتریکی با ابعاد ۱۵×۲۰×۲۲ cm)	۶۱۰	۱۱۰
جراغ بونزن (Bunsen burner) (گاز شهری - قطر 11 mm)	۲۴۰	۶۰
فند عفونی‌کننده (Disinfector) (گرمایش الکتریکی به ابعاد ۱۵×۲۰×۲۲ cm)	۶۸۰	۶۰۰
فند عفونی‌کننده (Disinfector) (گرمایش الکتریکی به ابعاد ۲۲×۲۵×۲۲ cm)	۱۳۰۰	۱۰۰۰
نوع ایستاده خشک‌کننده موی سر (Beauty parlor hair dryer) (Helmet type, 115[V], 6/5[A])	۲۷۰	۸۰
نوع معمولی خشک‌کننده موی سر (Beauty parlor hair dryer) (Blower type, 115[V], 15[A])	۶۰۰	۱۰۰
دستگاه حالت‌دهنده دائمی مو (Permanent wave machine) (با گرم‌کن 25W)	۲۲۰	۴۰
اجاق گاز خانگی (Domestic gas stove)	۱۸۰۰	۲۰۰
فر گاز خانگی (Domestic gas oven)	۲۰۰۰	۱۰۰۰

توجه: در جدول (۴-۲۰)، اگر لوازم خانگی به هود (فن تخلیه) خارجی مجهز باشند، مقادیر حرارت تولید شده باید نصف در نظر گرفته شوند. زیرا اینها مقادیر مرجع هستند و از یک تولید کننده به تولید کننده دیگر ممکن است تغییر جزئی داشته باشند.

III) حرارت تولید شده توسط بدن افراد

بدن افرادی که در محیط‌های تحت تهویه مطبوع قرار دارند بعنوان یک منبع حرارتی 37°C یا حرارتی تولید می‌کنند که ناشی از فعالیت‌های متابولیکی آنها است. در جدول شماره (۴-۲۱) حرارت محسوس و نهان تولید شده افراد باارزای فعالیت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول شماره ۴-۲۱: حرارت تولید شده توسط بدن افراد

(Heat from human bodies [kcal/h])

دمای محسوس (kcal/h)					دمای اتاق (kcal/h)		فعالیت
۲۸°C	۲۸°C	۲۸°C	۲۸°C	۲۸°C	دمای کل	مثال	
۶۵	۵۸	۵۳	۴۹	۴۴	۸۸	تئاتر	نشسته
۶۹	۶۱	۵۳	۴۹	۴۵	۱۰۱	مدرسه	کار سبک
۷۲	۶۲	۵۴	۵۰	۴۳	۱۱۳	دفتر کار، هتل	کار نشسته در دفتر
۷۳	۶۳	۵۵	۵۰	۴۳	۱۲۶	سازمان، بانک	ایستادن و راه رفتن
۸۱	۷۱	۶۲	۵۴	۴۸	۱۳۹	رستوران	
۹۲	۷۴	۶۲	۵۴	۴۸	۱۸۹	کارخانه - کارسبک	نشسته کار کردن
۱۱۶	۹۶	۸۳	۷۶	۶۸	۵۳۲	کارخانه - کار سنگین	راه رفتن
۱۵۳	۱۳۲	۱۲۱	۱۱۷	۱۱۳	۳۶۳	بولینگ	بولینگ

دمای محسوس (kcal/h)					دمای اتاق (kcal/h)		فعالیت
۲۸°C	۲۸°C	۲۸°C	۲۸°C	۲۸°C	دمای کل	مثال	
۲۳	۳۰	۳۵	۳۹	۴۴	۸۸	تئاتر	نشسته
۳۲	۴۰	۴۸	۵۲	۵۶	۱۰۱	مدرسه	کار سبک
۴۱	۵۱	۵۹	۶۳	۶۸	۱۱۳	دفتر کار، هتل	کار نشسته در دفتر
۵۳	۶۲	۷۱	۷۶	۸۱	۱۲۶	سازمان، بانک	ایستادن و راه رفتن
۵۸	۶۸	۷۷	۸۳	۹۱	۱۳۹	رستوران	
۹۷	۱۱۵	۱۲۷	۱۳۳	۱۴۱	۱۸۹	کارخانه - کارسبک	نشسته کار کردن
۱۳۶	۱۵۴	۱۶۹	۱۷۶	۱۸۲	۵۳۲	کارخانه - کار سنگین	راه رفتن
۲۱۲	۲۳۲	۲۴۴	۲۶۸	۲۵۲	۳۶۳	بولینگ	بولینگ

الف-۷- بار فن‌ها

بار حرارتی تولید شده توسط فن‌ها از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_F = 860 \times L_F$$

$$L_F = \frac{P_F \times Q}{6120 \times \eta_F}$$

 L_F : قدرت شفت فن (KW) P_F : فشار کلی فن (mm H₂O) Q : (دقیقه / m³) حجم هوا η_F : راندمان فن

کل بار حرارتی موتور فن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$q'_r = \frac{q_r}{\eta_M} \quad \text{بار حرارتی کل}$$

$$\eta_r: \text{راندمان مقدار}$$

جدول شماره (۲۲-۴) و شماره (۲۳-۴) راندمان نوعی فن‌ها و موتورهای را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۲۲-۴: راندمان فن‌ها

η_r	طبقه‌بندی
فن سانتریفوز (Centrifugal fan)	
۰/۴۵-۰/۶۰	نوع چند تیغه‌ای (Multi-blade type)
۰/۴۵-۰/۸۰	نوع توربو (Turbo type)
۰/۵۵-۰/۴۵	نوع بار محدود (Limit-load type)
۰/۷۰-۰/۸۵	نوع ایرفویل (Airfoil type)
۰/۶۰-۰/۷۵	لوله‌ای (Tubular)
فن جریان محوری (Axial flow fan)	
۰/۷۵-۰/۸۵	با پرّه (With vanes)
۰/۵۵-۰/۴۵	با لوله (With tube)
۰/۶۰-۰/۵۰	با پروانه (With propeller)

جدول شماره ۲۳-۴: راندمان موتورهای

η_M	خروجی (Rated output) (KW)
۰/۴۰	۰/۴-۰/۷
۰/۸۰	۰/۷۵-۳/۷
۰/۸۵	۵/۵-۰/۱۵
۰/۹۰	۰/۲۰-۰/۳۰

الف-۸- ضریب اضافی

یک ضریب اضافی برای ظرفیت تهویه، وارد محاسبه می‌شود، که حدود ۸ تا ۲۰ درصد بار محاسبه شده می‌باشد.

ب- محاسبه بار گرمایش

ب-۱- آهنگ حرارتی منتقل شده از دیوار

آهنگ حرارتی منتقل شده از دیوار (q_w [Kcal/h]) از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$q_w = A_w = K_w \times (t_r - t_o)$$

ب-۲- آهنگ حرارتی بوسیله تخلیه هوا

شار حرارتی منتقل شده از تخلیه هوا (q_v [Kcal/h]) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_S = (\text{ساعت / دفعه}) \times \text{تعداد دفعات تهویه} \times (\text{حجم اتاق } m^3)$$

$$q_v = q_{vS} + q_{vL}$$

$$q_{vS} = 0.29 \times (t_r - t_o) \times V_S$$

$$q_{vL} = 720 \times (x_r - x_o) \times V_S$$

ب-۳- بار حرارتی هوای تازه

بار حرارتی منتقل شده توسط هوای تازه از طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$q_{OA} = 1.2 \times V_o \times (h_r - h_o)$$

این معادله می‌تواند از قسمت ۲ نیز بدست آید.

علامتی که در ۳ قسمت بالا آمده است در قسمت محاسبه بار سرمایش آمده است.

ب-۴- سایر بارها

معمولاً گرمای ناشی از بار تابشی خورشید، گرمای تولید شده توسط بدن افراد، روشنایی و لوازم اداری بطور مستقیم موجب گرم شدن اتاق نمی‌شوند و در محاسبات وارد نمی‌شوند.

۳-۵- استفاده از کامپیوتر جهت محاسبه بار سرمایش و گرمایش

با توجه به اهمیت سیستم گرمایش و تهویه مطبوع و مصرف زیاد آن در ساختمان‌ها و همچنین امکان صرفه‌جویی بالا، در بسیاری از موارد، لازم است مصرف انرژی این بخش در ساختمان‌ها را به عنوان بخشی از برنامه مدیریت انرژی، مدل‌سازی کنیم.

برای ساختمان‌های کوچک از روش محاسبات دشی می‌توان استفاده نمود، بدین ترتیب که اتلافات حرارتی از طریق پوشش ساختمان (دیوارها، پنجره‌ها، سقف و غیره) محاسبه شده و مقادیر انرژی جذب یا دفع شده توسط نفوذ هوا و نیز انرژی حاصل از بازهای خورشید به منظور طراحی شرایط آب و هوایی به آن افزوده می‌شوند سپس این اتلافات برای کل ساختمان با هم جمع می‌شود اگر قرار باشد که حالت دیگری مورد مطالعه قرار گیرد این روند باید تکرار شود.

روش ساده تقریبی دیگر، روش درجه-روز^۱ می‌باشد که برای ساختمانهای کوچک مورد استفاده قرار گرفته و از دمای هوای بیرون تبعیت می‌کند. مقادیر درجه روز گرمایش با تعیین اختلاف بین یک دمای مرجع (معمولاً

1. Degree day

۱۸°C) و دمای متوسط ۲۴ ساعته محاسبه می‌شود و برای روزهای گرمایش در هر سال با هم جمع گردیده و برای کل سال بدست می‌آید. این روش منابع حرارتی داخل ساختمان را به حساب نمی‌آورد به همین دلیل، دمای مرجع را بالاتر در نظر می‌گیرند چرا که می‌توان فرض نمود چراغ‌ها، تجهیزات و افراد، حرارت کافی برای افزایش دما بین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد تولید می‌کنند. اثره دقت این روش را در حدود ۲۰ درصد تخمین زده است.

روش دوم استفاده از یکی از چندین شیبه‌سازی کامپیوتری موجود است. روش کار و پیچیدگی این برنامه‌ها با یکدیگر متفاوت است اما اساس کار همه آنها استفاده از الگوریتم‌هایی برای مدل‌سازی اتلافات و جذب حرارت ساختمان‌ها، مشخصات کاری تجهیزات گرمایش و تهویه مطبوع و الگوهای برای آب و هوای خارجی می‌باشد.

بسیاری از این برنامه‌ها را می‌توان برای مقایسه سرمایه سیستم و هزینه‌های کاری مورد استفاده قرار داد و لذا در تحلیل‌های اقتصادی مفید واقع می‌شوند. دقت این قبیل نرم افزارها تقریباً بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

۳-۶- فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی در تهویه مطبوع

الف- کنترل‌ها را بهینه کنید

کنترل‌ها را بهینه کنید بطوریکه سرمایش و گرمایش تنها در مواقع لزوم، صورت پذیرد. اولین گام، بهبود کارایی سیستم تهویه مطبوع، بررسی مواردی است که با تغییرات سر راست و مستقیم قابل اجرا هستند. بعنوان نمونه، بسیاری از صرفه‌جویی‌ها از طریق استفاده از سیستم‌های کنترلی پیچیده (نظیر کامپیوترها و میکرو کامپیوترها) و سیستم‌های کنترلی ساده مانند تایمر در دسترس هستند.

بعنوان مثال بسیاری از چیلرها برای حداکثر بار، طراحی و انتخاب می‌شوند، در صورتیکه اغلب زیر ظرفیت کار می‌کنند و یکی از زمینه‌های مهم جهت بررسی کارکرد، در بارهای کم است. استفاده دقیق از تجهیزات در شرایط بار جزئی، می‌تواند به صرفه‌جویی‌های عمده‌ای در مصرف انرژی منتهی شود. می‌توان وسایل کنترل را طوری تنظیم نمود تا بجای اینکه چند چیلر در بار جزئی کار کنند یک چیلر با بار کامل کار کند یا بجای اینکه یک چیلر بطور دائم در بار جزئی کار کند بصورت قطع و وصل در بار کامل کار کند که این خود ۵۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی به همراه دارد یا کنترل جهت خاموش کردن فن‌ها در حالتی که نیاز به تهویه نیست و یا کنترل پمپ‌ها، زمانی که چند پمپ دربار جزئی در حال کارند و...

ب- ظرفیت سیستم را بهینه کنید

ظرفیت سیستم را به پایین‌ترین سطح قابل قبول (بر اساس استانداردها و آئین‌نامه‌های محلی) کاهش دهید. بطور مثال نسبت تصفیه هوا تنها باید به اندازه‌ای باشد که در یک روز که نیاز به حداکثر سرمایش است تأمین نماید. در صورت وجود ظرفیت اضافی ممکن است توان در پیکه تلف شود و یا موجب سرمایش و گرمایش بیش از

حد شود. در صورتی که بتوانیم ۲۰ درصد از حجم تصفیه هوا را کم کنیم آنگاه در صورت استفاده از کنترل دور بجای دمپر انرژی مصرفی پنکها به نصف کاهش می‌یابد.

ج- کاهش بار ساختمان

تصفیه، بارهای حرارتی خورشیدی، حرارت تجهیزات، بارها یا تلفات حرارتی هدایتی یا تابشی همگی می‌توانند به راز منبع حرارتی ساختمان اضافه یا کم شوند. روش‌های قابل اجرا عایق‌کاری، درزبندی، پوشش‌های انعکاسی پنجره‌ها و ایجاد سایه، تخلیه حرارت خروجی و تلف شده تجهیزات و بهینه‌سازی سیستم روشنایی می‌باشد. عایق‌کاری، جهت جلوگیری از انتقال حرارت از طریق هدایت می‌باشد که تأثیر بسزایی در کاهش بار تهویه دارد. مقدار تأثیر عایق حرارتی، با پارامترهای بنام عدد U (U-value) و عدد R (R-value) بیان می‌شود. در قسمت قبل عدد U با نام K آمده است و واحد آن در واحد انگلیسی، Btu بر ساعت بر فوت مربع بر اختلاف درجه بر حسب فارنهایت می‌باشد و معادله انتقال حرارت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Q = U \times (\text{سطح}) \times (\text{اختلاف درجه حرارت})$$

ضریب R در واقع عکس ضریب U است و در واقع حسن کار با آن، این است که در صورتی که لایه‌های مختلفی در کنار هم قرار گیرند برای بدست آوردن عدد R کلی می‌توان عدد R تک تک آنها را با هم جمع نموده و سپس با محاسبه معکوس آن عدد U را بدست آورد یا مستقیماً از معادله زیر گرمای انتقال را محاسبه نمود.

$$Q = \frac{1}{R} \times (\text{سطح}) \times (\text{اختلاف درجه حرارت})$$

در جدول (۴-۲۲) مقادیر ضریب R برای چند عایق حرارتی جهت انتخاب عایق حرارتی نمونه و در قسمت پائین جهت مقایسه برای مصالح ساختمانی، آمده است.

جهت انتخاب عایق حرارتی مناسب، نباید تنها به ضریب R توجه شود، بلکه بسته به مورد استفاده، باید به خواص دیگر آن، نظیر قابلیت اشتعال، هزینه نصب، قیمت و برخی خواص دیگر توجه شود.

جدول شماره ۴-۲۴: مقادیر R برای عایق‌ها و ترکیبات مواد متداول

R-VALUES OF COMMON INSULATION
AND CONSTRUCTION MATERIALS

Material	R-Value per inch
Mineral wool*	2.9 to 3.8
Glass fiber batt & blanket*	2.9 to 3.8
Glass fiber board	3.8 to 4.2
Cellulose, shredded paper, new	approx. 3.3
Extruded polystyrene board**	4.0 to 5.2
Polystyrene bead board**	4.0 to 5.0
Polyurethane foam board**	5.0 to 6.0
Polyisocyanurate foam board	5.5 to 8.0
Perlite	approx. 2.7
Vermiculite	approx. 2.3
Lightweight concrete	0.2 to 2.0
Concrete, sand or gravel mix	0.1
Concrete & cinder blocks	0.15 to 0.3
Brick	0.2
Plywood	1.2
Pine	1.2
Acoustical tile, typical	2.5
Fiberboard sheathing, typical	2.5

- * Higher density provides better R-value because commercial batt insulation has less than the optimum density of fibers.
- ** Assumes CFC fill gas. R-value diminishes with age because of gas loss. The figures assume moderate aging.

مثال برای نصب عایق: هر چه ضخامت عایق بیشتر باشد، صرفه‌جویی انرژی نیز بیشتر می‌باشد. اما سرمایه‌گذاری یک عامل محدود کننده است و باید میزان صرفه‌جویی به اندازه‌ای باشد که مقدار سرمایه‌گذاری انجام شده را توجیه کند. هدف از این مثال، نشان دادن بهترین ضخامت عایق کاری برای یک عایق مشخص می‌باشد. می‌خواهیم یک دیوار مرسوم عایق نشده را عایق کاری کنیم. شرایط عبارتند از:

- ♦ ضریب R برای دیوار بدون عایق ۳ می‌باشد.
- ♦ اختلاف دمای متوسط سالیانه 30°F است.
- ♦ هزینه تلفات انرژی \$ ۱۰ برای هر میلیون Btu می‌باشد.
- ♦ هزینه بالاسری را مقدار ثابت \$ ۰/۱۲ برای فوت مربع در نظر بگیرید.
- ♦ هزینه دستمزد کارگر \$ ۰/۲ برای فوت مربع می‌باشد.
- ♦ هزینه اضافی دستمزد کارگر را بازی افزایش واحد R \$ ۰/۰۱ بر فوت مربع در نظر بگیرید.
- ♦ هزینه مواد \$ ۰/۰۹ برای فوت مربع می‌باشد.

برای اعداد داده شده بالا محاسبات اقتصادی در حدود (۴-۲۵) داده شده است. همچنانکه در جدول بالا دیده

می‌شود بهترین و اقتصادی‌ترین مقدار عایق کاری برای ضریب R برابر ۶ می‌باشد.

جدول شماره ۴-۲۵: جدول محاسبات اقتصادی برای عایق‌هایی با مقادیر ضریب R متفاوت

ضریب کل R	هزینه (بر حسب دلار)	صرفه‌جویی خالص طی ۲۰ سال (بر حسب دلار)	زمان بازگشت سرمایه (بر حسب دلار)	نسبت صرفه‌جویی ممکن به هزینه سرمایه گذاری
۳	-	-	-	-
۴	۰/۴۲	۳/۹۶	۱/۹۲	۱۰/۴۲
۵	۰/۵۲	۶/۴۸	۱/۴۹	۱۳/۴۶
۶	۰/۶۲	۸/۱۴	۱/۴۲	۱۴/۱۳
۷	۰/۷۲	۹/۳۰	۱/۴۲	۱۳/۹۲
۸	۰/۸۲	۱۰/۱۴	۱/۵۰	۱۳/۳۷
۹	۰/۹۲	۱۰/۷۶	۱/۵۷	۱۲/۷۰
۱۰	۱/۰۲	۱۱/۳۴	۱/۶۶	۱۲/۰۲
۱۲	۱/۲۲	۱۱/۹۲	۱/۸۶	۱۰/۷۷
۱۵	۵۲	۱۲/۵۰	۲/۱۷	۹/۲۴
۲۰	۲/۰۲	۱۲/۹۸	۲/۷۱	۷/۳۷
۳۰	۳/۰۲	۱۲/۷۴	۳/۸۳	۵/۲۲

د- مشخص نمودن و بررسی مکان‌هایی که نیاز به تهویه دارند

منظور از سیستم تهویه مطبوع گرم و سرد کردن افراد است نه ساختمان. تشخیص این واقعیت ساده، می‌تواند به تغییراتی در الگوهای اجرایی منجر شود که حاصل آن صرفه‌جویی‌های عظیم باشد. بجای راهروها، فضاهای ارتباطی، فضاهای خالی و... باید مکان‌هایی را که در آن افراد مشغول بکارند را تهویه کنیم. جهت انجام چنین کاری، بهتر است ساختمان را از دیدگاه حرارتی بصورت افقی و عمودی بصورت زیر تقسیم‌بندی کنیم.

الف) فضاها را از دیدگاه نیاز و یا عدم نیاز به تهویه مطبوع مرتب کنید. اتاق‌هایی که نیاز به تهویه مطبوع ندارند نزدیک دیوار بیرونی قرار دهید (بدین ترتیب یک دیوار دو جداره برای قسمت تهویه شونده ایجاد شده است).

ب) اتاق‌ها را بر اساس نیازمندیشان (نوع کار و شغل) دسته‌بندی بپهنه کنید.

- ♦ جداول زمان کاری
- ♦ حرکت پرسنل و اثاثیه
- ♦ اتاق‌هایی که تولید بار حرارتی بالایی دارند نزدیک دیوار بیرونی قرار دهید.

ج) از یک صفحه کمکی برای جداسازی ناحیه‌های مختلف حرارتی می‌توان استفاده نمود.

د) ورودی‌ها باید به سمت محیط‌های بسته یا حفاظت شده در مقابل باد باشند.

ه- انتخاب، کارآمدترین فرآیند گرمایش و سرمایش است

در ساختمان‌سازی جدید، ترکیب ساختمان‌های با عایق‌بندی مناسب و جنبه‌های طراحی انفعالی می‌تواند انرژی گرمایشی را به مقدار زیادی کاهش دهد.

در شرایط آب و هوایی خاص مصرف انرژی سرمایش تبخیری و تر یا خشک از مصرف انرژی تراکمی کمتر است، بررسی استفاده از سرمایش موضعی و یا مرکزی نیز می‌تواند در مواقعی مفید باشد.

♦ در مورد گرمایش نیز می‌توان استفاده از بویلرها و مشعل‌های راندمان بالا، استفاده از اکونومایزر و... را پیشنهاد نمود.

برای یک اندازه خاص موتور، محدوده نسبتاً وسیعی از راندمان (کارایی) موتور الکتریکی وجود دارد. بطور مشابه در محرک‌های موتوری یا پمپ‌های سرعت متغیر، امکان صرفه‌جویی وجود دارد.

و- بکارگیری کارآمدترین تجهیزات

به عنوان مثال، چیلرهای فشرده سازی مکانیکی به سه دسته تقسیم می‌شوند: گریز از مرکز، پیچشی و رفت و برگشتی (پستونی). معمولاً چیلرهای قدیمی از ۰/۸ تا ۱ کیلووات ساعت بر تن راندمان دارند در صورتی که چیلرهای جدید راندمان‌شان تا مقدار ۰/۴۹ KWh/ton افزایش یافته و مصرف انرژی‌شان نصف گردیده است.

ز- بکارگیری مؤثر تجهیزات

استفاده از موتورها در بارگذاری مناسب، تعمیر و نگهداری مناسب تجهیزات، تنظیم مناسب کنترل‌ها، می‌تواند از این دست باشد.

ح- استفاده از مفاهیم طراحی انفعالی

طرح ساختمان (با بازسازی مجدد آن) به طریقی باشد که جریان انرژی به محیط و از محیط را بهینه سازد و از انرژی خورشید و روشنایی روز و دمای هوای خارج، حداکثر استفاده گردد.

ط- بازیافت حرارت

این موضوع خاصه در هوای سرد مهم و دارای ارزش اقتصادی است. در واقع حتی اگر تفاوت درجه حرارت‌های کم و توجیه اقتصادی فرآیند دشوارتر باشد باز هم می‌توان «سردی» را بازیافت نمود.

ی- امکان ذخیره انرژی

ذخیره‌سازی سرمایه به معنی استفاده از انرژی الکتریکی در ساعات غیر پیک برای ایجاد سرمایش و استفاده از سرمایش ذخیره شده در ساعات پیک می‌باشد. این کار می‌تواند با ذخیره‌سازی آب سرد، یخ باشد. ذخیره‌سازی یخ، نیاز به حجم کمتری دارد. این کار می‌تواند موجب کوچک شدن اندازه چیلر در مرحله طراحی و یا نیاز به خرید چیلر یا ظرفیت جدید برای سیستم که نیاز به افزایش ظرفیت دارد گردد. شکل (۴-۲۷) کاهش ظرفیت

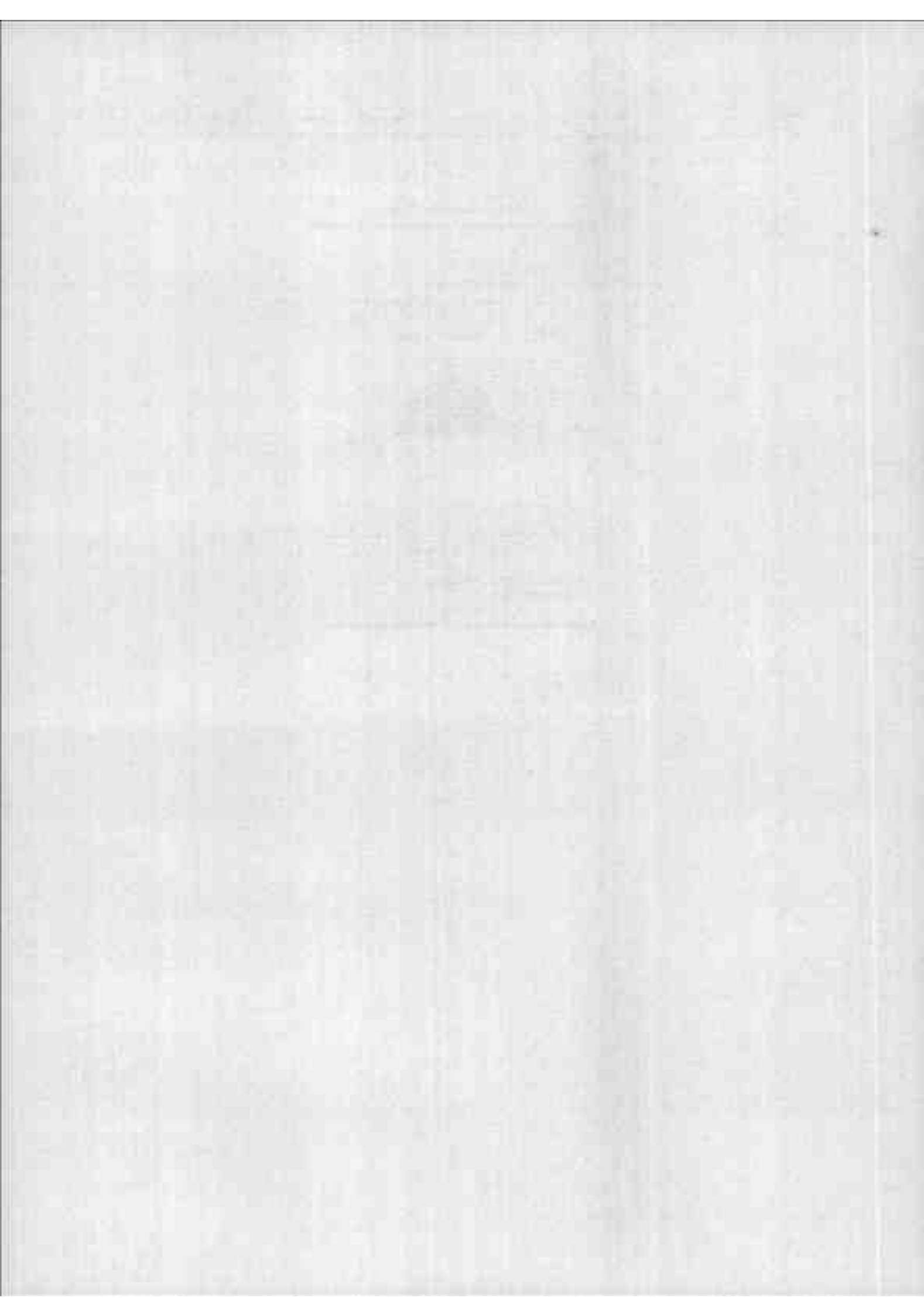
چیلر در صورت امکان ذخیره‌سازی انرژی را نشان می‌دهد.

Partial-Storage Strategy



Source: E Source, Commercial Space Cooling Technology Atlas.

شکل شماره ۴-۴۷: راهبرد ذخیره‌سازی جزئی



فصل ۵

مباحث ویژه در مدیریت انرژی الکتریکی

۵- هارمونیک‌ها^۱

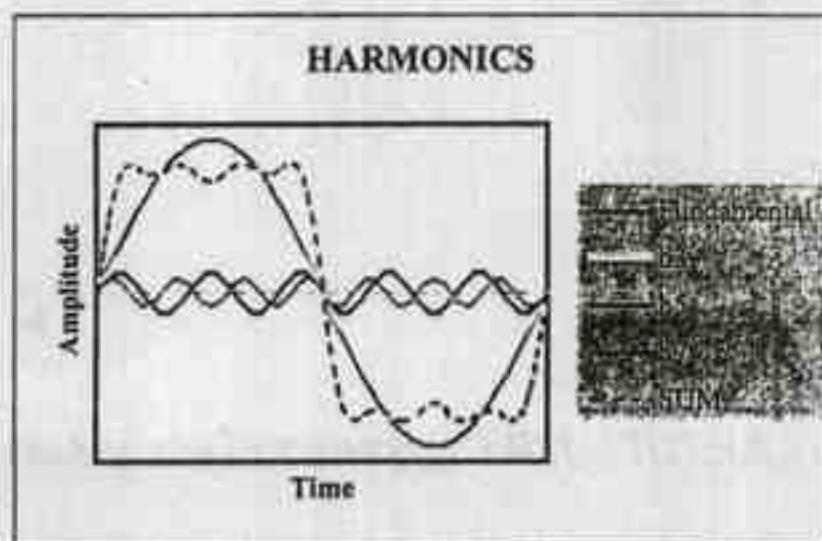
۱-۱- مقدمه

هر موج متناوب (پریودیک) را که با فرکانس f تکرار می‌شود را می‌توان با مجموعه‌ای از موج‌های سینوسی با فرکانس f ، $2f$ ، $3f$ و... بیان نمود که فرمول زیر:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i)$$

به موج سینوسی که فرکانس آن با فرکانس موج اصلی (f) برابر می‌باشد موجی اصلی و بقیه موج‌ها را هارمونیک‌های موج اصلی می‌نامند.

بعضی از موج‌ها ممکن است تنها ترکیبی محدود از چند موج سینوسی باشند. مانند شکل (۵-۱) که موجی را نشان می‌دهد که ترکیبی از موج‌های اصلی و هارمونیک‌های ۳ و ۵ و ۷ می‌باشد. همچنین باید توجه داشت در صورتی که موج کاملاً سینوسی باشد آنگاه یک موج بدون هارمونیک خواهد بود.



شکل شماره ۱-۵: یک موج هارمونیک با هارمونیک‌های پنجم و هفتم

با این مقدمه می‌خواهیم نتیجه بگیریم، در صورتی که به هر دلیل، شکل موج سینوسی ولتاژ و یا جریان برق، دچار اعوجاج و تغییر شکل شود به معنی وجود هارمونیک‌ها در موج اصلی سینوسی بوده و می‌تواند مشکلاتی را در شبکه توزیع و مصرف‌کنندگان بوجود آورد.

علت ایجاد اعوجاج (هارمونیک) در شکل موج ولتاژ و جریان

کوره‌های القایی، کوره قوس الکتریکی، سیستم‌های الکترونیک قدرت، لامپ‌های کم مصرف، کنترل‌کننده‌های دور متغیر، لوازم خانگی مانند تلویزیون و رایانه، شارژرها، دستگاه‌های جوشکاری و بارهای غیر خطی و... جهت بیان میزان اعوجاج شکل موج سینوسی از معیاری بنام خرابی کلی هارمونیک^۱ (THD) که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n a_i^2}}{a_1} \times 100$$

علائم عبارتند از:

a_i : دامنه هر موج سینوسی می‌باشد.

۱-۲- اثر هارمونیک‌ها روی تجهیزات برقی

الف- اثر روی هادی‌ها

در اثر عبور جریان‌های غیر سینوسی از هادی‌ها، دو اثر تحت عناوین:

1. THD: Total Harmonic Distortion

۱- اثر پوستی

۲- اثر پوستی مغناطیسی

روی می‌دهد. اثر پوستی به دلیل توزیع غیر یکنواخت جریان‌های متناوب در هادی‌هاست که راکتانس مغز هادی، نسبت به پوسته آن جریان کمتری را عبور می‌دهد و در نتیجه تلفات و افت ولتاژ افزایش می‌یابد. اثر پوستی مغناطیسی به دلیل ایجاد جریانهای گردابی در هادی‌ها می‌باشد که هم باعث افزایش تلفات می‌گردد و هم اینکه باعث توزیع غیر همگن جریان می‌شود و افزایش فرکانس هارمونیک‌ها، این مسائل را تشدید می‌کند.

افزایش تلفات در هادی‌ها باعث داغ شدن و کاهش عمر، همچنین آثار مکانیکی نظیر افزایش شکم هادی و کاهش استقامت آنها می‌شود.

اثر دیگری که ناشی از هارمونیک‌های مضرب ۳ است، عبور جریان از سیم نول می‌باشد. مجموع هارمونیک‌های مضرب ۳ از جنس مؤلفه صفر و مقدار آن سه برابر هر کدام است. لذا موجب تلفات و نیز برقرار شدن جریان در سیم نول می‌گردد که مشکل ایمنی و کم شدن سطح مؤثر ولتاژ را به همراه دارد. جریان‌های خازنی بیشتر در کابل‌ها مطرح است که در اثر ولتاژهای هارمونیک، نوسانات ولتاژ و بیش‌بودهای ولتاژ ایجاد می‌شود. یکی از مشکلاتی که شرکت‌های برق با آن روبرو هستند ترکیدن سر کابل‌ها و خود کابل‌ها می‌باشد که در اثر عوامل بالا می‌باشد و در محیط‌های هارمونیک باید کابل و دیگر وسایل را در مقادیری کمتر از مقدار نامی بهره‌برداری کرد (یا اصطلاحاً باید آنها را دی ریت^۱ نمود).

ب- اثر روی کلیدها و فیوزها

وقتی جریان هارمونیک با دامنه زیاد از مدار عبور می‌کند باعث عملکرد غیر صحیح کلیدها و فیوزها می‌شود.

- ♦ در کنتاکتورهایی که با کوئل تحریک می‌شوند عبور جریان هارمونیک باعث افزایش دما و عملکرد ولعهای بی‌مثال در جریانی پائین‌تر از جریان قطع می‌گردد.
- ♦ در فیوزها، جریان هارمونیک ممکن است باعث شیفت منحنی عملکرد فیوز شود و در نتیجه باعث عملکرد اشتباه فیوز شود. همچنین در فیوزها مخصوصاً فیوزهای کاردی که عنصر شبکه دارند، در فرکانس‌های بالا، افزایش مقاومت و در نتیجه عملکرد در جریان پائین‌تر را سبب می‌شوند.

ج- اثر روی ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها به عنوان بخش مهمی از سیستم قدرت محسوب می‌شوند و عملکرد صحیح آنها بسیار مهم است لذا اثرات آلودگی‌های توان، روی آنها را در زیر بررسی می‌نمایم.

موج هارمونیک در ترانسفورماتورها باعث ایجاد مسأله تشدید احتمالی بین سیم‌پیچ‌های ترانس‌ها و خازن‌های شبکه، ایجاد لرزش در هسته و سیم‌پیچ‌ها می‌شود. با افزایش تلفات هسته حرارت اضافی در ترانس تولید می‌شود لذا باید آن را در قدرت کمتری بکار گرفت. بخش مهم تلفات هسته بخاطر جریان گردابی می‌باشد چون با P_B^2 متناسب است و اگر هارمونیک و یا عدم تعادل ولتاژ وجود داشته باشد خیلی بیشتر از تلفات هیستریزی اثر می‌گذارد به همین منظور یک ضریب برای کاهش توان در محیط‌های آلوده به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$K_1 = \frac{\sum_{h=2}^n I_n h^2}{\sum I_n^2}$$

این ضریب معرف آن است که چقدر باید ظرفیت ترانس را کاهش دهیم.

$$P_T = \frac{P_n}{K_T} \dots K_T > 1$$

در محیط‌هایی که آلودگی هارمونیک دارند باید از ترانس‌های مخصوص استفاده نمود که معمولاً حجم و وزن آنها نسبت به نوع معمولی ۱۵ درصد بیشتر می‌باشد و قیمت آنها معمولاً ۲ برابر نوع معمولی آنها می‌باشد. معمولاً خنک‌کنندگی سه مرحله‌ای دارند: با (روغن - آب - هوا).

♦ شکست عایقی (حالت‌های گذرا)

تعداد دور ترانس بر حسب اینکه چقدر می‌توانند ولتاژ بین هر دو را تحمل کنند تعیین می‌شود و در حالت پایدار، توزیع ولتاژ یکنواخت بین دورها خواهیم داشت، اگر اضافه ولتاژهای گذرا پیش آید، توزیع ولتاژ یکنواخت نبوده و ممکن است که ولتاژ اعمالی به بعضی از دورهای ابتدایی از ولتاژ شکست آنها هم بیشتر شود و بدون نیاز به حرارت بیشتر یا اضافه ولتاژهای بیشتر، شکست عایقی حاصل شود. لذا کلید زنی و برق آسمان می‌تواند باعث سوختن ترانس‌ها شوند.

♦ پدیده فروشدید (رزونانس)

در ولتاژهای هارمونیک مقدار X_L ترانس تغییر می‌کند لذا ممکن است در بعضی هارمونیک‌ها رزونانس بین سلف معادل ترانس و خازن‌های شبکه حاصل شود که باعث تقویت ولتاژ و کمک به شکست عایقی می‌شود.

♦ نوسانات ورقه‌ها و سیم‌ها

در اثر عبور جریان‌ها و شارهای هارمونیک ممکن است تنش‌های اعمالی به ورقه‌ها و سیم‌ها باعث ایجاد نوسان شود که این لرزش‌ها باعث ایجاد سر و صدا و ازدیاد تلفات مکانیکی و در نتیجه ازدیاد حرارت ترانس می‌شوند.

♦ مؤلفه‌های صفر و هارمونیک سوم در ترانس سه فاز

اگر اتصال ترانس به گونه‌ای باشد که جریان هارمونی سوم نتواند عبور کند، (مثل اتصال ستاره ایزوله) آنگاه شار، مؤلفه هارمونی سوم پیدا می‌کند و در نتیجه ولتاژ مؤلفه هارمونی سوم پیدا می‌کند. عدم عبور مؤلفه صفر جریان، باعث شیفست خشی در ترانس می‌شود، لذا ولتاژهای فاز ترانس تغییر می‌کنند و ممکن است در چنین شرایطی رله‌های زیر ولتاژ نامی ترانس عمل کنند و باعث خاموشی و قطعی ولتاژ مصرف‌کننده شوند. اگر یک طرف ترانس هم مثلث باشد باعث حذف مؤلفه سوم ولتاژ در ولتاژ خط خواهد شد ولی جریان هارمونی سوم شدیدی در اتصال مثلث عبور خواهد کرد که باعث ازدیاد تلفات شده و ظرفیت سیم‌پیچ را کم می‌کند و لذا باید از ولتاژ نامی ترانس صرف‌نظر شود (دی ریت).

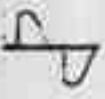
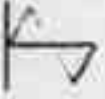
♦ مؤلفه dc در ترانس

اگر جریان به دلیلی دارای مؤلفه dc گردد در این صورت ترانس برای جریان dc مثل یک صافی عمل می‌کند و لذا شار، مؤلفه dc پیدا می‌کند و باعث به اشباع رفتن ترانس و حرارت اضافی و کاهش عمر ترانس و... می‌گردد ولی مهم‌تر از همه باعث غیر سیئوسی شدن ولتاژ هم می‌شود بخصوص در ترانس‌های خاص مثل ترانس‌های جریان و ولتاژ (CT & PT) این حالت می‌تواند عملکرد ترانس را به شدت مختل کند. لذا مؤلفه dc یکی از بدترین پدیده‌های کیفیت توان و بخصوص برای ترانس‌هایی که جزء مهمی از شبکه هستند، می‌باشد.

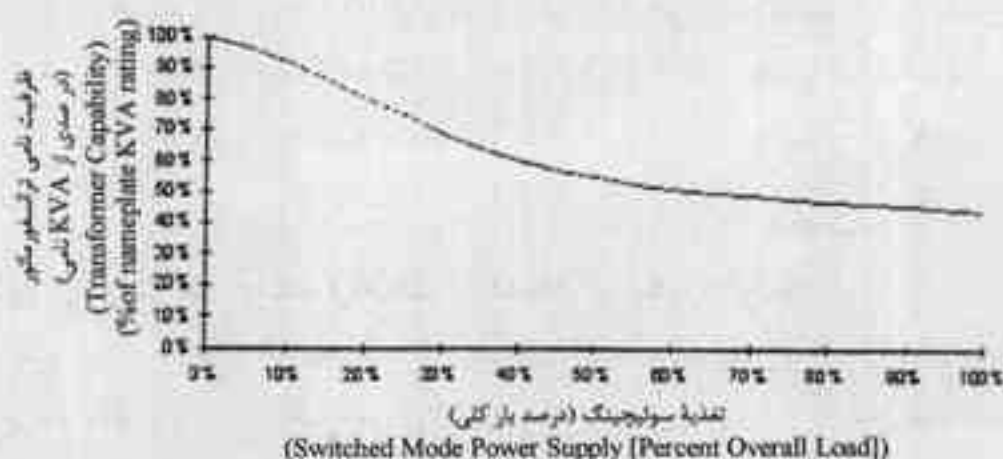
مثالی از اثرات هارمونیک بر تلفات و راندمان ترانسفورماتورها

همانطور که در جدول (۵-۱) دیده می‌شود در شرایطی که بار یک ترانسفورماتور تنها شامل هارمونیک فرکانس اصلی باشد تنها ۲/۵ درصد تلفات مسی و ۲/۵ درصد تلفات آهنی وجود دارد در حالی که با افزایش هارمونیک بودن جریان، به علت آنکه تلفات آهن شامل تلفات هیستریس و تلفات جریان گردابی تقریباً با مجذور فرکانس متناسب است، این تلفات به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در اینجا فرض شده است که تلفات مسی ثابت باقی می‌ماند البته مقاومت سیم پیچی‌ها نیز به علت اثرات پوستی افزایش می‌یابد که به معنای افزایش تلفات مسی است. به هر ترتیب می‌بینیم در صورتی که تمام جریان هارمونیک باشد راندمان ترانسفورماتور تا ۶۷ درصد کاهش می‌یابد.

جدول شماره ۵-۱: خطاهای حاصل از نوع سنجش برای موج‌های معروف

Wave type	Calculation	Sine Wave (%)	Square Wave (%)	Distorted Wave (%)	Light Dimmer (%)	Triangle Wave (%)
						
Peak method	peak: L-L	100	82	101	111	121
average responding	avg. sig. x L-L	100	100	60	81	96
True rms	rms average	100	100	100	100	100

در شکل (۵-۲) کاهش راندمان یک ترانسفورماتور وقتی که بار آن یک منبع تغذیه سوئیچینگ باشد دیده می‌شود. همانطور که می‌بینیم اگر تمام بار این ترانس منبع تغذیه سوئیچینگ باشد راندمان ترانس به ۴۰ درصد نیز می‌رسد که با توجه به افزایش تلفات آهنی قابل توجه است.



شکل شماره ۵-۲: تغییرات ظرفیت نامی ترانسفورماتور در صورتی که بار آن یک سوئیچینگ باشد

۵- اثر بر روی ماشین‌های الکتریکی

تمام پدیده‌های مطرح شده در ترانس‌ها برای موتورهای نیز صادق می‌باشند به علاوه اینکه در موتورهای متناوب با درجه هارمونیک، راکتانس ناشی هم افزایش می‌یابد.

اگر موتور با یک منبع ولتاژ هارمونیک تغذیه شود برای کاهش جریان هارمونیک بهتر است که موتور دارای امپدانس ناشی بالاتری باشد و اگر موتور از یک منبع جریان هارمونیک تغذیه شود، باید جهت کاهش هارمونیک ولتاژ از موتور با راکتانس ناشی کمتر استفاده شود.

امواج غیر سینوسی هارمونیک در ماشین‌های الکتریکی، تلفات اضافی با گشتاورهای ضرباتی، لرزش و

صدای زیاد تولید می‌کند و تلفات ایجاد شده در روتور هم ایجاد می‌کند که باعث داغ شدن روتور می‌شوند. لذا موتور باید در ظرفیتی کمتر از مقدار نامی بکار رود.

ه- اثر روی خازن‌ها

در بسیاری از موارد برای بهبود عملکرد شبکه جبران توان راکتیو و اصلاح ضریب توان در بارهای مختلف، در قسمت‌هایی از شبکه، خازن‌گذاری می‌گردد، طراحی این خازن‌ها برای فرکانس مؤلفه اصلی شبکه ($f=50 \text{ Hz}$) انجام می‌شود. خازن‌ها نسبت به فرکانس بسیار حساس هستند و با فرض ثابت بودن C در اثر تغییر فرکانس، خازن‌ها در فرکانس‌های بالا مثل چاه عمل می‌کنند و لذا با وجود مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ با دامنه کم ولی فرکانس بالا، جریان عبوری از خازن، حتی از مقدار نامی هم می‌تواند بیشتر شود و باعث سوختن خازن و یا فیوز آن گردد. رابطه مربوطه:

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = K \frac{1}{f} \quad , \quad I_n = n(V_n)$$

یعنی اگر هارمونیک هفتم ولتاژ دارای ۱۵٪ دامنه مقدار نامی باشد، مقدار جریان ناشی از این هارمونیک دامنه ۱۰۵٪ دارد که این امر باعث سوختن فیوز خازن می‌شود. در برخی از فرکانس‌ها ممکن است بین خازن و سلف شبکه رزونانس پدید آید که در نتیجه آن ولتاژ و جریان زیادی ممکن است تولید شده و باعث سوختن خازن شود. در اثر پدیده‌های گذرای ولتاژ، چون پدیده‌های فرکانس بالا می‌باشند لذا خازن مثل اتصال کوتاه عمل می‌نماید و سریعاً از بین می‌رود.

و- اثر روی لامپ‌ها

۱- لامپ‌های رشته‌ای: این لامپ‌ها در اثر تغییرات ولتاژ بخصوص اضافه ولتاژ شدیداً کاهش عمر پیدا می‌نمایند. زیرا در اثر افزایش ولتاژ جریان لامپ و دمای آن افزایش یافته و باعث تبخیر سطحی رشته سیم و در نتیجه کاهش شدید عمر لامپ می‌گردد. نور لامپ نیز در اثر نوسانات ولتاژ تغییر می‌نماید و پدیده‌ای به نام چشمک‌زنی^۱ بوجود می‌آید که می‌تواند آزاردهنده باشد.

۲- لامپ‌های تخلیه‌ای (گازی): لامپ‌های تخلیه‌ای هم جزء آلوده‌کننده‌ها هستند و هم شدیداً به آلودگی حساس می‌باشند. اگر دامنه ولتاژ از حدی کمتر شود ممکن است که اصلاً لامپ روشن نشود. هارمونیک‌های ولتاژ روی خازن و بالاست لامپ‌ها آثار منفی می‌گذارند.

ز- اثر روی دستگاه‌های اندازه‌گیری

کمیت‌های مورد سنجش در وسایل اندازه‌گیری ممکن است بیک موج، متوسط موج و یا مقدار مؤثر موج باشند از نظر ساختمانی نیز با الکترومکانیکی (عقربه‌ای) و یا استاتیکی (الکترونیکی، دیجیتالی) می‌باشد.

تنظیم یا کالیبراسیون وسایل اندازه‌گیری در حالت ac بر اساس موج سینوسی ولتاژ و جریان با فرکانس مشخصی انجام می‌شود و در حالت dc بر اساس موج dc صاف می‌باشد لذا میزان و جهت خطای ایجاد شده در دستگاه‌های اندازه‌گیری و بویژه کتورها به نوع دستگاه، روش کار، جهت فلوی هارمونیک و دلتا هارمونیک بستگی دارد.

برای ایجاد یک مؤلفه توان، باید هم مؤلفه جریان و هم مؤلفه ولتاژ آن موجود باشند:

$$P_{total} = V_{dc} I_{dc} + V_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

لذا آثار آلودگی روی وسایل، نیاز به شناخت کامل دستگاه‌ها و نوع بدیده‌ها دارد.

وسایلی که پیک شکل موج را می‌سنجند آن را در $1/\sqrt{2}$ ضرب می‌نمایند تا مقدار مؤثر موج بدست آید و وسایلی که مقدار میانگین را می‌سنجند آنرا در $1/11$ ضرب می‌نمایند تا مقدار مؤثر موج بدست آید و در هر دوی این محاسبات برای سینوسی کامل می‌باشد در حالیکه اگر شکل موج تغییر کند خطای این اندازه‌گیری‌ها در جدول (۴-۵) برای شکل موج‌های معروف آمده است. مشاهده می‌شود در حالت‌هایی که پیک ولتاژ و یا میانگین موج اندازه‌گیری می‌شود و در یک ضریب ثابت ضرب می‌شود، اگر شکل موج سینوسی نباشد خطاهای زیادی ایجاد می‌شود.

کتورها که بر اساس گشتاور محرک و مقاوم توسط جریان گردابی در دیسک رتور عمل می‌نمایند، در برابر جریان‌های غیر سینوسی دقت خود را از دست می‌دهند و معمولاً توان‌های هارمونیک را بیشتر از مقدار واقعی اندازه می‌گیرند این خطای اندازه‌گیری که معمولاً بین ۶ تا ۷ درصد است با کاهش ضریب توان و وجود مؤلفه dc نیز افزایش می‌یابد.

جدول شماره ۵-۲: تغییرات راندمان ترانسفورماتور در محیط‌های هارمونیکی به ازای THDهای مختلف

راندمان ترانسفورماتور	تلفات آهنی	تلفات مسی	درصد از بار الکتریکی
۹۵,۰٪	۲,۵٪	۲,۵٪	۰٪
۹۲,۳٪	۵,۲٪	۲,۵٪	۱۰٪
۸۹,۴٪	۸,۰٪	۲,۵٪	۲۰٪
۸۶,۶٪	۱۰,۸٪	۲,۵٪	۳۰٪
۸۳,۹٪	۱۳,۵٪	۲,۵٪	۴۰٪
۸۱,۱٪	۱۶,۳٪	۲,۵٪	۵۰٪
۷۸,۳٪	۱۹,۱٪	۲,۵٪	۶۰٪
۷۵,۵٪	۲۱,۹٪	۲,۵٪	۷۰٪
۷۲,۸٪	۲۴,۶٪	۲,۵٪	۸۰٪
۷۰,۰٪	۲۷,۴٪	۲,۵٪	۹۰٪
۶۷,۲٪	۳۰,۲٪	۲,۵٪	۱۰۰٪

ج- تأثیر پروله‌های حفاظتی

تأثیرپذیری یک رله، نسبت به اعوجاج به اصول کار رله بستگی دارد. یک وسیله حفاظتی در بعضی مواقع خود می‌تواند باعث اعوجاج شود.

ترانسفورماتورهای حفاظتی وقتی در معرض اشباع قرار می‌گیرند می‌توانند باعث اعوجاج شوند. ترانس‌های جریان^۱ (CT) وقتی در معرض یک تغییر ناگهانی موج ورودی مانند خطا قرار می‌گیرند، باعث اعوجاج در موج می‌شوند و به دلیل پاسخ فرکانسی ضعیف در اثر انتخاب غیر صحیح بار یا تنظیم داخلی می‌توانند باعث اعوجاج موج شوند. ترانس‌های ولتاژ خازنی^۲ (CVT) که در سیستم‌های ولتاژ بالا استفاده می‌شوند می‌توانند عامل تولید گذراهای اضافی باشند.

ترانس‌های ولتاژ^۳ (PT) در صورتی که در ولتاژی بالاتر از مقدار نامی بکار گرفته شوند به اشباع می‌روند و باعث ایجاد اعوجاج می‌شوند.

1. Current Transformer

2. Capacitor Voltage Transformer

3. Potential Transformer

ح-۱- رله‌های الکترومکانیکی

این رله‌ها شامل دو دسته زیر می‌باشند:

- ♦ رله‌های القایی سینگل‌فازی و فنجان‌ی که جهت عمل لحظه‌ای ساخته می‌شوند.
- ♦ رله‌های القایی با دیسک جهت ایجاد تأخیر.

رله‌هایی که برای یک فرکانس ساخته شده‌اند، فقط وقتی که توسط سیگنال مربوطه تحریک شوند زمان تأخیر قابل پیش‌بینی و مشخصی دارند و وقتی موج دارای هارمونیک و اعوجاج می‌شود زمان عملکرد آنها ممکن است زیادتر یا کمتر از مقدار تنظیم شده شود بنابراین رله‌های الکترومکانیکی بسته به ساختمان آنها و اجزاء مختلف و مشخصات الکتریکی و مغناطیسی حتی اگر مشخصه جریان- زمان آنها مشابه باشد در برابر اعوجاج عکس‌العمل‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

رله‌های الکترومکانیکی با دو ورودی علاوه بر تأثیر پذیری‌های ذکر شده قبلی، عوامل دیگری مثل فاز سیگنال‌های هارمونیک نیز در آنها اختلال ایجاد می‌کنند.

در اینگونه رله‌ها که شامل رله‌های جهتی و انواع رله‌های دیستنس هستند، در سیگنال ورودی با فرکانس‌های مختلف، گشتاور عمل‌کننده مثبت یا منفی در رله ایجاد می‌شود. لذا اگر یکی از ورودی‌ها معوج شود، می‌تواند روی عملکرد رله‌های دو ورودی اثر بگذارد.

در رله‌های دیستنس با توجه به اینکه اصول طراحی مختلفی برای آنها وجود دارد بنابراین بیان یک حالت کلی برای همه آنها عملی نمی‌باشد. برای مثال در رله‌هایی که بر اساس امپدانس مشابه عمل می‌کنند، این امپدانس‌ها معادل امپدانس خط هستند و اساساً رله باید بتواند در مواقع موج معوج جریان و ولتاژ به خوبی عمل نماید ولی چون اعوجاج ایجاد شده توسط ترانس‌های جریان، ترانس‌های ولتاژ و مخصوصاً ترانسهای ولتاژ خازنی فاقد تشابه با اعوجاج روی خط است، ممکن است بر دقت رله دیستنس اثر بگذارد.

ح-۲- رله‌های استاتیکی

در این رله‌ها نیز پاسخ به موج‌های غیر سینوسی با توجه به ساختمان رله متفاوت است. رله‌های استاتیکی جریان اضافی، ممکن است ترانسفورماتورهای اشباع شده را جهت محدود نمودن انرژی انتقالی به مدارهای الکترونیکی و ایجاد شرایط مناسب برای ساختن یک منحنی مشخصه معین در ورودی خود مورد استفاده قرار دهند، که این امر باعث ایجاد اعوجاج موج در داخل رله و نفوذ این اعوجاج با اعوجاج‌های خارجی رله گردد و بر پاسخگویی رله به یک سیگنال معوج اثر می‌گذارد.

اکثر رله‌های استاتیک دارای یک ترانسفورماتور ورودی جهت تنظیم سیگنال در حد مجاز مدارهای الکترونیکی می‌باشند که این ترانسفورماتورها معمولاً دارای فاصله هوایی در خود بوده که چون به صورت مشتق‌گیری عمل می‌کنند باعث حساسیت زیاد ترانسفورماتورها به فرکانس‌های بالا می‌شوند.

ط - اتلاف انرژی الکتریکی و افزایش کیلووات ساعت مصرفی و کیلووات دیماند

هارمونیک جریان بدون استفاده، در کابل‌های انتقال و تجهیزات اتلاف می‌شود، همین طور وجود هارمونیک سبب افزایش تلفات و کاهش راندمان تجهیزاتی مانند ترانسفورماتورها و موتورها می‌شود. به همین دلیل با وجود هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، هم کیلووات ساعت مصرفی و هم کیلووات دیماند افزایش می‌یابد.

ی - افزایش تعمیر و نگهداری تجهیزات

با وجود هارمونیک که سبب افزایش تلفات و دمای تجهیزات می‌شود، عمر تجهیزات کاهش یافته و در دوره‌های کوتاه‌تری نیاز به تعمیر و نگهداری پیدا می‌کنند. به این ترتیب هزینه‌های تعمیر و نگهداری به هزینه‌های دیگر افزوده می‌شود. آثار هارمونیک در افزایش میزان خرابی تجهیزاتی مانند ترانسفورماتورها، ماشین‌های الکتریکی و خازن‌های الکتریکی در بسیاری از کارخانه‌ها کاملاً محسوس است و متأسفانه سالانه مقدار زیادی از توقف خطوط تولید در نتیجه این گونه خرابی‌ها به وجود می‌آید.

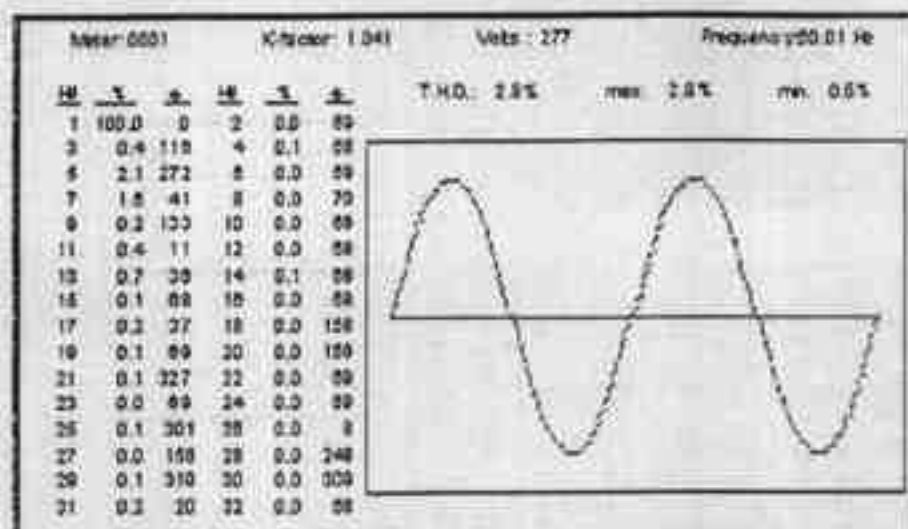
س - کارکرد نامطمئن تجهیزات الکترونیکی و ژنراتورها

تجهیزات الکترونیکی برای کار در فرکانس اصلی طراحی شده‌اند و هرگونه تغییر در مشخصات تغذیه ورودی در کارکرد آنها تأثیر خواهد داشت. ژنراتورها نیز با فیدبک گرفتن از ولتاژ خروجی به تثبیت ولتاژ می‌پردازند که در صورت امواج این ولتاژ و نوسان آن این فیدبک تحت تأثیر قرار گرفته و خود باعث نوسان ولتاژ خروجی ژنراتور می‌شود.

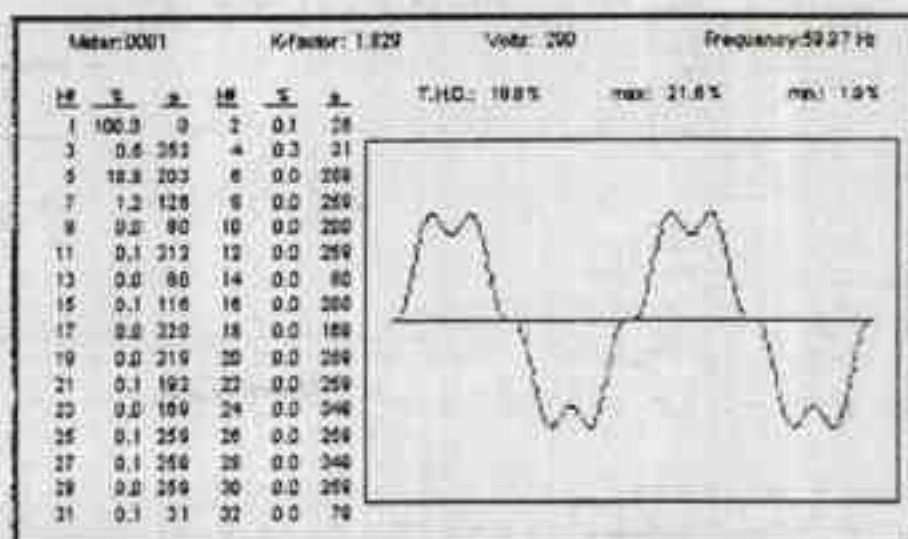
۱-۳- اثرات خازن‌ها بر روی میزان هارمونیک

از آنجا که امپدانس خازن‌ها با فرکانس رابطه معکوس دارد، امپدانس خازن‌ها با افزایش فرکانس به شدت کاهش می‌یابد که خازن را به منبع خوبی برای جذب هارمونیک تبدیل می‌کند. وجود خازن در یک سیستم الکتریکی مانند یک کارخانه امپدانس ورودی آن سیستم را کاهش داده و سبب می‌شود که کارخانه، به محل خوبی برای جذب هارمونیک تبدیل شود. در شکل (۵-۲) ولتاژ یک سیستم واقعی در حضور خازن و بدون حضور آن را مشاهده می‌کنیم همانطور که دیده می‌شود با آمدن خازن در مدار، خرابی کلی هارمونیک (THD) سیستم نا ۲۱/۶ درصد افزایش یابد.

به همین ترتیب می‌بینیم که جریان سیستم نیز با وجود خازن به شدت هارمونیک می‌شود که علت اصلی آن ایجاد تشدید خازن با سلف ترانس و سایر سلف‌های موجود در مدار است. همانطور که در شکل (۵-۳) دیده می‌شود بر خلاف تصور که گمان می‌رود خازن با حذف جریان راکتیو، موجب کاهش اندازه مؤثر جریان می‌شود، در اینجا با وجود خازن جریان مؤثر از ۱۷۱۶ تا ۲۰۳۳ آمپر افزایش می‌یابد که علت آن وجود جریان‌های هارمونیک و تقویت آنها است. در نتیجه افزایش تلفات و متعاقب آن افزایش مصرف انرژی را به دنبال خواهد داشت.

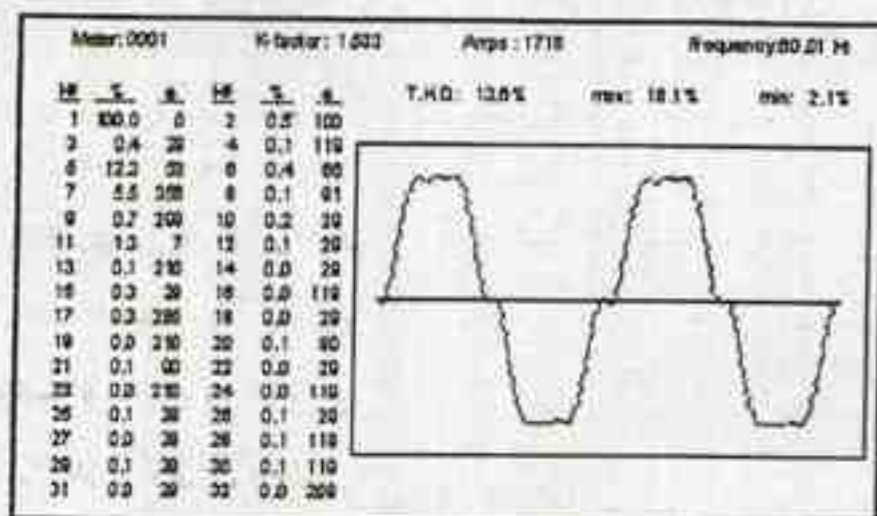


ولتاژ یک کارخانه بدون حضور خازن

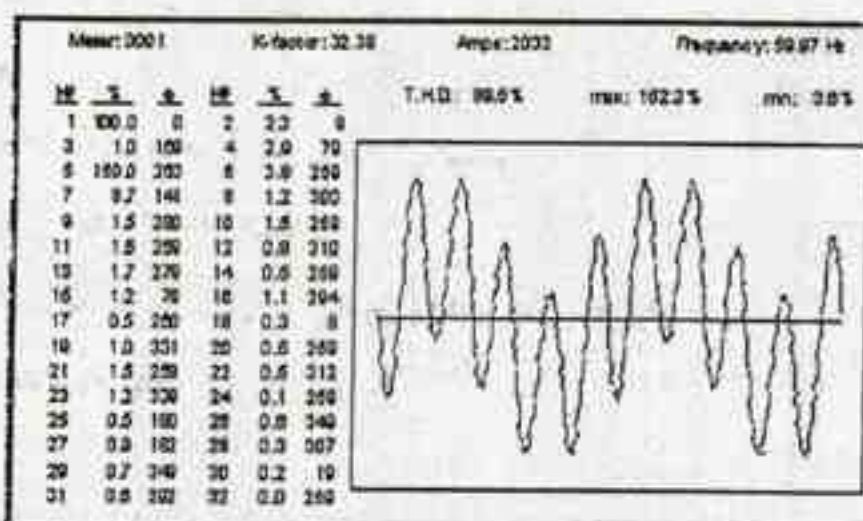


ولتاژ یک کارخانه با وجود خازن

شکل شماره ۳-۵: ولتاژ یک کارخانه در حالت با و بدون خازن



جریان یک کارخانه بدون حضور خازن



جریان یک کارخانه با حضور خازن

شکل شماره ۴-۵: جریان یک کارخانه در حالت با و بدون خازن

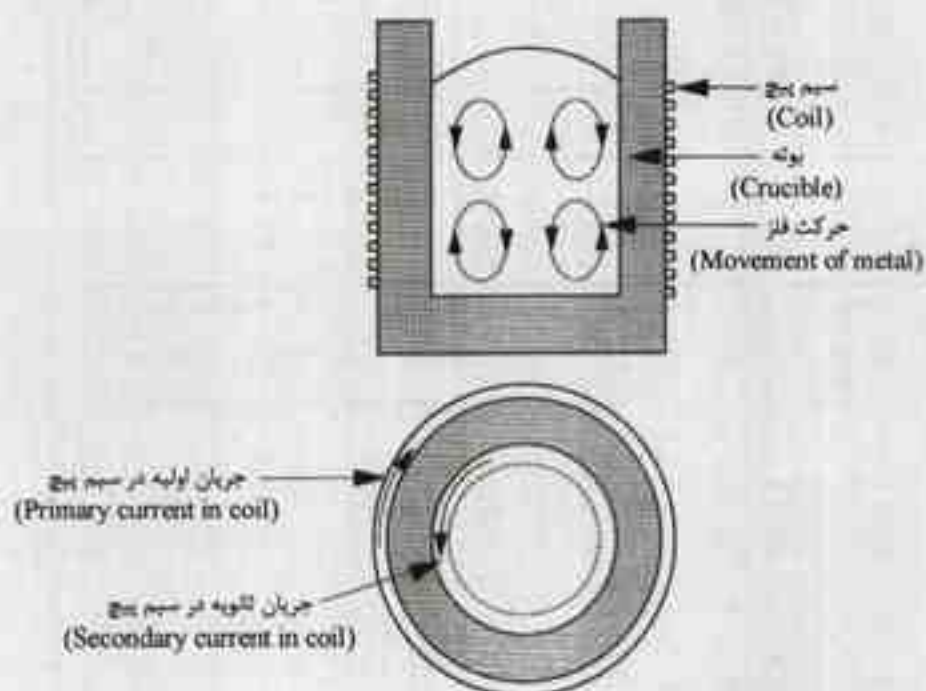
۲- بارهای مخصوص - کوره های القایی

۲-۱- مشخصات کوره های القایی

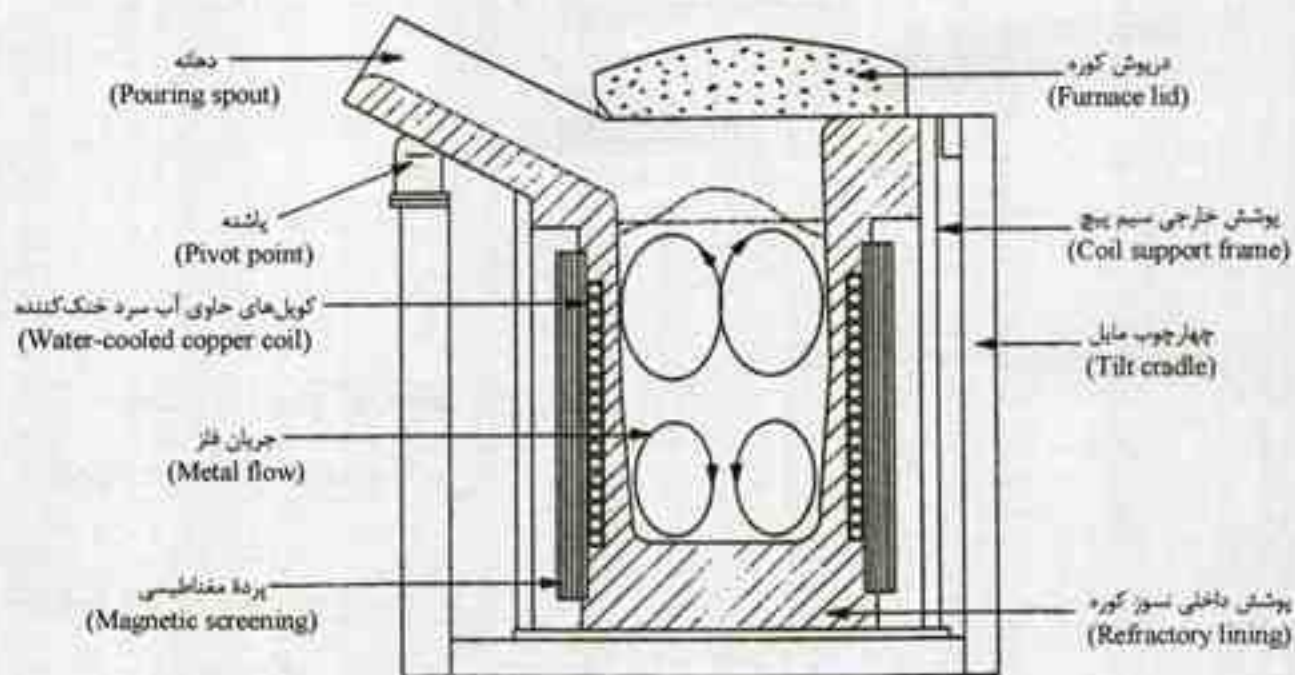
اساس کار این کوره ها بر مبنای گرمایش حاصل از جریان القایی است که در اثر القای الکترو مغناطیسی روی فلز داخل کوره به وجود می آید. این القای الکترومغناطیسی در اثر میدان مغناطیسی ناشی از سیم پیچ کوره (سیم پیچ اولیه) می باشد [شکل های (۵-۵)، (۵-۶)، (۵-۷)].

در مقایسه با سایر کوره ها، کوره های القایی دارای مشخصات زیر است:

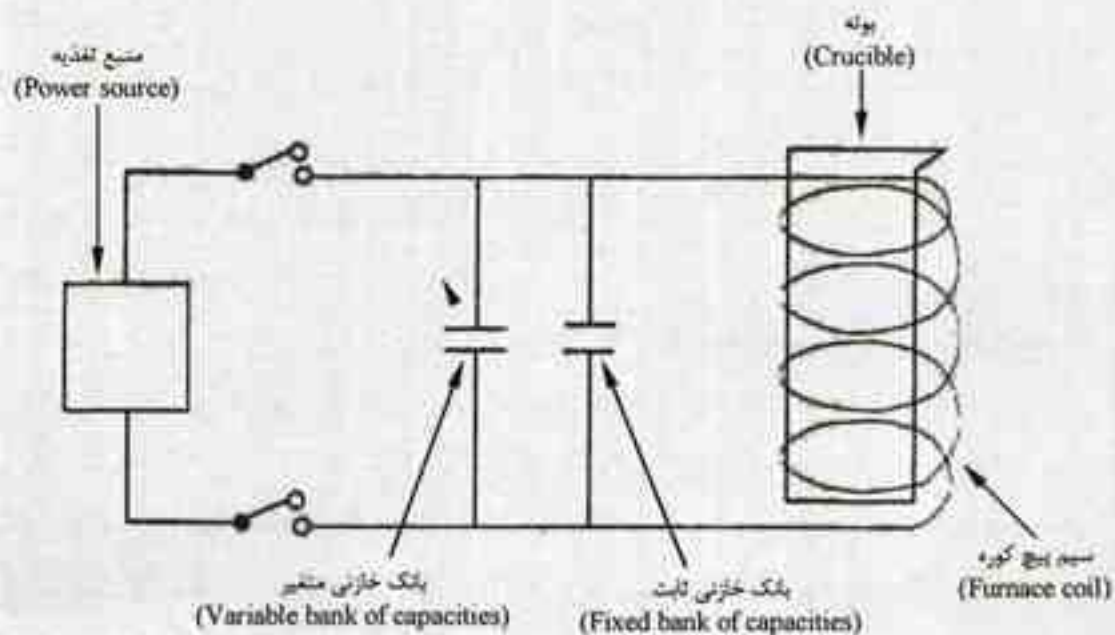
- الف) رانندگی حرارتی آن بدلیل گرمایش مستقیم مواد در اثر القای الکترو مغناطیسی بالاست.
- ب) بدلیل اینکه سوخت فسیلی در این کوره استفاده نمی شود انتشار دی اکسید کربن در آن وجود ندارد.
- ج) تلفات فلز بدلیل اکسیداسیون خیلی کم است و این بدلیل گرمایش بدون هوا است.
- د) کنترل دما در آن ساده است.
- هـ) کوره‌های القایی بدلیل تمرکز انرژی و نیاز به جای کمتر برای نصب نسبت به سایر کوره‌ها، گزینه مناسب‌تری برای ذوب در دماهای بالا هستند.



شکل شماره ۵-۵: کارکرد کوره‌های القایی بدون هسته با مبنای عملکردی ترانسفورماتورها

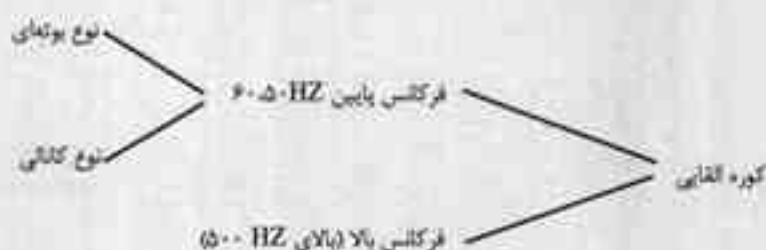


شکل شماره ۵-۶: شکل کلی یک کوره القایی بدون هسته



شکل شماره ۵-۷: مدار یک کوره القایی بدون هسته

از نظر ساختار و فرکانس اعمالی کوره‌های القایی به انواع زیر تقسیم می‌شوند:



۲-۲- موازنه انرژی در کوره‌های القایی (شکل ۵-۸)

تلفات الکتریکی در کوره‌های القایی:

- ترانسفورماتور
- مبدل فرکانسی
- کابل‌های ارتباطی
- سیم پیچ

تلفات سیم پیچ به نسبت سایر تلفات، اساسی‌تر است و این تلفات به ظرفیت کوره بستگی دارد.

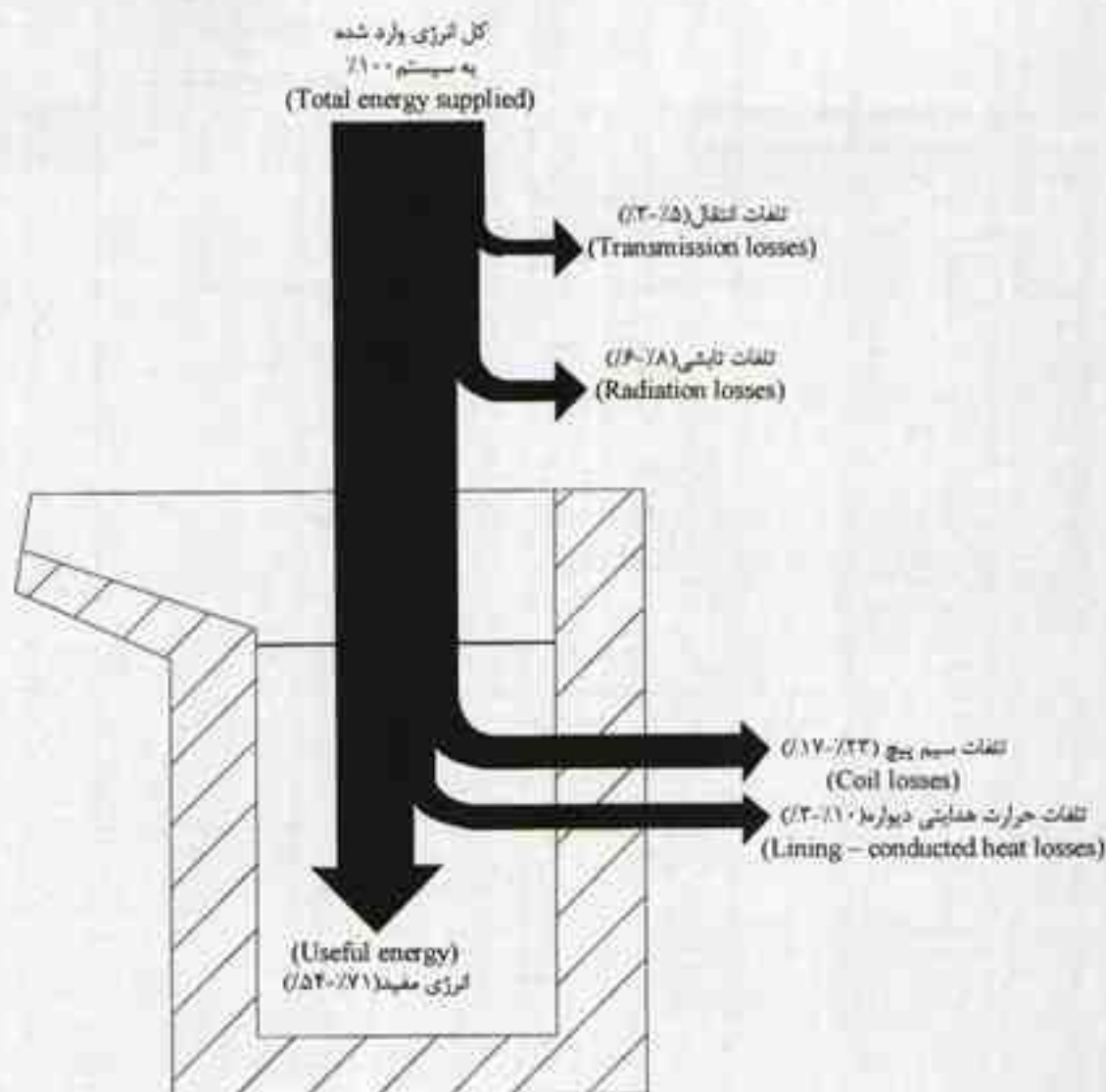
تلفات حرارتی در کوره‌های القایی:

- تلفات هدایتی ناشی از فولاد حرارت از دیواره کوره به سیم پیچ
- تلفات تابشی (شعشعی) ناشی از سطح فلز مذاب
- تلفات سرباره

راندمان حرارتی کوره های القایی فرکانس بالا (۷۸-۶۰) کمی بیشتر از راندمان حرارتی کوره های القایی فرکانس شبکه (۷۱-۵۸) است.

کوره‌های القایی فرکانس شبکه (پایین) دارای تلفات حرارتی بالا و کوره‌های القایی فرکانس بالا دارای تلفات الکتریکی بالاست. دلیل این امر می‌تواند پایین بودن دانسیته قدرت و بالا بودن زمان ذوب در کوره القایی فرکانس شبکه باشد که طولانی بودن زمان، سبب افزایش تلفات حرارتی در این کوره می‌شود.

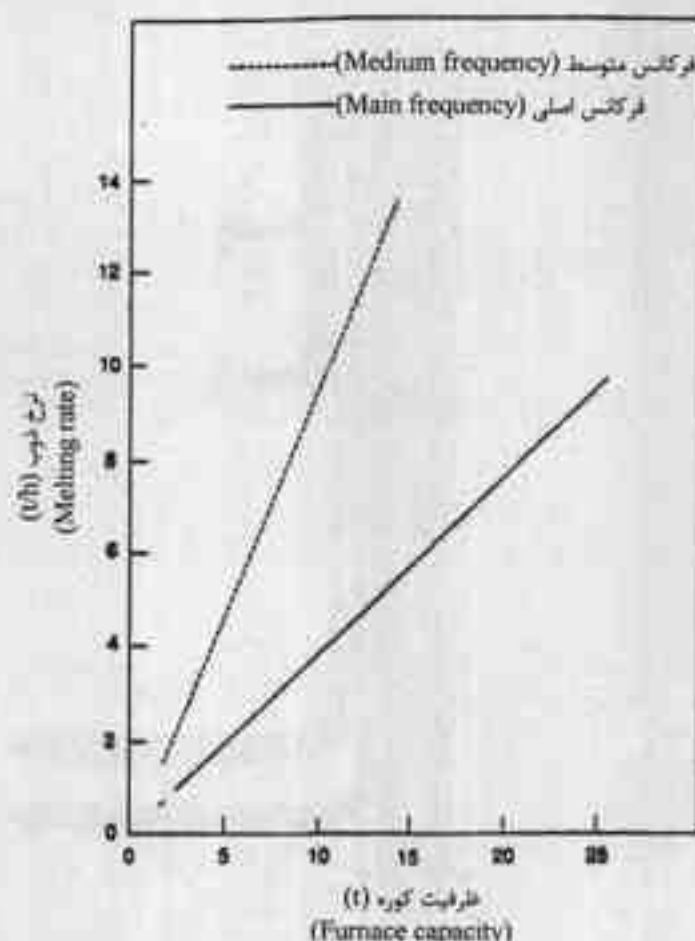
بر عکس بالا بودن دانسیته قدرت و نیز کوتاه بودن زمان ذوب، دلیل پایین بودن تلفات حرارتی کوره القایی فرکانس بالا بوده و دلیل بالا بودن تلفات الکتریکی در این کوره به سبب وجود سیستم مبدل فرکانس است.



شکل شماره ۵-۸: تلفات انرژی در یک کوره القایی بدون هسته از نوع فرکانس اصلی

۳-۲- نرخ توان مصرفی

انرژی الکتریکی مورد نیاز برای ذوب هر تن فلز با افزایش ظرفیت کوره تقریباً به میزان ۱۲ تا ۱۵ کیلووات ساعت کاهش می‌یابد [شکل (۵-۹)]. پس از آن انرژی مصرف در 610 kWh/Ton بدون تغییر باقی می‌ماند. نرخ انرژی مصرفی در کوره های با ظرفیت پایین (۱ تا ۳ تن) بالغ بر 700 kWh/Ton است.



شکل شماره ۵-۹. رابطه بین نرخ ذوب و ظرفیت کوره

۴-۲- راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در کوره‌های القایی

الف- بهبود راندمان حرارتی از طریق بهبود کوره

بهبود کارایی انرژی در سمت قدرت، مانند راندمان تبدیل فرکانس، خازن‌گذاری برای بهبود ضریب توان، طراحی صحیح سیم پیچ (کوئل) نمی‌تواند چندان در اختیار مصرف‌کننده قرار گیرد. ولی مشخصات ویژه کوره بایستی کاملاً درک گردد تا تصمیم صحیح در مورد نوع مواد، راندمان و شکل مواد بارگیری (شارژ) شونده برای ذوب، مقدار ذوب، نحوه استقرار تجهیزات کارگاه ریخته‌گری و نحوه ارتباط با خط ذوب ریزی اتخاذ گردد.

ب- محل استقرار تجهیزات

محل قرارگیری کوره باید آنچنان باشد که کمترین فاصله با بانک خازنی تصحیح ضریب توان داشته باشد. داشتن این فاصله حداقل، کاهش تلفات کابل را تضمین می‌نماید چون جریان خیلی زیادی بین آن دو برقرار است.

ج- فرکانس

(I) اثر پوستی

جریان القایی بطور متمرکز در سطح موادی که باید ذوب شوند جریان می‌یابد. این تمرکز جریان یا افزایش فرکانس قابل توجه می‌شود که نتیجه آن بهبود راندمان حرارتی است.

قطر یا ضخامت مواد ذوب شونده در کوره با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. هنگامی که چدن در کوره القایی فرکانس بالا ذوب می‌شود، هیچگونه محدودیتی در اندازه آن وجود ندارد ولی در کوره های القایی فرکانس شبکه، شروع ذوب از حالت سرد باید با استفاده از بلوک‌های استارت^۱ باشد و ذوب پیوسته با نگه داشتن پای مذاب در کوره انجام می‌شود.

(II) اثر تلاطم^۲

جریان‌های القا شده در فلز مذاب که در اثر جریان جاری در سیم پیچ ایجاد شده از نظر جهت با جریان پدید آورنده خود مخالفت می‌کند و لذا این مسئله سبب ایجاد تلاطم در فلز مذاب می‌شود. با افزایش فرکانس، این تلاطم کم می‌شود یعنی در کوره فرکانس شبکه، تلاطم بالاست.

مزایای تلاطم

- داشتن دمای یکنواخت برای فلز مذاب
- داشتن کیفیت یکنواخت برای فلز مذاب در اثر اختلاط و نفوذ خیلی خوب مواد بازگیری شده و ترکیب شیمیایی

معایب تلاطم

- آسیب رسیدن به نسوز کوره
- سرریز شدن مواد مذاب

د- بهبود راندمان حرارتی در بهره‌برداری

د-۱- کاهش دمای تخلیه مذاب^۳

ظرفیت حرارتی فلز مذاب با افزایش دمای تخلیه مذاب افزایش می‌یابد و تلفات حرارتی کوره نیز کاملاً با افزایش دمای مذاب، افزایش خواهد یافت. ظرفیت حرارتی آهن خاکستری با افزایش هر 100°C دما، حدود 20 Kwh/Ton افزایش می‌یابد.

1. Starting Blocks
2. Agitation
3. Tapping Temperature

تلفات مربوط به هدایت و تشعشع با روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_c = \frac{T - t}{R} \times 10^{-3}$$

$$Q_c = \text{تلفات هدایتی (KW)}$$

$$T = \text{دمای برج خنک کن (K)}$$

$$t = \text{دمای فلز ذوب شده (K)}$$

$$R = \text{مقاومت گرمایی ویژه کوره (KW/°K)}$$

$$Q_R = 5/67 \times 10^{-3} A \cdot \epsilon \cdot (T/100)^4$$

$$\epsilon = \text{ضریب انتشار (Emissivity)}$$

$$A = \text{مساحت سطح فلز مذاب (m}^2\text{)}$$

بعضی مثال از معادلات بالا مشخص می‌شود که تلفات هدایتی و تابشی دو کوره القایی فرکانس بالای 500HZ و 900HZ در دمای تخلیه مذاب 1500°C به ترتیب 50KW و 35KW بدست می‌آید که این تلفات به میزان 10KW برای هر دو کوره در دمای تخلیه مذاب (1400°C) کاهش می‌یابد. برای اینکه دمای تخلیه مذاب را پایین نگه داریم لازم است که روی کم کردن مسافت‌ها برای انتقال بوته یا پاتیل، پوشاندن درب بوته یا پاتیل و نیز روی پیش گرم کردن بوته اقدام اساسی به عمل آید.

۵-۲- در پوش کوره حتی الامکان بایستی کمتر باز شود

همانطور که از رابطه ذکر شده پیداست تلفات تابشی از سطح مذاب کوره متناسب با توان چهارم دماست این تلفات در دمای 1500°C حدود 70-60 KW/m² می‌شود. در بهره‌برداری از کوره‌ها خصوصاً کوره‌های کوچک درپوش کوره گاهی اوقات در اثر بی‌دقتی باز می‌ماند. آموزش پرسنل و نیز تمهیدات لازم برای شارژ سریع کوره و انجام آنالیزهای سریع روی مذاب می‌تواند در جلوگیری از این تلفات موثر باشد.

۵-۳- نگهداری مذاب در دماهای پایین در مدت زمان کوتاه

نگهداری مذاب در زمانهایی که مورد نیاز است بایستی در دماهای پایین صورت گیرد و برای این کار می‌توان تغذیه کوره را کم کرده یا در پایین‌ترین حد خود نگه داشت. در زمانی که نیاز به مذاب وجود دارد دوباره می‌توان توان اعمالی را برقرار نمود.

۵-۴- تمیز کردن خاک و شن و زنگ و روغن و سایر آلاینده‌ها

شن و زنگ (FeO, Fe₂O₃) که به قراضه چسبیده‌اند سبب تشکیل سرباره در مذاب می‌شوند. سرباره به میزان 1٪ در ذوب 3 تن آهن تلفات انرژی به میزان 10 KWh/ton در دمای 1500°C دارد.

د-۵- بهره برداری از کوره در توان ثابت نامی

افزایش توان ورودی سبب بهبود راندمان حرارتی کوره می شود. بهره برداری از حداکثر ظرفیت کوره و کاهش حداکثر در آهنگ توان مصرفی، زمانی تحقق می یابد که بهره برداری از کوره در توان ثابت نامی صورت می گیرد.

د-۶- مواد اولیه در شروع ذوب

مواد اولیه بایستی تا حد امکان متراکم بارگیری (شارژ) شوند. بهتر است که در ابتدا قراضه های برگشتی را بدلیل داشتن نقطه ذوب پایین و ذوب سریع بارگیری نعایم که بدین ترتیب ضریب بار بهبود پیدا کند.

د-۷- بارگیری مواد اضافی

پس از شروع به ذوب شدن اولین بارگیری مواد سرد اضافی بایستی بطور متوالی بداخل کوره بارگیری شوند. هر بارگیری باید ۱۰٪ از حجم پخته را بخود اختصاص دهد.

براده های حاصل از ماشین کاری یا سایر موارد ریز که دانسیته کمی دارند نمی توانند بطور کارا گرم شوند بنابراین هنگام بارگیری کردن آنها بایستی آنها را به داخل مذاب تولید شده در داخل کوره شارژ نمود و برای اختلاط آنها با مذاب از خاصیت تلاطم مذاب استفاده نمود.

د-۸- ذوب کردن با پای مذاب

در کوره های فرکانس پایین، ذوب کردن با پای مذاب امری است اجتناب ناپذیر چون در غیر اینصورت، مشکل ضریب بار برای کوره پیش می آید.

در این کوره ها، توان نامی برای بیش از ۵۰٪ از پای مذاب به کوره اعمال می شود. ذوب کردن با پای مذاب برای کوره های القایی فرکانس بالا لازم نیست هر چند داشتن پای مذاب در این کوره ها نیز می تواند سبب ۵-۱۰ درصد بهبود در ضریب بار شده و ظرفیت ذوب دهی را نسبت به حالت بدون پای مذاب افزایش دهد.

د-۹- حفظ ضخامت (قطر داخلی) کوره

زمانی می توان توان نامی را به کوره اعمال نمود که ضخامت نسوز کوره در حد نرمال باشد. در صورت کم شدن ضخامت نسوز کوره در اثر فرسایش یا هر دلیل دیگری توان اعمالی از حد نامی خود بایستی پایین تر آورده شود. یکی از دلایل کاهش ضخامت نسوز کوره وجود سرباره در مذاب است.

بنابراین در صورت کم شدن ضخامت نسوز بایستی نسبت به تعمیر آن اقدام شود تا بتوان، قدرت را در حد نامی به کوره اعمال نموده و از تلفات راندمان حرارتی جلوگیری نمود.

د-۱۰- پیش گرم نمودن مواد

مقدار حرارتی که لازم است تا چدن در فرایند ذوب شدن به دمای ذوب خود (حدود 1150°C) برسد، ۶۵٪ کل حرارتی است که لازم است چدن را از دمای محیط (20°C) تا دمای تخلیه مذاب (1500°C) برساند. بنابراین از

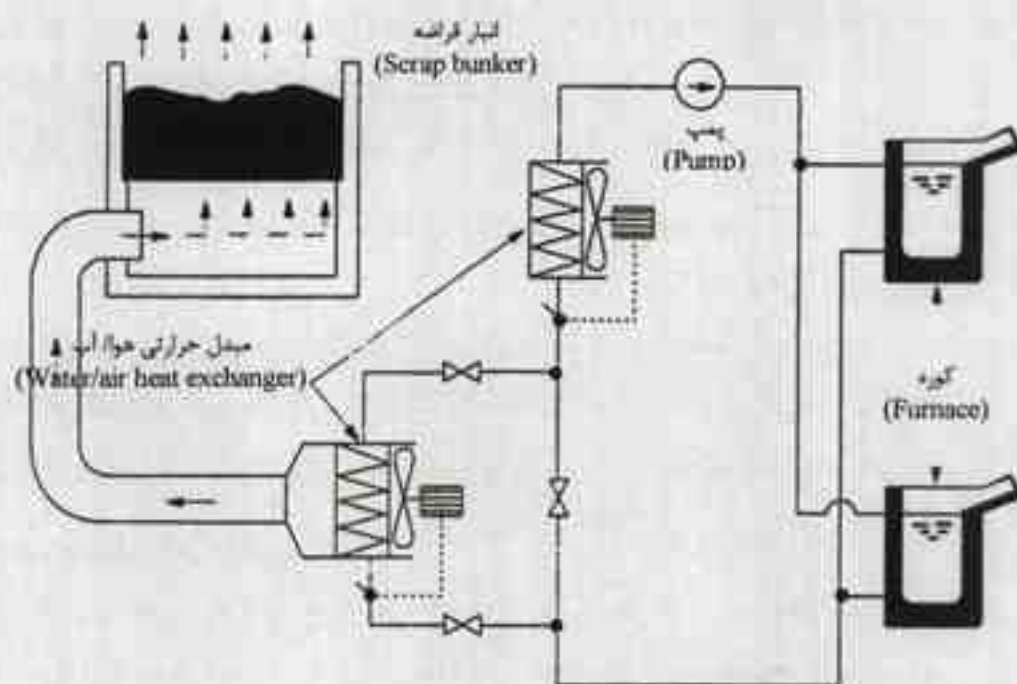
طریق پیش گرم نمودن مواد تا دمای $500-600^{\circ}\text{C}$ با یک روش کارا تر از کوره القایی می‌توان صرفه جویی قابل توجهی را در مصرف توان الکتریکی سبب شد.

آثار پیش گرم کردن

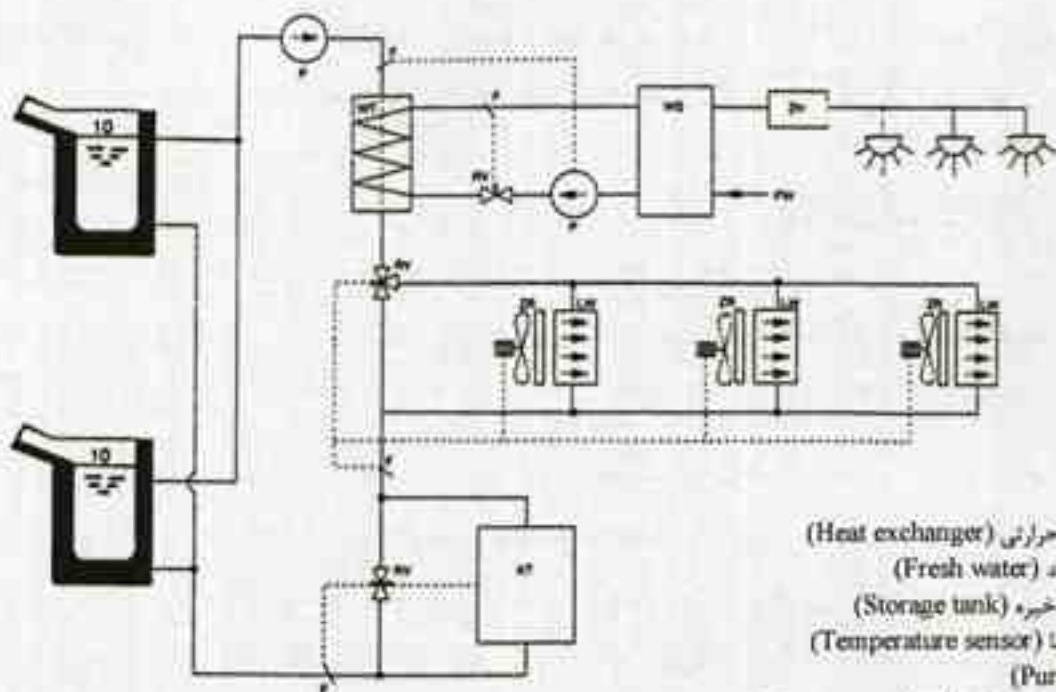
- ♦ کاهش نرخ مصرف توان به میزان حدود ۲۵٪
- ♦ افزایش ظرفیت ذوب دهی تا حدود ۲۷٪

در کوره‌های پیش گرم شاید چنین به نظر برسد که در این کوره‌ها اکسیداسیون اضافی در فرآیند پیش گرم شدن رخ داده و این مسئله باعث تلفات مواد می‌گردد.

لیکن بدلیل اکسیداسیون خیلی کم فولاد در دمای پایین‌تر از 600°C و نیز جدا بودن محفظه احتراق و محفظه پیش گرم و عدم تماس مستقیم هوای 600°C با مواد از اثر این اسیداسیون می‌توان صرف‌نظر نمود.

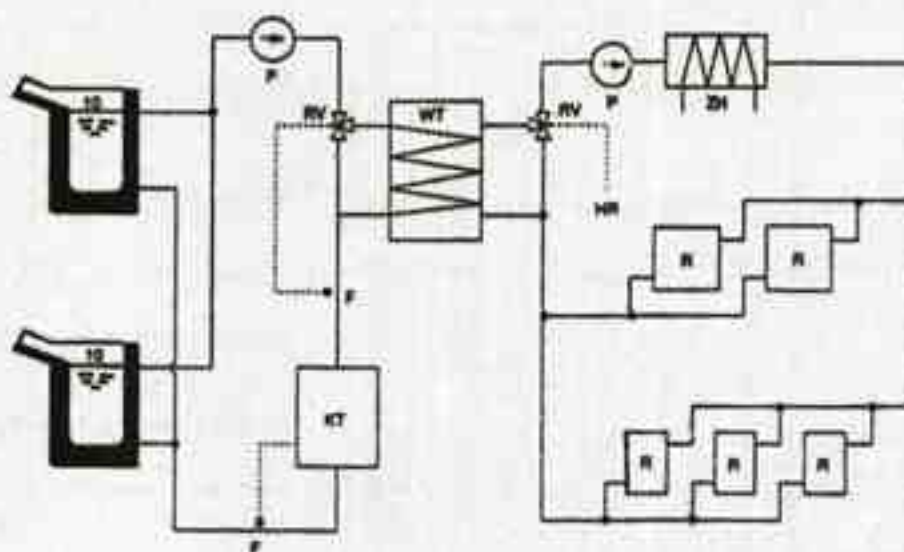


شکل شماره ۵-۱۰: بازایست حرارت از یک کوره القایی جهت خشک کردن قراضه



- کلید واژه:
- WT: مبدل حرارتی (Heat exchanger)
 - FW: آب سرد (Fresh water)
 - WS: تانک ذخیره (Storage tank)
 - F: سنسور دما (Temperature sensor)
 - P: پمپ (Pump)
 - RV: شیر کنترل دما (Temp control valve)
 - ZH: گرمکن الکتریکی (Electric heater)
 - LW: مبدل حرارتی آب/هو (Water/air heat exchanger)
 - ZR: المنت حرارتی (Heating element)
 - KT: خنک کننده (Cooler)

شکل شماره ۵-۱۱: بازیافت حرارت از یک کوره القایی جهت گرمایش فضا



شکل شماره ۵-۱۲: بازیافت حرارت از یک کوره القایی جهت گرمایش آب

۳- سیستم‌های محرک

معمولاً سیستم‌های مدرن راه‌اندازی و کنترل را سیستم‌های محرک می‌گویند که به روش و کنترل توان خروجی و کار موتور و هر نوع کولینگ قدرت همراه آن اشاره می‌کند. اساساً سه روش برای اصلاح بازده انرژی با تعویض موتور و سیستم‌های محرکه وجود دارد.

۱- موتورهای با بازده بالا، این نام کلی موتورهای الکتریکی است که برای تقلیل تلفات موتور طراحی شده‌اند.

۲- کنترل‌کننده‌های موتور: برخی اوقات بعنوان کنترل‌کننده‌های ولتاژ یا راه‌انداز ملایم^۱ دارای راندمان انرژی بالا شناخته شده‌اند.

اینها ولتاژی را که به ورودی‌های موتور می‌آید پیوسته طوری تنظیم می‌نمایند که دقیقاً برای بار موتور کافی باشد. بنابراین تلفات آهنی مربوط به ولتاژ به حداقل می‌رسند. معمولاً کنترل‌کننده‌های موتور از یک وسیله راه‌اندازی ملایم تشکیل شده است. این وسیله شدت جریان حداکثر را در زمان راه‌اندازی موتور کاهش می‌دهد.

۳- سیستم‌های با دور متغیر که به طور گسترده در سه طبقه بندی قرار می‌گیرند: هدف، تنظیم سرعت بار، مطابق برخی پارامترهای اندازه‌گیری شده می‌باشد. این سیستم‌ها از موارد زیر تشکیل شده‌اند:

محرک‌های دور متغیر الکترونیکی^۲ (VSD) انواع مختلفی دارند و تطبیق الکترونیکی سرعت موتور و برق ورودی به آن را تا حد نیاز بار بهبود دارند. بنابراین تلفات آهن و سایر تلفات تا حداقل مقدارشان کاهش می‌یابد.

موتورهای با دور متغیر شامل موتورهای دور متغیر مرسوم، و موتورهای دو سرعت و نیز شامل موتورهای جدید می‌شوند. این موتورها از قابلیت مدرن کنترل الکترونیکی برای گسترش کاربرد موتورهایی که قبلاً توسط کنترل‌کننده‌های مرسوم الکترومکانیکی کنترل می‌شدند استفاده می‌کنند.

محرک‌های الکترومکانیکی: موتورهای دور ثابت را با کنترل‌های مکانیکی یا الکترومکانیکی جهت تغییر سرعت سیستم بکار می‌برند.

کنترل‌کننده‌های دور موتور (VSD) جایگزین راه‌اندازی‌های مرسوم الکترومکانیکی موتورها می‌شوند و عمدتاً با قرار گرفتن در مجاورت این موتورها از لحاظ فیزیکی می‌توانند بزرگتر از راه‌اندازهایی باشند که جایگزین آنها می‌شوند اما معمولاً بازایی و تعویض آنها آسان است.

۳-۱- موتورهای با راندمان بالا

وقتی که موتوری برای تولید گشتاور نسبتاً ثابت و مداوم لازم است، معیار عمده انتخاب آن راندمان بار نامی آن

1. Soft Starter

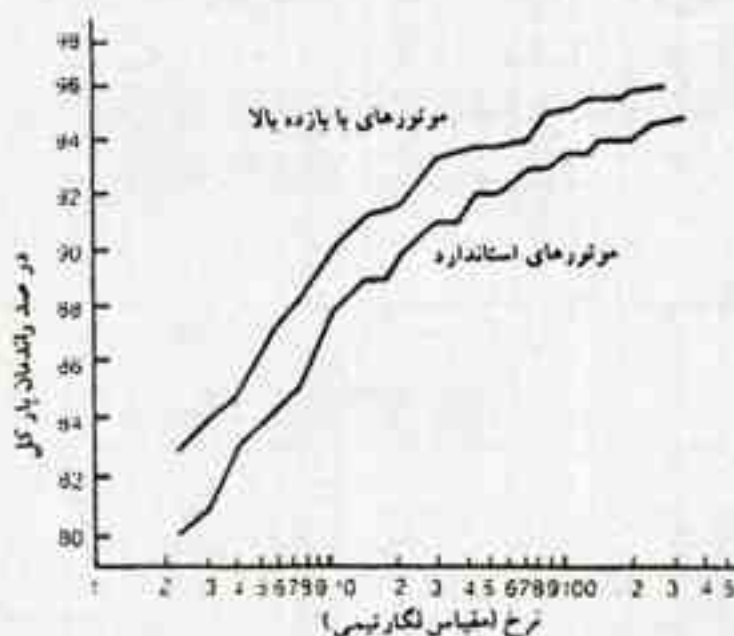
2. Duty Cycle

است. اگر زمان کارکرد^۱ بالا باشد در این صورت موتورهای با بالاترین راندمان، کمترین هزینه کارکرد را خواهند داشت.

موتورهای القایی با راندمان بالا، در مقایسه با موتورهای استاندارد مشابه میزان برق کمتری مصرف می‌کنند. معمولاً در ساخت این موتورها از همان موادی که موتورهای استاندارد دارند استفاده می‌کنند، لیکن آهن بیشتری در ساخت آنها بکار رفته و در برخی موارد ورقه‌های فولادی بکار رفته در آنها کیفیت بهتری دارند، چهار مورد اصلاحات زیر می‌تواند در راستای افزایش راندمان موتور در محدوده فعالیت آنها سودمند واقع شود.

- ♦ افزایش طول هسته ساخته شده از ورقه‌های فولادی با تلفات کم. اینها تراکم خطوط نیرو را کاهش می‌دهند و در نتیجه تلفات آهنی نیز کاهش می‌یابد.
- ♦ تلفات مسی با حداکثر بهره‌گیری از شیارها و انتخاب اندازه سیم‌های هادی در استاتور و روتور کاهش می‌یابد.
- ♦ تلفات متفرقه با انتخاب دقیق تعداد شیارها و شکل هندسی دندان / شیار به حداقل می‌رسند.
- ♦ یک موتور با راندمان بالاتر، حرارت کمتری تولید می‌کند بنابراین می‌توان اندازه فن خنک کننده را کوچک‌تر گرفت که به نوبه خود منجر به تلفات کم سیم‌پیچی شده و در نتیجه قدرت تلف شده نیز کاهش می‌یابد.

شکل (۵-۱۳) راندمان موتورهای استاندارد را با راندمان موتورهای با راندمان بالا مقایسه می‌کند.



شکل شماره ۵-۱۳: مقایسه راندمان بار کامل موتورهای استاندارد و راندمان بالا

اندازه‌گیری‌های موتورهای با راندمان بالا

در طی یک آزمایش دانشگاهی، سه موتور با راندمان انرژی بالا، مورد آزمایش قرار گرفته و کارایی آنها با سه موتور القایی استاندارد مقایسه گردیده است. موتورهای مورد امتحان قدرت اسمی ۳، ۷/۵ و ۲۲ کیلووات داشتند در شکل (۵-۱۲) نمونه داده‌های مربوط به موتورهای ۷/۵ کیلوواتی نشان داده شده است.

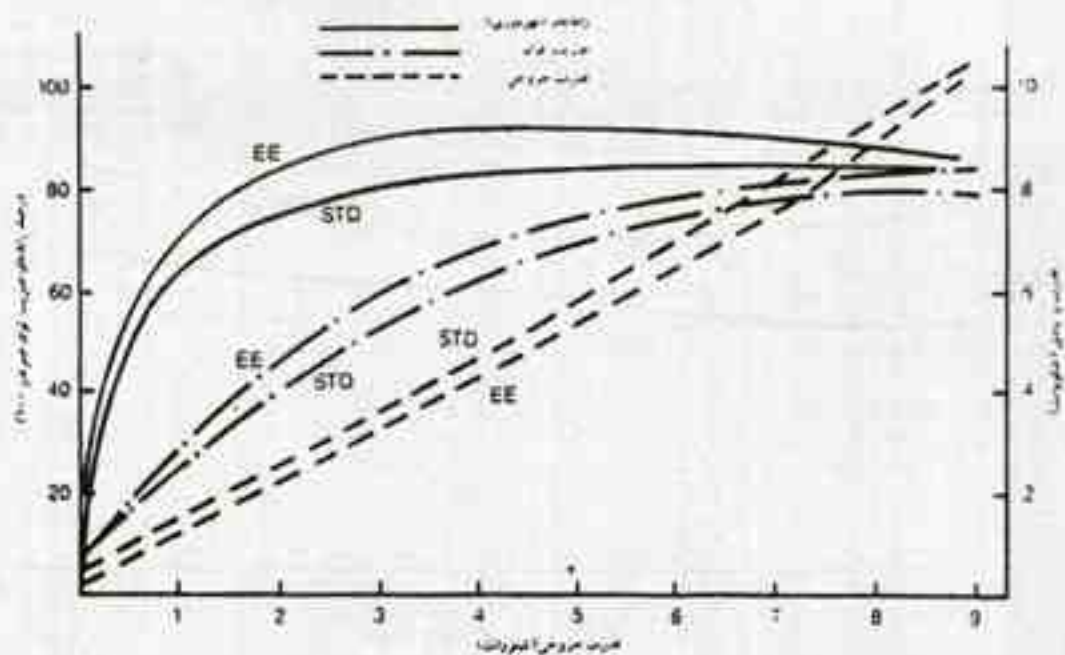
برای موتور با راندمان بالا در سرناسر محدوده کاری هم راندمان و هم ضریب قدرت برتر و بهتر است. این آزمایش گواهی‌های آزمون مشخصات سازنده موتور را تأیید و تصدیق می‌نماید.

در بار کامل این صرفه‌جویی‌ها برای موتور ۳ کیلوواتی ۳/۳٪، برای موتور ۷/۵ کیلوواتی ۱/۶٪ و برای موتور ۲۲ کیلوواتی ۲/۵٪ بوده همچنین صرفه‌جویی‌های حاصله توسط سه موتور با راندمان بالا در شکل (۵-۱۵) نشان می‌دهد که میزان صرفه‌جویی‌ها در بارگذاری‌های مختلف در موتورهای ۷/۵ و ۲۲ کیلوواتی متغیر بود لیکن در موتور ۳ کیلو وات تقریباً ثابت باقی ماند.

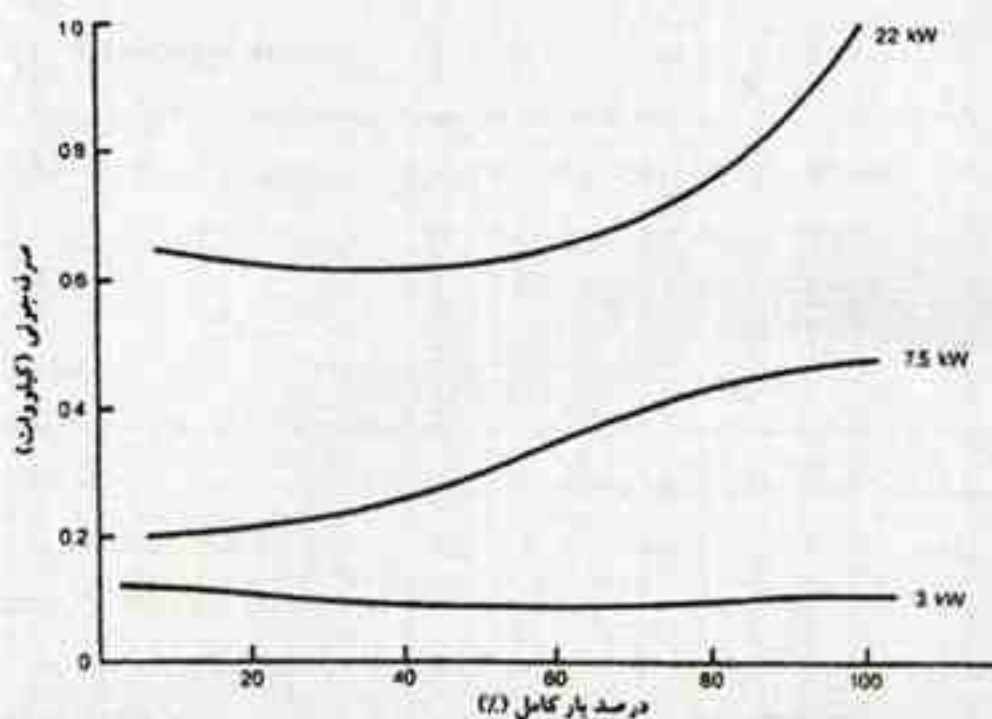
شکل (۵-۱۶) مصرف قدرت راکتیو موتورهای ۷/۵ کیلوواتی را نشان می‌دهد. دیگر بار، برتری موتور "با راندمان بالا" آشکار است. تنها موردی که در آن توان راکتیو جهت طراحی راندمان بالا بیش از موتور استاندارد معادل آن بود، مربوط به وقتی است که موتور ۳ کیلوواتی در بارهای بالا کار می‌کند، این امر در اطلاعات مندرج در گواهی‌های آزمون تولید کننده نیز ذکر شده بود.

بنابراین وقتی یک موتور جدید و یا جایگزین مورد نیاز است، موتورهای با بازده بالا بی‌نهایت جالب هستند. صرف کاهش هزینه انرژی، در شرایط فعلی، جایگزینی موتورهای موجود با موتورهای دارای راندمان بالا را توجیه نمی‌کند. قیمت موتور کامل به علاوه هزینه نصب آن، به قدری است که برای برگشت هزینه بیش از دو سال وقت لازم است. حتی اگر موتور به طور مداوم کار کند. تعدادی از تولید کنندگان، موتورهای "با راندمان بالا" را عرضه می‌کنند با وجود این لزوماً بازاریابی آنها تحت این عنوان صورت نمی‌گیرد در هنگام انتخاب یک موتور جدید، دانستن جزئیات فنی درباره کارایی موتور در سرناسر

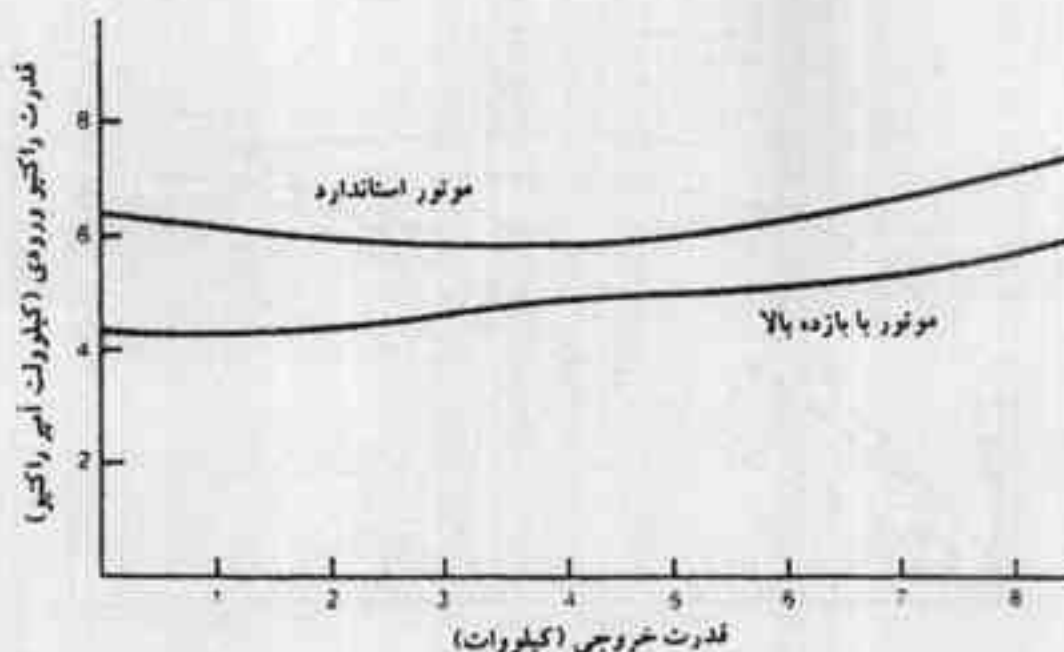
طیف بار کامل مهم است. اهمیت این امر از این روی است که موتورها به طور میانگین با ظرفیت ۶۰٪ و ۸۰٪ بار اسمی شان کار می‌کنند.



شکل شماره ۵-۱۴: مقایسه ضریب قدرت و راندمان در موتورهای استاندارد و راندمان بالا



شکل شماره ۵-۱۵: میزان صرفه‌جویی در انرژی ناشی از کاربرد موتورهای آزمایش شده با راندمان بالا



شکل شماره ۵-۱۶: مصرف قدرت راکتور در موتورهای استاندارد و موتورهای با راندمان انرژی بالا

۲-۳- کنترل کننده‌های موتور

در برخی از موارد کاربرد، لازم است که موتوری بعد از زیادی در بارهای کم کار کند، مثلاً در نقاله‌ها، راهروهای متحرک پرسکاری‌ها و غیره. تحت چنین شرایطی، راندمان موتور افت می‌کند چون تلفات آهنی مربوط به ولتاژ زیاد می‌شوند. برخی اوقات کنترل کننده موتور که به کنترل کننده ولتاژ معروف است، افت راندمان موتور را کاهش می‌دهد. این عمل وقتی رخ می‌دهد که بار زیر ۵۰٪ مقدار اسمی باشد با تنظیم ولتاژ سر ترمینال‌های موتور، کاری می‌کند که درست نیروهای مغناطیسی کننده کافی را برای فائق آمدن بر تقاضای بار لازم، تولید کند. بنابراین مطابق با آن، کاهش در تلفات آهنی بدست می‌آید و راندمان و ضریب قدرت اصلاح می‌شود.

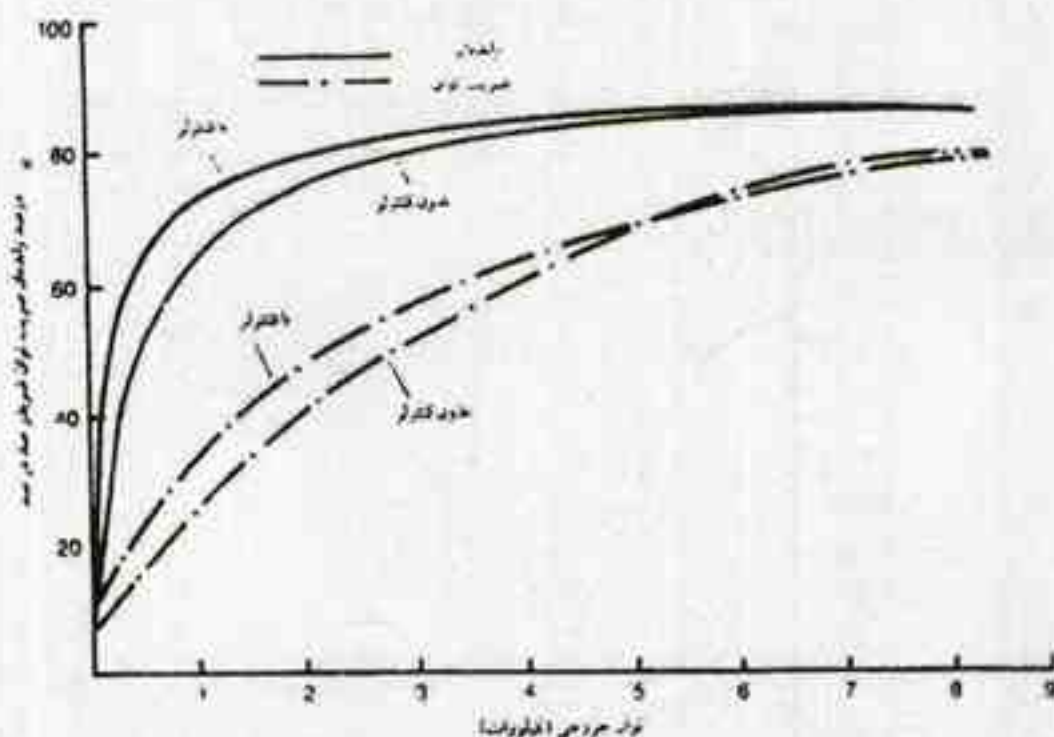
بعلافت ولتاژ در "تریستورهای" که در کنترل کننده‌های موتور بکار رفته است این کنترل کننده‌های موتور، قدرت را جذب می‌کنند، این امر در بارهای بالا می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی شود و بنابراین شناخت "زمان کارکرد" برای انجام تجزیه و تحلیل کامل از هزینه و منافع اهمیت دارد.

معمولاً کنترل کننده‌های موتور دارای قابلیت‌های "راه‌اندازی نرم" می‌باشند که به طور تصاعدی در خلال دوره راه‌اندازی ولتاژ اعمال شده به ورودی‌های موتور را تنظیم و تعدیل می‌کند، بنابراین شدت جریان ناگهانی را به حداقل می‌رساند و کنترل کاملی را بر موتور اعمال می‌کند. همچنین راه‌اندازی نرم، تنش‌های مکانیکی را در سیم‌پیچی‌های موتور و تجهیزات خارجی آن تقلیل می‌دهد.

الف- آزمون‌های کنترل کننده‌های موتور

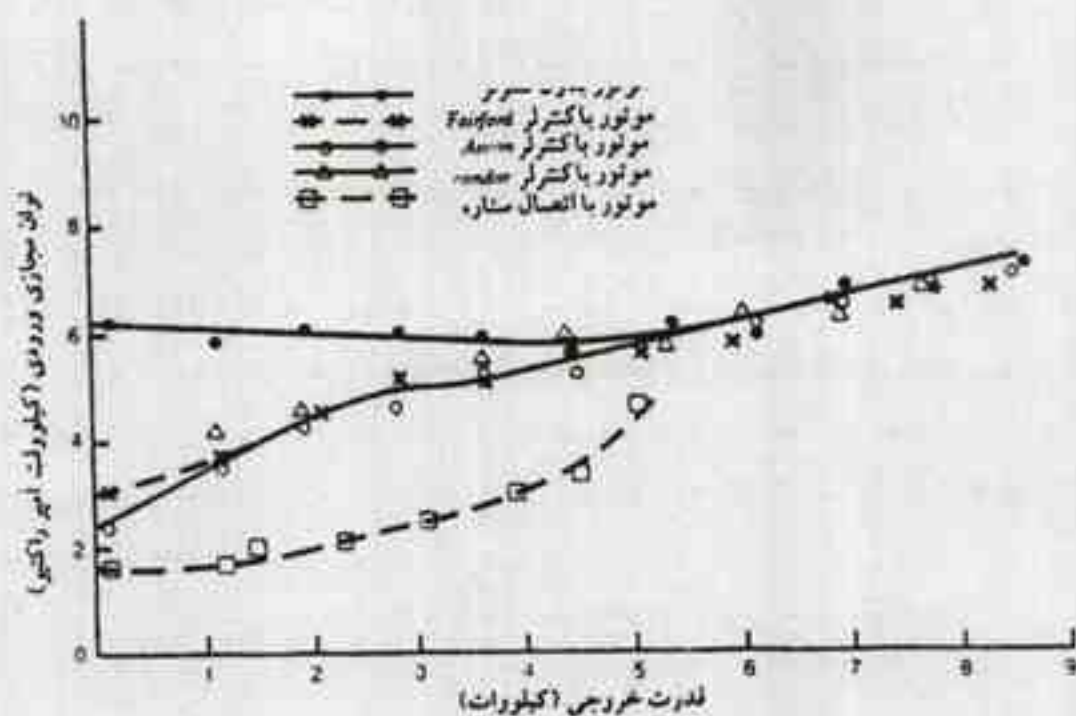
تعدادی از کنترل کننده‌های موتور، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. مواردی از این داده‌های آزمون که انتخاب شده‌اند در شکل (۱۷-۵) نشان داده شده است. شکل (۱۷-۵) راندمان و ضریب قدرت را به تنهایی برای موتور ۷/۵ کیلوواتی استاندارد و با کنترل کننده، مقایسه می‌کند. می‌توان دید که این کنترل کننده در بارهای کم موتور هم راندمان و هم ضریب قدرت را اصلاح می‌کند. دو مدل دیگر کنترل کننده نیز به این موتور متصل شدند. مدل آنورس^۱ به طریقی مشابه با مدل فیر فورد^۲ عمل کرد، در حالیکه نوع کندر نامسا^۳ بخاطر تنزل کم ولتاژ در بارهای کم، صرفه‌جویی‌های کمتری ارائه نمود. تفاوت کمی از لحاظ صرفه‌جویی‌های برق قدرت راکتیو بین انواع کنترل کننده‌ها وجود داشت [شکل (۱۸-۵)]. در شکل (۱۹-۵) صرفه‌جویی انرژی حاصله از یک موتور ۳ کیلووات، ۷/۵ کیلووات، و ۲۲ کیلووات، همراه با یک کنترل کننده موتور نشان داده شده است که منافع حاصله در شرایط مختلف را نشان می‌دهد.

تمام موتورهای و ترکیبات موتور/ کنترل کننده قابلیت تحویل قدرت خروجی اسمی را داشتند.

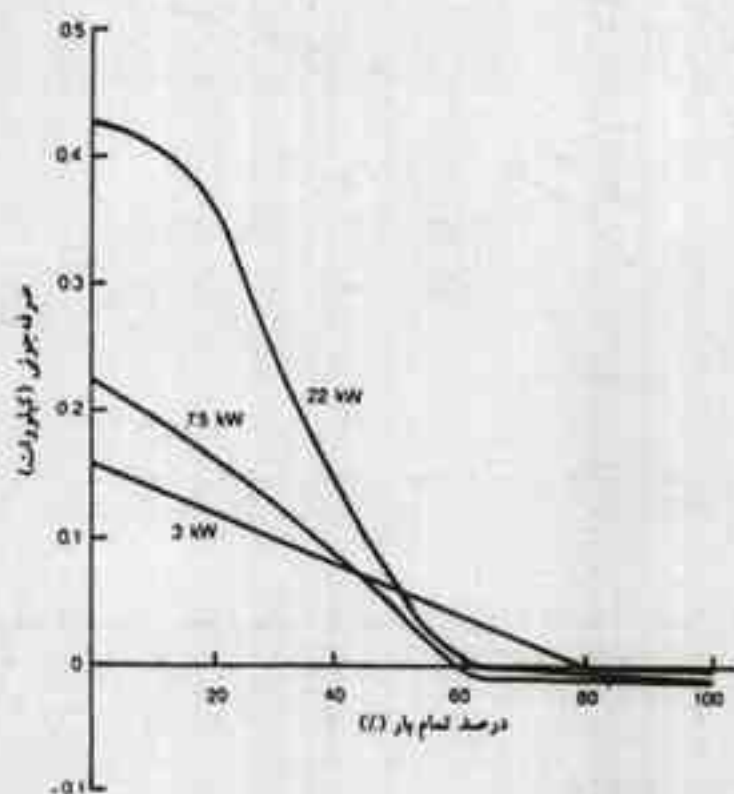


شکل شماره ۱۷-۵: مقایسه عملکرد موتور استاندارد ۷/۵ کیلوواتی با کنترل کننده و بدون کنترل کننده

1. Unsworth
2. Fairford
3. Condor NASA



شکل شماره ۱۸-۵: مقایسه عملکرد موتور استاندارد ۷/۵ کیلوواتی با کنترل کننده و بدون کنترل کننده



شکل شماره ۱۹-۵: میزان صرفه‌جویی ناشی از کاربرد کنترل کننده موتور در موتورهای استاندارد

ب- آزمون‌های بار دوره‌ای

همچنین طی آزمایشی درباره عملکرد دوره‌ای موتورهای استاندارد با کنترل کننده‌ها و بدون کنترل کننده‌ها، کار تحقیقاتی انجام شد. جدول ۱ صرفه‌جویی‌های انرژی حاصله را بر حسب KWH و KVAR نشان می‌دهد.

دو نوع از طرز بارگذاری یعنی زمان‌های کارکرد مورد بررسی قرار گرفتند:

♦ زمان کارکرد: ۲ دقیقه در بار ۱۰۰٪، ۱۰ دقیقه در بار ۱۰٪ با ۵ مرتبه تکرار.

♦ زمان کارکرد: ۲: ۱۰ دقیقه در بار ۱۰۰٪، ۵۰ دقیقه در بار ۱۰٪.

صرفه‌جویی‌های قدرت راکتیو [جدول (۳-۵)] به طور مهم و معنی‌داری بالاتر از صرفه‌جویی‌های بدست آمده جهت توان حقیقی بوده، که اصلاح ضریب قدرت را نشان می‌دهد که خود حاصل بهبود تطابق بار است در مورد موتور ۳ کیلوواتی صرفه‌جویی در توان حقیقی نیز مهم بود.

وقتی که موتوری دارای زمان کارکرد بالا است (یعنی وقتی که در اکثر زمان‌ها با بار کامل یا نزدیک آن کار می‌کند) استفاده از یک موتور با بازده بالا توصیه می‌شود. بهرحال، احتمال دارد که وقتی نیاز به جایگزینی و تعویض موتور باشد این کار بیش از هر کار دیگر بر هزینه‌ها تاثیر می‌گذارد. همیشه برای یک سیستم جدید، موتوری با راندمان بالا را بایستی مورد ملاحظه قرار داد.

وقتی که موتوری دارای زمان کارکرد بالا است (یعنی وقتی که در اکثر زمان‌ها با بار کامل یا نزدیک آن کار می‌کند) استفاده از یک موتور با بازده بالا توصیه می‌شود. بهرحال، احتمال دارد که وقتی نیاز به جایگزینی و تعویض موتور باشد این کار بیش از هر کار دیگر بر هزینه‌ها تاثیر می‌گذارد. همیشه برای یک سیستم جدید، موتوری با راندمان بالا را بایستی مورد ملاحظه قرار داد.

جدول شماره ۳-۵: نتایج دوره‌ای بار که نشان‌دهنده میزان صرفه‌جویی KVAR, Kwh هنگام استفاده از کنترل کننده موتور در

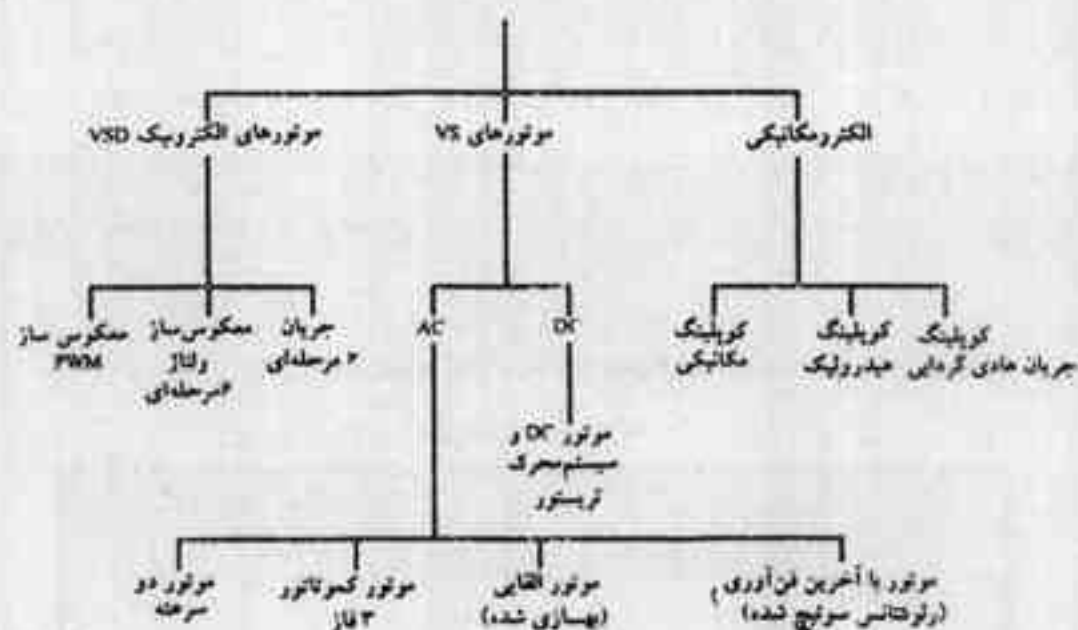
موتورهای استاندارد است

کنترل کننده	زمان کارکرد Duty cycle	اندازه موتور (kw)	صرفه‌جویی‌ها در موتورهای ثابت کنترل کننده			
			Kwh	%	KVAR	%
Fairford	۱	۳	۰/۱۷	۱۶/۲	۱/۲۶	۲۲/۶
FEL/E*	۲		۰/۱۸	۱۶/۵	۱/۲۷	۲۲/۹
Fairford	۱	۷/۵	۰/۲۱	۶/۵	۱/۰۲	۱۵/۹
FEL/Ev/۵	۲		۰/۱۰	۳/۲	۰/۹۹	۱۵/۸
AECON	۱	۷/۵	۰/۲۲	۷/۴	۱/۹۸	۳۰/۹
AOPC۱۰	۲		۰/۱۲	۲/۴	۱/۷۸	۲۸/۲
Fairford	۱	۲۲	۰/۳۸	۵/۰	۵/۱۳	۳۳/۰
FEL/E۲۲	۲		۰/۴۵	۵/۹	۵/۸۲	۳۶/۹

اگر بار ثابت بوده و به میزان قابل توجهی کمتر از خروجی اسمی موتور باشد، موتور کوچکتر می‌تواند مناسب باشد. در این حالت یک موتور با راندمان بالا را باید در نظر آورد. در مواردی که بار موتور تغییر می‌کند و مکرراً کمتر از ۵۰٪ بار اسمی است، اضافه کردن یک کنترل کننده موتور می‌تواند از لحاظ هزینه موثر باشد. بار اینکار، موتور را قادر خواهد کرد که بار اسمی‌اش را که شاید در بخشی از زمان کارکرد، لازم باشد، ارائه دهد.

۳-۳- سیستم‌های با سرعت متغیر

هدف همه سیستم‌های دور متغیر این است ماشین امکان کارکردن در سرعتی را که به سرعت مطلوب نزدیک‌تر است و با موتورهای دارای دور ثابت قابل دستیابی نیست، پیدا کند. سیستم‌های دور متغیر به سه دسته تقسیم می‌شوند: محرکه‌های دور متغیر الکترونیکی (VSDها)، موتورهای دور متغیر و سیستم‌های دور متغیر الکترومکانیکی. هر یک از این موارد، تقسیمات فرعی نیز دارند [شکل (۵)-۲۰].



شکل شماره ۲۰-۵: تقسیمات سیستم‌های سرعت متغیر

سیستم‌های دور متغیر به دلایل صرفه‌جویی در انرژی، نصب نشده‌اند بلکه برای رفع حواشی فرایند یا نیازهای محیطی بکار گرفته شده‌اند. در نتیجه، درجه پیچیدگی آنها متناسب با شرایط فرایند تعیین می‌شود و معمولاً مستلزم آن است که سرعت ویژه مورد نیاز از قبل انتخاب شده و از میان طیف موجود با دست کنترل می‌شود. امروزه مواردی زیادی وجود دارد و به کمک الکترونیک مدرن با هزینه بالای برق تغییراتی در موارد انتخاب بوجود آمده است. اکنون به قیمت نسبتاً کمی می‌توان دور بهرانب و تغییرات ثابتی از سرعت را بدست

آورد، که به طور عمده توسط درجه و قابلیت انعطاف لازمه سیستم تعیین می‌شود. اکنون امکان بالقوه سیستم‌های متنوع با تأکیدهای مخصوص بر آن دسته که جهت تعویض ادوات کهنه با ادوات جدید مفید است، ملاحظه می‌شود.

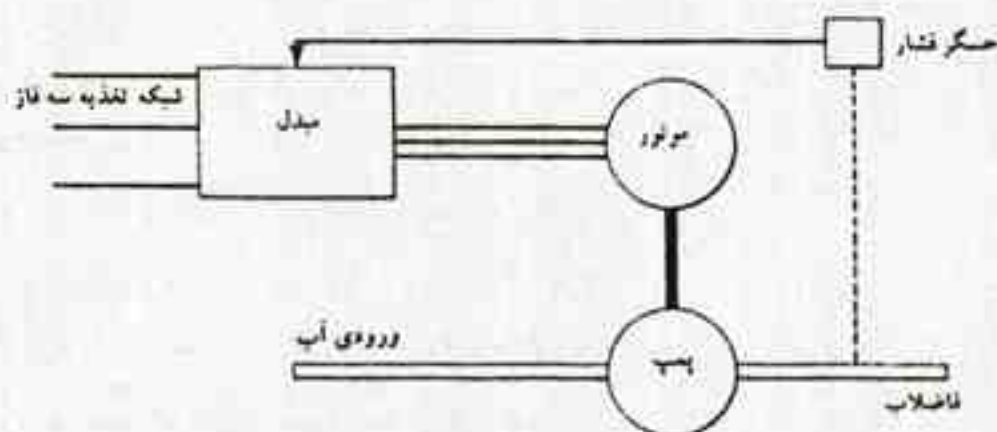
الف- محرک‌های دور متغیر الکتریکی (VSDها)

به طور کلی محرک‌های دور متغیر الکتریکی با تبدیل یک منبع برق غیرقابل تنظیم به منبع برق متغیر کار می‌کنند. معمولاً ادوات الکتریکی ولتاژ اصلی جریان متناوب را تبدیل به ولتاژ متغیر جریان مستقیم می‌کنند که بعداً معکوس شده و تبدیل به برق جریان متناوب با فرکانس متغیر و ولتاژ متغیر می‌شود (برخی از موتورهای جریان متناوب را می‌توان تنها با تغییر دادن ولتاژ کنترل نمود).

برای اینکه یک محرک دور متغیر الکتریکی عمل نماید، باید پس‌خوران^۱ از یک پارامتر اندازه‌گیری شده به درون مدار کنترل محرک دور متغیر وارد شود. این پارامتر می‌تواند هر متغیر مهمی باشد به شرط آنکه حسگری^۲ موجود باشد تا نسبت به این تغییرات واکنش نشان دهد.

مثلاً محرک‌های دور متغیر الکتریکی می‌توانند از نظر فشار، درجه حرارت، سرعت، میزان و مقدار جریان حجمی، قدرت، یا ترکیبی از اینها مورد کنترل قرار گیرند. انتخاب هر کدام از این عوامل بستگی به منطبق کنترل محرک‌های دور متغیر الکتریکی دارد.

شکل (۵-۲۱) یک مورد کاربردی محرک‌های دور متغیر الکتریکی که در آن سرعت پمپ جهت ثابت نگهداشتن فشار تخلیه صرف‌نظر از مقدار تقاضای مصرف‌کننده تغییر می‌کند، را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۵-۲۱: فشار تخلیه پمپ کنترل‌کننده یک محرک دور متغیر

برخی از آخرین تجهیزات از منطبق قابل برنامه‌ریزی مصرف‌کننده و یا نرم‌افزار پیچیده استفاده می‌کنند که

1. Feedback
2. Sensor

مدل‌های خامش ریاضی را قادر به بهینه‌سازی مصرف انرژی و یا سایر فاکتورهای مهم می‌تواند. محرک‌های دور متغیر الکتریکی علی‌الخصوص در مواردی جالب است که مدولاسیون جریان لازم باشد مثال‌های آن، شامل پمپ‌ها، بادبزن‌ها، کمپرسورهای هوا و تبرید است. کاربرد این محرک‌های دور متغیر همچنین در مواردی است که در سرناسر یک محدوده سرعت، توان یا گشتاور ثابتی لازم باشد.

ب- موتورهای مناسب برای کنترل "محرک‌های دور متغیر الکتریکی"

نوع محرک دور متغیر را که می‌توان مورد استفاده قرار داد به نوع موتور نصب شده بستگی دارد. دو نوع اصلی در موتورهای جریان متناوب وجود دارند، موتورهای آسنکرون و سنکرون. هر دوی این موتورها را می‌توان با محرک‌های دور متغیر الکتریکی کنترل نمود. معیارهای عمده در ارزیابی مفید بودن یک موتور جهت محرک دور متغیر عبارتند از: موتور در کاربرد کنونی‌اش بیش از اندازه گرم نمی‌شود زیرا تهویه هوای درون آن در سرعت‌ها و دورهای پایین‌تر نقصان یافته و حرارت بیشتری در نتیجه نصب یک محرک دور متغیر در موتور ایجاد می‌شود؛ اگر افزایش در مقدار دور یا سرعت پیش‌بینی می‌شود، موتور و قطعات محرک آن از قبیل قرقره‌ها، نسمه‌ها، چرخ‌دنده‌ها و غیره بایستی تحمل نیروهای گریز از مرکز زیاد حاصل از سرعت‌های دورانی بالا را داشته باشند؛ همچنین ممکن است در سرعت‌های بالاتر (بارگذاری) بار موتور افزایش یافته و حداکثر سرعت ممکنه را محدود کند (وقتی که در وهله اول سرعت افزایش می‌یابد این امر بایستی به دقت بررسی و ثبت گردد).

ج- انواع محرک‌های دور متغیر جریان متناوب

اساساً سه نوع "اینورتر" (معکوس کننده جریان) وجود دارد که عبارتند از:

- ♦ معکوس کننده یا "اینورتر" منبع ولتاژ با تلفیق پهنای پالس
- ♦ معکوس کننده یا "اینورتر" منبع ولتاژ ۶ مرحله‌ای
- ♦ معکوس کننده یا "اینورتر" منبع شدت جریان ۶ مرحله‌ای

تمام اینها را می‌توان در موتورهای موجود نصب کرد، لیکن مقداری خروج از بار یا توان اسمی برای موتور لازم است، علی‌الخصوص در مورد معکوس کننده‌های ۶ مرحله‌ای اینکار حداکثر تا ۱۰٪ می‌تواند انجام پذیرد.

ج-۱- معکوس کننده^۱ یا "اینورتر" منبع ولتاژ با تلفیق پهنای پالس

معکوس کننده‌های ولتاژ که از نوع تلفیق پهنای پالس^۲ (PWM) هستند امکان کنترل و پائین آمدن سرعت را تا حد صفر و بالا بردن سرعت را تا سه / چهار برابر سرعت عادی سنکرون فراهم می‌کنند. ضریب قدرت شدت جریان برق معمولاً زیاد است و نسبتاً در تمام محدوده سرعت ثابت می‌باشد. چون شکل "موج خروجی" نزدیک به

1. Inverter

2. PWM: Pulse Wide Modulation

"موج سینوسی خالص" است، بخاطر (موج‌های) هارمونیک چند مسئله محدود دربارهٔ این موتور وجود دارد. امروزه این آشناترین قرم محرک‌های دور متغیر الکتریکی شده است.

مزایا

- ♦ بازدهی بالا
- ♦ کنترل خوب در محدوده سرعت از جمله سرعت‌های پائین
- ♦ ضریب قدرت بالا
- ♦ (موج‌های) هارمونیک فرکانس پائین مشکلی ایجاد نمی‌کنند
- ♦ کار با چند موتور امکان‌پذیر است
- ♦ حداکثر ولتاژ خروجی برابر ولتاژ خط است
- ♦ حوزه نوآوری بالا مثلاً، محرک‌های برداری
- ♦ می‌توان در صورت نقص محرک دور متغیر الکتریکی وسیله‌ای فرعی را (از پیش) تعبیه کرد

معایب

- ♦ موج‌های هارمونیک فرکانس بالا می‌تواند در این ماشین‌ها باعث سر و صدا شوند. (این نکته را از تولید-کننده بپرسید).
- ♦ ادوات الکترونیکی پیچیده فرکانس بالا در هنگام وصل کردن می‌تواند قابلیت اعتماد آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد.

ج-۲- معکوس‌کننده یا "اینورتر" منبع ولتاژ ۶ مرحله‌ای

معکوس‌کننده‌های منبع ولتاژ ۶ مرحله‌ای به خوبی تأیید شده‌اند و برای سرعت‌های بین یک و دو برابر سرعت‌هایی که صرفاً و به تنهایی از فرکانس استاندارد برق اصلی بکار افتاده‌اند مورد استفاده واقع می‌شوند. بهر حال وقتی که سرعت موتور کاهش باید ضریب قدرت نیز به تبع آن کاهش می‌یابد. شکل موجی جریان متناوب با فرکانس متغیر تولید شده، از شبیه‌سازی پلکانی ۶ مرحله‌ای ولتاژ حاصل می‌شود.

مزایا

- ♦ بازدهی بالا
- ♦ کار با چند موتور
- ♦ نوع معکوس‌کننده (اینورتر) کاملاً مورد تأیید است.
- ♦ در مواقع نقص محرک دور متغیر الکتریکی می‌توان از ادوات فرعی استفاده کرد.

معایب

- می‌تواند ضریب قدرت کمی داشته باشد.
- می‌تواند گشت‌آورهای ضربه‌ای را در فرکانس‌های پائین به "روتور" وارد کند.
- کارایی ضعیف در سرعت پائین.

ج-۳- معکوس‌کننده یا "اینورتور" منبع شدت جریان ۶ مرحله‌ای

معکوس‌کننده‌ها یا "اینورتورهای" منبع جریان ۶ مرحله‌ای بر اساس اصول ۶ مرحله‌ای که به شدت جریان اعمال می‌شود بکار می‌افتند. معمولاً محدوده سرعت به ۲۰٪-۱۰۰٪ سرعت حاصله از فرکانس برق اصلی محدود می‌شود. وقتی که این نوع کنترل کننده را به یک موتور موجود اعمال می‌کنند لازم است که به‌خاطر موج‌های هارمونیک و ولتاژهای بیش از حد و گذرا احتیاط کنند. شدت جریان‌های خط که وارد موتور می‌شوند حاوی موج‌های هارمونیک هستند که مخصوصاً در سرعت‌های کم، ممکن است حرارت تولید کنند و بنابراین لازم است آن را از میزان بار اسمی خارج کنیم. بیش از حد شاید به عایق فرسوده "استاتور" فشار آورد که در آن حالت بایستی شبکه‌های مناسبی برای پراکنده‌سازی موج‌های ضربه‌ای نصب گردد. در سرعت‌های کمتر از ۵۰٪ سرعت‌هایی که توسط فرکانس برق اصلی ایجاد می‌شود، با ضریب قدرت موتور ضعیف است.

مزایا

- نیرومندی الکتریکی
- نوع خوب تأیید شده "اینورتور" (معکوس‌کننده)
- مدار ساده
- ترمز تجدید شونده (باز یافتنی)
- وقتی محرک دور متغیر الکتریکی دچار نقص شود می‌توان از ادوات فرعی استفاده نمود (bypass)

معایب

- ایجاد پالس‌ها و ضربه‌های مربوط به گشت‌آور در سرعت‌های پائین
- گشتاور کم در حال راه‌اندازی
- ضریب قدرت کم
- کنترل چند ماشینی آنقدر هم آسان نیست.
- پاسخ بازتاب ملایم
- برای اجتناب از حداکثر ولتاژ، تطبیق دقیق موتور و محرک ضروری است.

د- انتخاب معکوس‌کننده یا "اینورتور"

نوع محرک دور متغیر انتخاب شده، خواه موتور آسکرون باشد یا سکرون، بایستی با موتور هماهنگ باشد. انتخاب محرک دور متغیر الکتریکی مناسب به عوامل زیادی بستگی دارد. انتخاب مقدماتی را می‌توان با

توجه به مزایای نسبی فوق‌الذکر انجام داد. ممکن است قابلیت تعویض محرک (با ادوات جدید) اهمیت داشته باشد، همانطور که کارهای چند موتوره این‌طور است. اگر کارائی در سرعت پایین مهم است، برخی از "اینورتر" (معکوس کننده‌ها) را بایستی از دور خارج کرد.

ثانیاً بایستی با تهیه کنندگان تماس گرفته و قیمت‌ها را مقایسه کرد. بایستی از تهیه کنندگان خواست که هر تأسیساتی از تجهیزاتشان را که مشابه تأسیسات خواسته شده است تعیین کنند، قاعدتاً ابتدا بایستی بر روی تهیه کنندگانی متمرکز گردید که در محدوده‌ای از انواع محرک‌های دور متغیر کار می‌کنند.

مراجع و منابع

الف- مراجع خارجی

1. Ontario Power generation-Fans Reference Guide-4th edition-2001
2. Ontario Power generation-Pumps Reference Guide-3rd edition-2001
3. Moncef Krarti-Energy Auditing of Building Systems (An Engineering Approach)-CRC press-2000
4. Donald R. Wulfinhoff-Energy Efficiency Manual-Energy Institute Press, 1999
5. A.J.Pansini, K.D.smalling-Guide to Electric Load Management-PennWell, 1998
6. Energy Star Buildings Manual-EPA, 1998
7. Data Book on Energy Conservation for Electric Energy Management-UN-ESCAP, 1998
8. Technical Cooperation on Analysis of Energy Conservation and Rational Use of Energy in the Social and Economic Sectors of the IRI-Final Report-(IV) Guideline-ECCJ, IEEJ, 1997
9. Performance of Electrical Equipment-Ministry of Energy, IRAN, 1997
10. T.D.Eastop, D.R.Croft- Energy Efficiency for Engineers and Technologists-Addison Wesley Longman, 1996
11. Wayne C.Turner-Energy Management Hand Book-3rd Edition, The Fairmont press, Inc. 1996
12. Good Practice Guide2-Guidance Notes for Reducing Energy Consumption Costs of Electric Motor and Drive Systems-Energy Efficiency Office-UK, 1994
13. Giovannia Petrecca-Industrial Energy Management-Kluwer Academic Publishers-1993
14. I.J.Nagrath, D.P.Kothari-Electric Machines-McGraw Hill, 1990
15. L.C.Witte, P.S.Schmidt, D.R.Brown-Industrial Energy Management and Utilization-Hemisphere Publishing Corporation, 1988
16. T.Gonen-Electric Power Distribution System Engineering-McGraw Hill, 1987
17. Energy Management Principles-EIE/NECC-National Energy Consumption Center-Ankara-Turkey

ب- مراجع فارسی

- ۱- گزارش پروژه‌های ممیزی انرژی- سازمان بهره‌وری انرژی ایران، ۱۳۸۳-۱۳۷۷
- ۲- دکتر حسن کلهر، مهندسی روشنایی- چاپ سیزدهم، ۱۳۸۱
- ۳- استاندارد صنعت برق ایران- مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی (کیفیت برق)- قسمت دوم، ۱۳۸۱
- ۴- نادر گلستانی داریانی، مدیریت مصرف برق- انتشارات امیرکبیر، ۱۳۸۰
- ۵- Pericles Emanuel, ترجمه دکتر مهرداد عابدی، مبانی ماشین‌های الکتریکی- انتشارات امیرکبیر، ۱۳۸۰
- ۶- دکتر فخراله حیدری، بررسی تلفات الکتریکی در شبکه برق‌رسانی- معاونت برنامه‌ریزی و تحقيقات، ۱۳۷۸
- ۷- کرگ پی، اسمیت، اصول مدیریت انرژی- سازمان بهره‌وری انرژی ایران، ۱۳۷۶
- ۸- مصرف بهینه انرژی روشنایی در ساختمان‌های بزرگ- CADDET, ۱۳۷۶