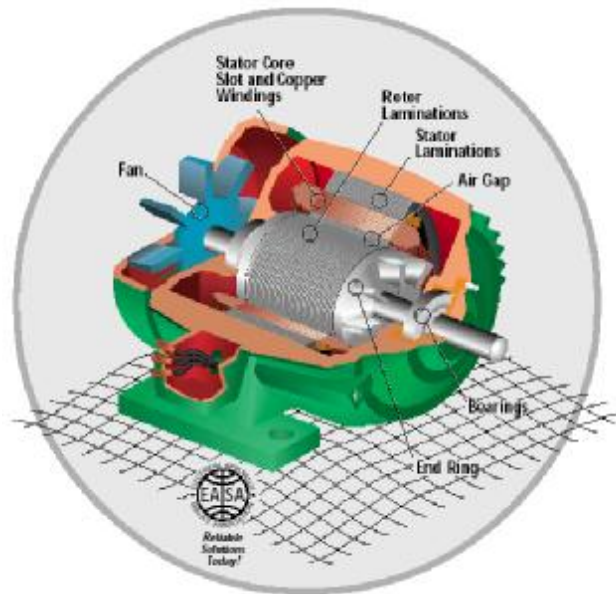


بسمه تعالی

پروژه

## بررسی استفاده از موتورهای الکتریکی سه فاز پر بازده در بخش صنعت

(فصل اول)



شرکت مهندسی آسیاوات

تهران - خیابان آفریقا (جردن)، وحید دستگردی (ظفر) - برج پیم، طبقه 15، واحد 1

تلفن : 88778014 (6 خط) نمابر : 88870687

پست الکترونیکی : [Info@asiawatt.com](mailto:Info@asiawatt.com)

آذر 1382



## چکیده

موتورهای الکتریکی ، به عنوان مبدل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی ، در صنعت به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند . با توجه به گستردگی استفاده از موتورهای الکتریکی در فرآیندهای تولید ، بخش عمده ای از هزینه های انرژی الکتریکی به انرژی مصرفی موتورهای الکتریکی اختصاص دارد . بنابراین در بحث مدیریت و بهینه سازی مصرف انرژی یکی از المان های بسیار مهم ، موتور های الکتریکی می باشند.

با پیشرفت تکنولوژی در چند دهه گذشته طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی دستخوش تغییرات عمده ای بوده و به طور خاص راندمان آنها به طور چشمگیری افزایش یافته است . افزایش راندمان موتورها از یکسو کاهش تلفات انرژی را به دنبال داشته و از سوی دیگر سبب افزایش طول عمر موتورها می گردد .

در بحث مدیریت انرژی با توجه به سهم بالای موتورهای الکتریکی از انرژی مصرفی هر صنعت ، آشنائی با تکنولوژیهای جدید در زمینه تولید و بکار گیری موتورهای الکتریکی راندمان بالا از نیاز های اساسی محسوب می گردد .

در فصل اول این گزارش ، موتورهای الکتریکی نسل جدید مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در فصل دوم موتورهای پربازده با موتورهای استاندارد از دیدگاه فنی و اقتصادی مورد مقایسه قرار می گیرد .

در فصل سوم جنبه های اقتصادی بکارگیری موتورهای پربازده مورد تحلیل قرار گرفته و در فصل چهارم امکان بکارگیری موتورهای پربازده در صنعت مورد تجزیه و تحلیل قرار میگیرد . در فصل پنجم مکانیزم های اجرائی جهت بکارگیری موتورهای پربازده در صنعت ارائه شده و در فصل ششم طرح اجرائی جهت ارزیابی عملکرد موتورهای پربازده در یک سایت نمونه ارائه می گردد.



## فصل اول

### موتورهای پربازده

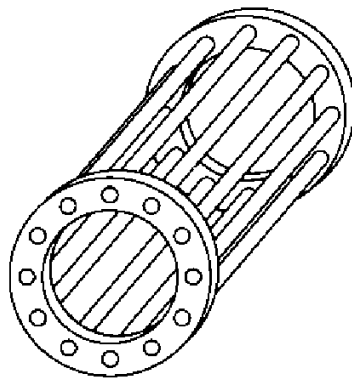
### ۱-۱ - دسته بندی موتورها

در این فصل به اختصار پس از معرفی موتورهای القایی سه فاز و بررسی پارامترهای آنها، به معرفی موتورهای پر بازده ( High And Premium Efficiency Motor ) پرداخته و قابلیت آن ذکر میگردد. [ ۱ ]

یک موتور الکتریکی وسیله‌ای می‌باشد که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. موتورهای سه فاز القایی که در صنعت کاربرد فراوان دارند را می‌توان بصورت زیر تقسیم‌بندی نمود :

#### • موتورهای روتور قفس سنجابی

ساختار روتور این نوع موتورها، از میله‌های موازی که انتهای آنها به یکدیگر متصل می‌باشد، تشکیل شده است. اندازه و مقاومت این میله‌های هادی در پارامترهای منحنی گشتاور - سرعت بسیار موثر می‌باشد.



( شکل ۱ - ۱ ) : شمای روتور موتورهای با روتور قفس سنجابی

در استاندارد NEMA ( National Electrical Manufacture Association ) موتورهای قفس

سنجابی به چهار نوع ( کلاس ) زیر تقسیم بندی شده اند : [ ۱ ]

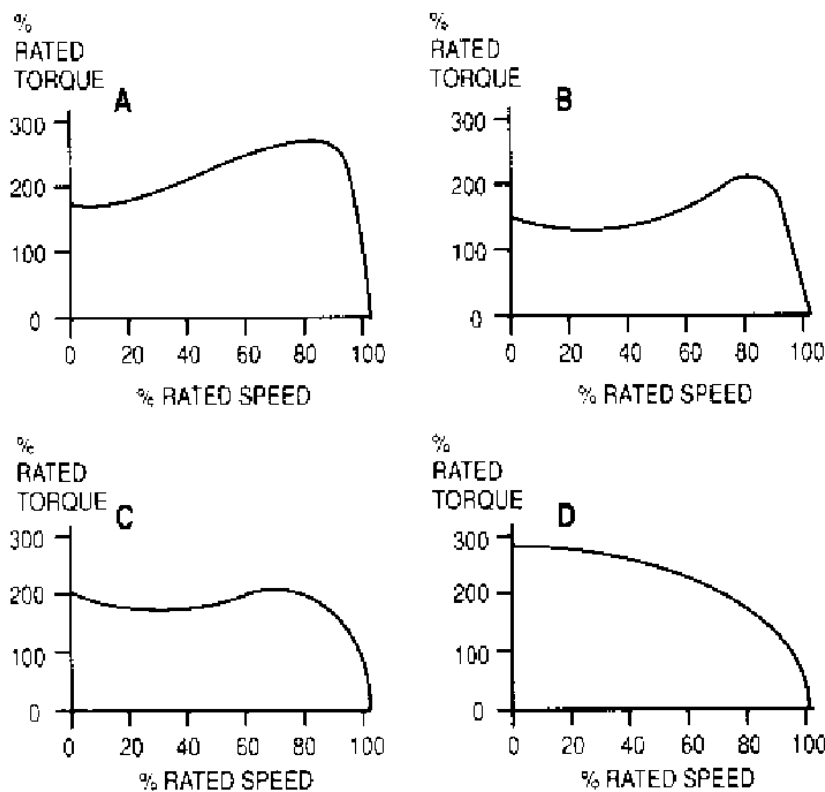
ü موتور کلاس A

ü موتور کلاس B

ü موتور کلاس C

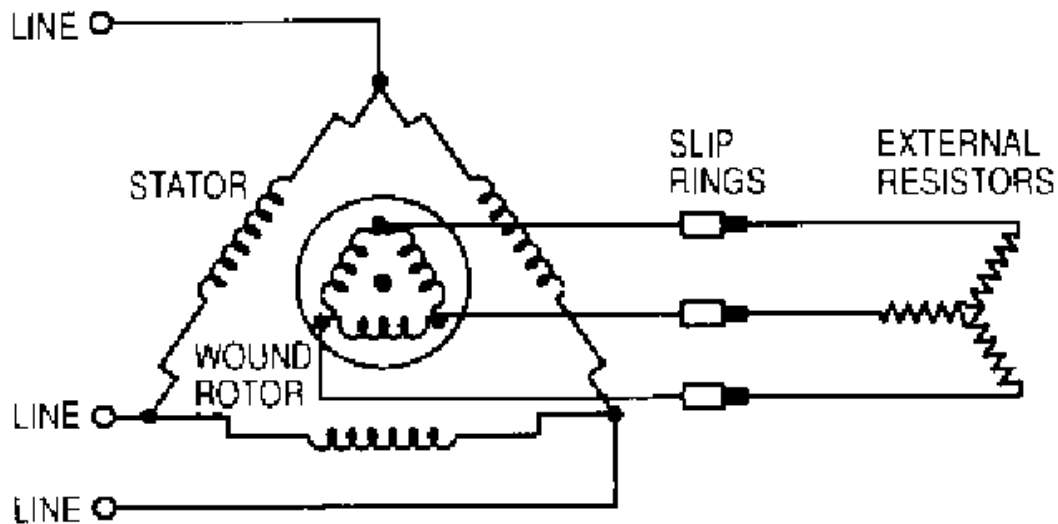
ū موتور کلاس D

رفتار پارامترهای منحنی گشتاور - سرعت کلاس های مختلف موتورهای قفس سنجابی [۱] شامل: گشتاور راه اندازی- لغزش در بار کامل و گشتاور شکست (ماکزیمم گشتاوری که موتور می تواند قبل از توقف تولید نماید.) در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است .



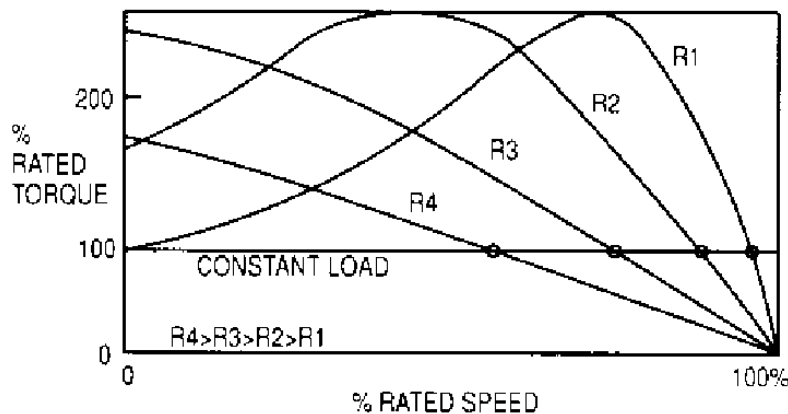
(شکل ۱ - ۲): منحنی گشتاور - سرعت، کلاس های مختلف موتورهای قفس سنجابی

- موتورهای روتور سیم پیچی شده . روتور این موتورها همانند روتور موتورها قفس سنجابی میباشد ، با این تفاوت که بجای میله های هادی موازی روتور آنها از سیم پیچهای که توسط رینگهای لغزنده که روی شفت موتور نصب و مقاومت هائی که جهت کنترل پارامترهای منحنی گشتاور - سرعت در خارج از موتور توسط رینگهای لغزنده ای که بیدیکر متصل میباشند ، تشکیل گردیده اند . در شکل ۱ - ۲ شمای موتور روتور سیم پیچی شده و چگونگی اتصال کوتاه شدن سیم پیچهای داخل موتور با مقاومت های راه انداز و کنترل گشتاور - سرعت ماشین ، نمایش داده شده است [۱].



(شکل ۳-۱): شمای روتورسیم پیچی شده در موتورهای القائی

در شکل ۴-۱ منحنی گشتاور - سرعت موتورهای روتورسیم پیچی شده برای یک بار ثابت در چهار حالت مختلف از مقاومت های خارجی ماشین (EXTERNAL RESISTORS) نمایش داده شده است .

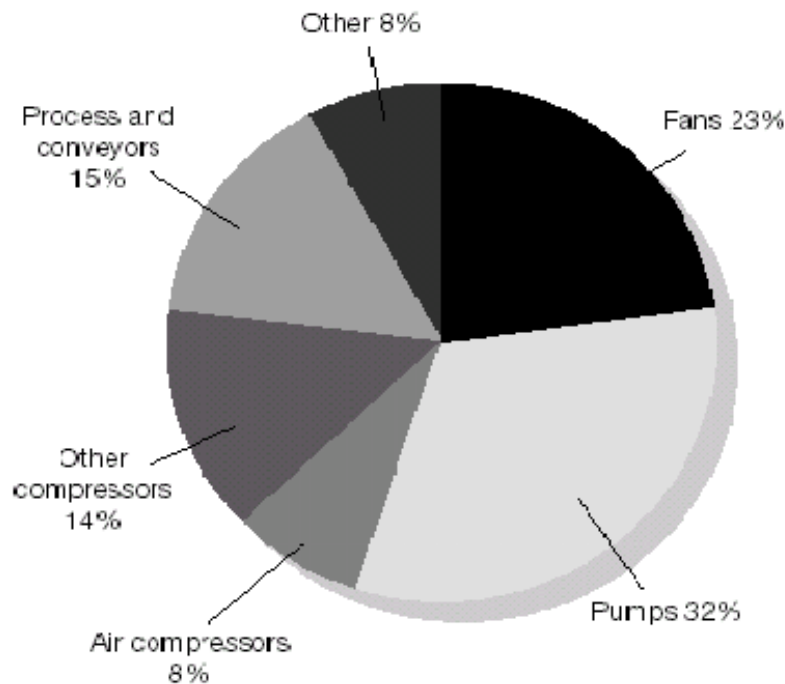


(شکل ۴-۱): نمودار گشتاور - سرعت روتورسیم پیچی شده در چهار حالت مختلف از مقاومت های خارجی (EXTERNAL RESISTORS)

لازم بذکر است که ماکزیمم گشتاور یک موتور الکتریکی ، بستگی به نوع طراحی و ساختار روتور آن داشته و با مقاومت های خارجی که در شکل ۳-۱ نمایش داده شده تنها می توان سرعت در گشتاور ماکزیمم موتور و گشتاور راه اندازی موتور را تغییر داد .

## ۲-۱ - میزان انرژی الکتریکی مصرفی حاصل از موتورها

موتورهای الکتریکی القایی سه فاز در توانهای مختلف و در طیف وسیعی در صنایع و کارخانجات صنعتی بکار می روند ، بهمین دلیل میزان انرژی الکتریکی مصرف شده حاصل از کارکرد این موتورهای صنعتی نسبت به دیگر وسایل الکتریکی ، قابل توجه می باشد [ ۲ ] . بصورت نمونه یک مقایسه بین درصد انرژی الکتریکی مصرفی حاصل از موتورها و دیگر وسایل برقی در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است . همانطور که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود ، بخش اعظم انرژی الکتریکی مصرفی سالیانه اختصاص به موتورهای القایی صنعتی دارد .



( شکل ۵ - ۱ ) : میزان انرژی الکتریکی مصرفی انواع موتورهای القایی در صنعت

بنابراین اگر در بحث بهینه سازی انرژی الکتریکی بتوان با اتخاذ تدابیری انرژی الکتریکی مصرفی حاصل از کارکرد موتورها را به بهینه نمود، کاهش انرژی الکتریکی مصرف شده چشمگیر خواهد بود. جهت مصرف انرژی الکتریکی قابل توجه موتورهای صنعتی، در راستای بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی که یکی از اهداف مهم مدیریت انرژی می باشد، سیاستهای طراحی و ساخت موتورهای با



راندمان بالا و راندمان اقتصادی در کشورهای صنعتی اتخاذ گردید و این موضوع منجر به طراحی و ساخت نسل جدید موتورهای صنعتی با نام موتورهای پربازده (موتورهای راندمان) گردیده است.

### ۳-۱ - موتورهای پربازده ( High And Premium Efficiency Motor )

بر اساس استانداردهای موتورهای الکتریکی تغییرات ۲۰+ درصد در راندمان نامی موتور مجاز بوده و بنابراین موتورهای الکتریکی عملاً دارای راندمانی پایین تر از راندمان نوشته شده بر روی پلاک موتور میباشند [ ۳ ]. این بدان دلیل است که اختلافات موجود در جنس و کیفیت مواد بکار رفته در موتورها و متمایز بودن پروسه ساخت و تولید برای کارخانجات سازنده مختلف، وجود دارد.

در سال ۱۹۸۹ استاندارد برای موتورهای پربازده ( energy – efficiency motors ) توسط ( NEMA ( National Electrical Manufactures Association )، جهت رساندن راندمان موتور به راندمان نامی نوشته شده به روی پلاک آن تدوین و روشهای طراحی و ساخت موتور جهت دارا بودن راندمان بالاتر ارائه گردید. همچنین در استاندارد NEMA MG 1-12.55، میزان ممینیم و ماکزیم راندمان برای موتورهای القائی سه فاز قفس سنجابی پربازده مشخص گردید [ ۴ ]. در استانداردها یک موتور راندمان بالا ( پربازده ) بصورت زیر تعریف شده است:

موتوری می باشد که توان مکانیکی خروجی مشابهی نسبت به موتور هم نوع خود در جدول استاندارد داشته باشد با این تفاوت که توان الکتریکی ورودی آن کمتر باشد. [ ۳ ]

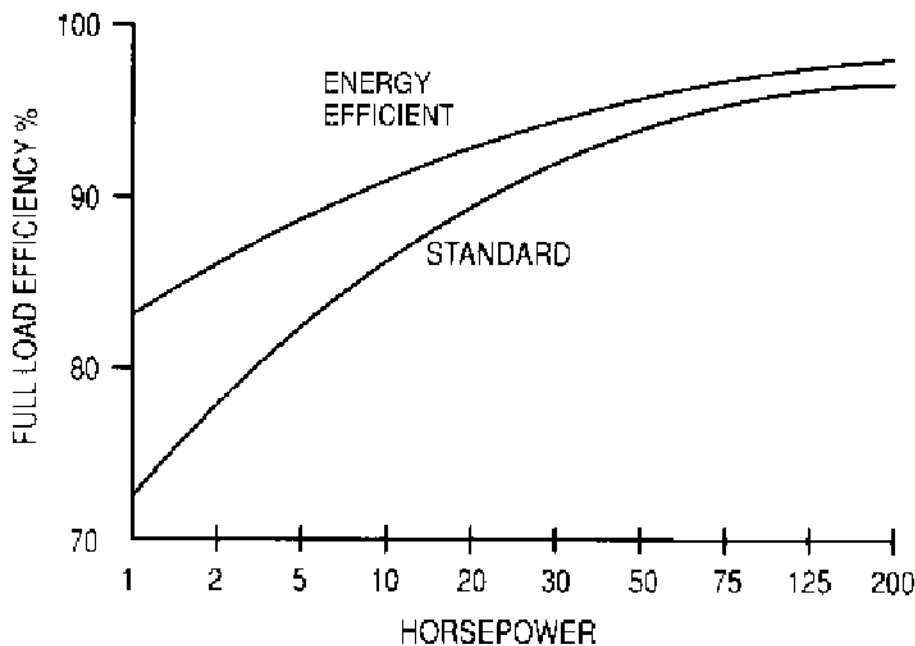
کلمه و لغت «بالا» در عبارت راندمان بالا، اغلب می بایست مبین یک راندمان بزرگتر نسبت به استاندارد موتور همسان باشد. [ ۳ ]

البته راندمان بالا در یک بازده وسیع نمی باشد و محدود خواهد بود. زیرا کلمه استاندارد و راندمان بالا باتوجه به نوع موتور و محدودیت مواد تشکیل دهنده، طبعاً تا یک حد معقول و منطقی قابل اجرا خواهد بود.

کلمه و لغت «اقتصادی» در عبارت راندمان اقتصادی، بدین معناست که: با در نظر گرفتن و توجه به بهینه شدن هزینه ها، بالابردن راندمان موتور، تاحد بهینه صورت گیرد. [ ۳ ]



منظور از موتورهای با راندمان اقتصادی ، موتورهایی است که راندمان موتور ، ۲ الی ۸ درصد بیشتر از رنج استاندارد آنها باشد [ ۳ ] . در شکل ۶- ۱ نمودار توان - راندمان در بار کامل ، برای موتورهای استاندارد و موتورهای پربازده ( موتورهای نسل جدید ) نمایش داده شده است . همانطور که مشاهده می شود منحنی راندمان ( بازده ) حاصل از موتورهای پربازده در بار کامل نسبت به موتورهای استاندارد هم نوع ، وضع مطلوبتری و بهتری دارد .



( شکل ۶- ۱ ) : مقایسه منحنی توان - راندمان موتورهای پربازده با موتورهای استاندارد

#### ۴-۱ - اقدامات بکار رفته در طراحی و تولید موتورهای پربازده [ ۴ ]

طراحی و جنس و میزان مواد بکار رفته و کیفیت مواد تشکیل دهنده در موتورهای پربازده، بگونه ای در نظر گرفته شده که این موتورها دارای راندمان بالا و اقتصادی با ایجاد کمترین تلفات باشند .

در این موتورها اقدامات و تدابیر خاصی که در طراحی و ساخت و تولید اجزاء تشکیل دهنده آنها انجام می شود را می توان به شش مرحله تقسیم نمود .

ن<sup>۱</sup> طراحی بهینه روتور و میله های روتور جهت ایجاد راندمان بالا

ن<sup>۲</sup> طراحی بهینه در استاتور و شیارهای آن

ن<sup>۳</sup> کیفیت و جنس مواد بکار رفته در روتور و استاتور

ن<sup>۴</sup> کاهش فاصله هوایی بین استاتور و روتور



ü طراحی بهینه سیم پیچی های استاتور و کاهش اصطکاک قسمت‌های مکانیکی

ü بالا بردن کیفیت در امر ساخت و تولید توسط کارخانجات سازنده

## ۵-۱ - استراتژی کاهش تلفات ناشی از کارکرد موتورها [ ۲ ]

باتوجه به اینکه موتورهای AC به طور گسترده در صنایع مختلف و کارخانجات صنعتی مورد استفاده قرار میگیرند ، جهت کاهش تلفات ناشی از موتورها می‌بایست به روشهای زیر عمل نمود :

### • استفاده از موتورهای پربازده یا راندمان بالا ( HEMs )

امروزه این نوع موتورها بدلیل دارا بودن شاخص ها و پارامترهایی که آنها را نسبت به موتورهای استاندارد متمایز می نماید ، مورد توجه صنایع قرار گرفته اند . در این نوع موتورها بدلیل روش طراحی خاص ، کیفیت و جنس مواد بکار رفته در آنها و دیگر اقدامات موثر در ساخت و تولید آنها تلفات داخلی موتور نسبت به موتورهای متناظر مرسوم بسیار کمتر و دارای راندمان بالاتری می باشد . بنابراین برنامه و سیاست گذاری جهت جانسین نمودن تدریجی آنها با موتورهای موجود امری ضروری محسوب میگردد.

• حصول اطمینان از تعمیر دقیق موتورها که باعث مینیمم شدن تلفات ناشی از موتورها خواهد شد .

• انتخاب صحیح توان و نوع موتور باتوجه به نوع بهره‌برداری از آن .

هر موتور جدید خریداری شده و یا جانسین شده می‌بایست انتظاراتی را که جهت انجام آن کار تهیه می‌شود را تأمین نماید . شاخص‌های مورد نیاز در انتخاب نمودن موتورها که بعنوان یک مدل اقتصادی در انتخاب آنها می‌باشد، بصورت زیر معرفی میگردد [ ۳ ] :

ü قدرت موتور (اسب بخار) و فاکتور سرویس

ü ولتاژ تغذیه

ü ماکزیمم جریان راه‌اندازی

ü محدوده حرارتی و کلاس عایق‌بندی

ü ضریب قدرت

ü مینیمم زمان توقف

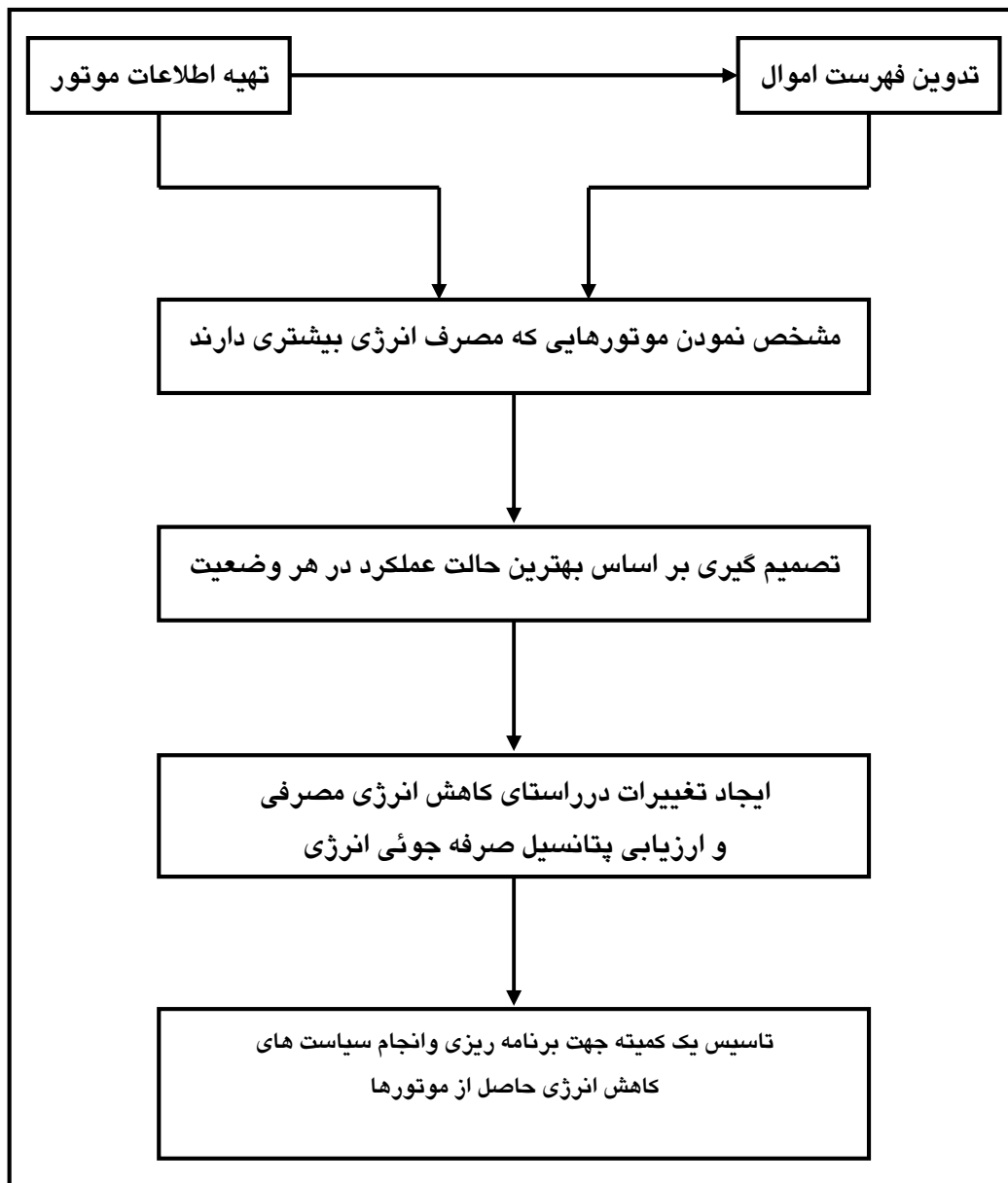
ü راندمان

ü میزان و حد بارگزاری در حال راه‌اندازی و تعداد راه‌اندازیها در ساعت

ü وظیفه و نوع کار موتور و شرایط محیط کار آن

ü حفاظت قسمت‌های مورد نیاز و دیگر شرایط و موارد خاص

همچنین جهت بدست آوردن یک راندمان صحیح و مطلوب از موتورها و بهره‌برداری بهینه از آنها، نیاز به انتخاب مناسب موتور برای کار مربوطه با مشخصات و شرایط بهره‌برداری خاص میباشد . بنابراین بهره‌برداری از موتورها خارج از محدوده تعیین شده برای آنها نتایج نامطلوبی را بهمراه خواهد داشت . بطور کلی اتخاذ یک استراتژی جهت کاهش تلفات ناشی از موتورهای AC (مدیریت موتور) بسادگی حاصل نمی‌گردد . در شکل ۷-۱ بلوک دیاگرام استراتژی کاهش تلفات موتورها نشان داده شده است [ ۲ ] .



شکل ۷-۱ : بلوک دی‌اگرام استراتژی کاهش تلفات ناشی از کارکرد موتورها [ ۲ ]



## ۶-۱ - تعمیر و نگهداری ( MAINTENANCE )

در بحث تعمیر و نگهداری موتورها که یک بخش مهم و اساسی می باشد ، اگر برنامه زمان بندی صحیحی جهت تعمیر و نگهداری تدوین گردد ، طبعاً طول عمر موتورها نسبت به حالتی که برنامه زمانبندی نادرستی اتخاذ گردیده باشد ، بیشتر خواهد شد [ ۲ ] .

در بخش تعمیر و نگهداری موتورها با توجه به نوع موتور و ساعات کارکرد آن در روز ، یک پریود کاری برای موتورها توسط کارخانجات سازنده آنها تعیین میگردد که بعد از آن پریود زمانی مشخص شده ، موتور باید جهت امر سرویس (تعمیر و نگهداری) از خط خارج و سرویس های لازم روی آن انجام پذیرد .

بنابراین با توجه به این که در کارخانجات صنعتی انواع موتورها در توانها و سایزهای مختلف وجود دارند ، بنابراین برنامه تعمیر و نگهداری آنها نیز متفاوت خواهد بود . در نتیجه اتخاذ یک روش جهت تدوین برنامه زمان بندی برای کل مجموعه امری دشوار خواهد بود و نیازمند اتخاذ سیاست هائی مناسب از طرف یک مدیر خبره می باشد .

## ۷-۱ - سیاستهای مدیریت موتور [ ۲ ]

سیاست مدیریت موتور جهت کاهش هزینه های حاصل از موتورها ، شامل سه بخش عمده زیر خواهد بود :

- تدوین یک برنامه تعمیر و نگهداری متقارن .
- سیاست خریداری نمودن موتورهای پربازده ( HEMs ) در صورت نیاز به خرید موتور .
- جانشین نمودن یا دوباره سیم پیچی نمودن موتورهای معیوب براساس هزینه های طول عمر آنها .

## ۸-۱ - پارامترهای مؤثر در راندمان یک موتور [ ۱ ]

موتورهای القائی قفس سنجابی سه فاز بدلیل داشتن مزایایی از قبیل :

- هزینه پایین
- قابلیت اطمینان بالا
- راندمان بالای مطلوب

نسبت به انواع دیگر موتورها ، در صنعت بیشتر بکار گرفته میشوند . در این نوع موتورها هیچگونه ارتباط الکتریکی بین روتور و استاتور وجود ندارد . بنابراین سرعت میدان مغناطیسی دوار استاتور یک موتورهای القایی تنها بوسیله فرکانس منبع تغذیه و تعداد قطبهای تشکیل دهنده که در رابطه ۱ - ۸ نشان داده شده ، محاسبه می گردند . [ ۱ ]

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (\text{RPM}) \quad (1-1)$$



که در آن :

f : فرکانس منبع تغذیه

p : تعداد قطبهای موتور الکتریکی

$n_s$  : سرعت سنکرون میدان مغناطیسی دوار استاتور

بنابراین سرعت روتور از رابطه ۲ - ۸ بصورت زیر محاسبه می گردد :

$$n_r = (1-s) n_s \quad (1-2)$$

که در آن :

s : لغزش موتور

$n_r$  : سرعت روتور

بطور کلی راندمان نهایی و درحین کار یک موتور الکتریکی به فاکتورهای زیر بستگی دارد :

راندمان خود موتور  $\eta$

کنترلرهای سرعت موتور  $\eta$

کیفیت منبع تغذیه ( کیفیت توان )  $\eta$

متناسب بودن موتور برای کار مورد نظر ( Oversizing )  $\eta$

شبکه توزیع  $\eta$

انتقال مکانیکی  $\eta$

برنامه تعمیر و نگهداری  $\eta$

مدیریت بار و سیکل بار  $\eta$

راندمان تجهیزات متصل به موتور ( از قبیل فن - پمپ و غیره )  $\eta$

## ۹-۱ - دلایل انتخاب موتورها با توان بالاتر [ ۲ ]

موتورها بدلائل زیر کمی بزرگتر نسبت به اندازه مورد نظر انتخاب می گردند :

- بالا بردن قابلیت اطمینان در برابر خطاها و پروسه های بحرانی
  - توانایی افزایش تولید در آینده ( افزایش بار موتور بدلیل رشد های آتی مجموعه )
  - تغییرات بار (موتورهای بزرگتر می توانند بارهای اضافه را سرویس دهی نمایند بدون اینکه از خط خارج شوند )
  - نامتعادلی ولتاژ ( عدم تثبیت ولتاژ ) . هر چه موتور نسبت بکار مورد نظر بزرگتر انتخاب گردد طبعا در برابر نامتعادلی های ولتاژ دارای قابلیت اطمینان بیشتری از جهت تحمل در برابر ولتاژهای نامتعادل ، خواهد بود .
- متأسفانه انتخاب نادرست موتورها ، باعث افزایش هزینه های خرید ، افزایش هزینه انرژی الکتریکی مصرف شده و کاهش راندمان موتورها خواهد گردید .



برای مثال اگر یک موتور با فاکتور سرویس دهی 1.15 انتخاب گردد (موتور بزرگتر انتخاب شود)، راندمان ماکزیمم موتور مزبور در 115% از بار کامل حاصل خواهد شد. و چون موتور بزرگتر انتخاب شده است، راندمان پایین تری در حین کار خواهد داشت و این امر یعنی افزایش هزینه انرژی الکتریکی مصرفی. اما اگر یک موتور پربازده (High Efficiency Motors - HEMs) بجای این موتور استفاده شود، در اینصورت راندمان ماکزیمم را در بار کامل خواهیم داشت. زیرا در این نوع موتورها توانایی نگهداشتن سرعت موتور نزدیک به سرعت سنکرون و خنثی نمودن (حذف کردن) برخی از بهره های انرژی باتوجه به نوع طراحی راندمان و عملکردشان، وجود دارد.

### ۱۰-۱ - انتخاب توان موتور

حال به بررسی روش بدست آوردن توان موتور مورد نیازی می پردازیم که می بایست باری را که در زمانهایی از پیروید کاری (Duty Cycle) دارای تغییرات متناوب بار می باشد، تغذیه نماید. بنابراین رابطه ۳-۱ جهت بدست آوردن توان موتور ارائه شده است. [ ۱ ]

$$HP_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum HP^2 t}{\sum t}} \quad (1-3)$$

که در آن :

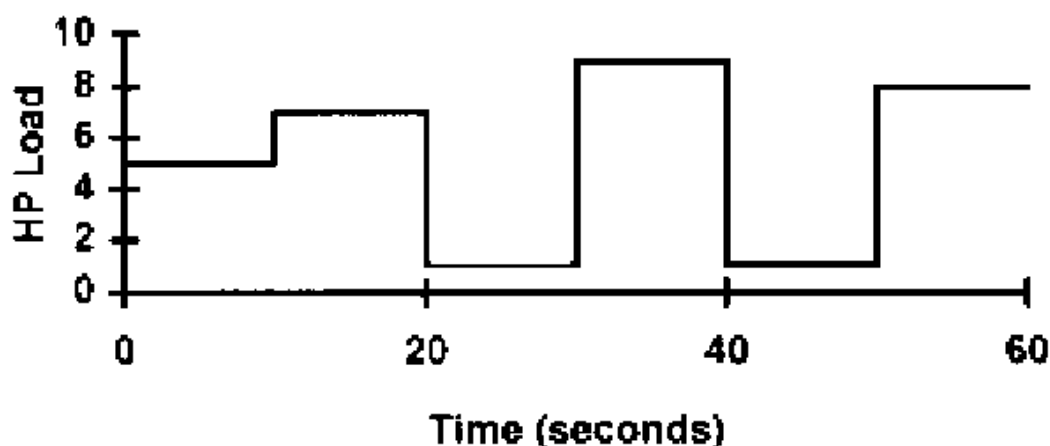
$HP_{RMS}$ : مقدار توان موثر موتور انتخابی بر حسب اسب بخار

$HP$ : توان بار تغییر یافته متناوب در دوره کاری (duty cycle) بر حسب اسب بخار

$t$ : بازه زمانی بارهای متناوب

برای درک بیشتر مثالی را در نظر بگیرید که در آن دوره کاری (duty cycle) یک بار متغیر متناوب بصورت شکل ۸-۱ می باشد.

### Repeating Duty Cycle Curve





(شکل ۱-۸): دوره کاری یک بار متغیر متناوب

بنابراین باتوجه به شکل ۱-۸ می توان پارامترهای رابطه ۱-۳ را بدست آورد که نتایج آن در جدول ۱-۱۰ ارائه گردیده است .

(جدول ۱-۱). پارامترهای دوره کاری موتور

| زمان              | ۰ - ۱۰ | ۱۰ - ۲۰ | ۲۰ - ۳۰ | ۳۰ - ۴۰ | ۴۰ - ۵۰ | ۵۰ - ۶۰ |
|-------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| توان (HP)         | ۵      | ۷       | ۱       | ۹       | ۱       | ۸       |
| HP <sup>2</sup> t | ۲۵۰    | ۴۹۰     | ۱۰      | ۸۱۰     | ۱۰      | ۶۴۰     |

حال بکمک رابطه ۱-۳ میتوان توان موتور مورد نیاز را بصورت زیر محاسبه نمود :

$$HP_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum (250 + 490 + 10 + 810 + 10 + 640)}{\sum (10 + 10 + 10 + 10 + 10)}} = 6.07$$

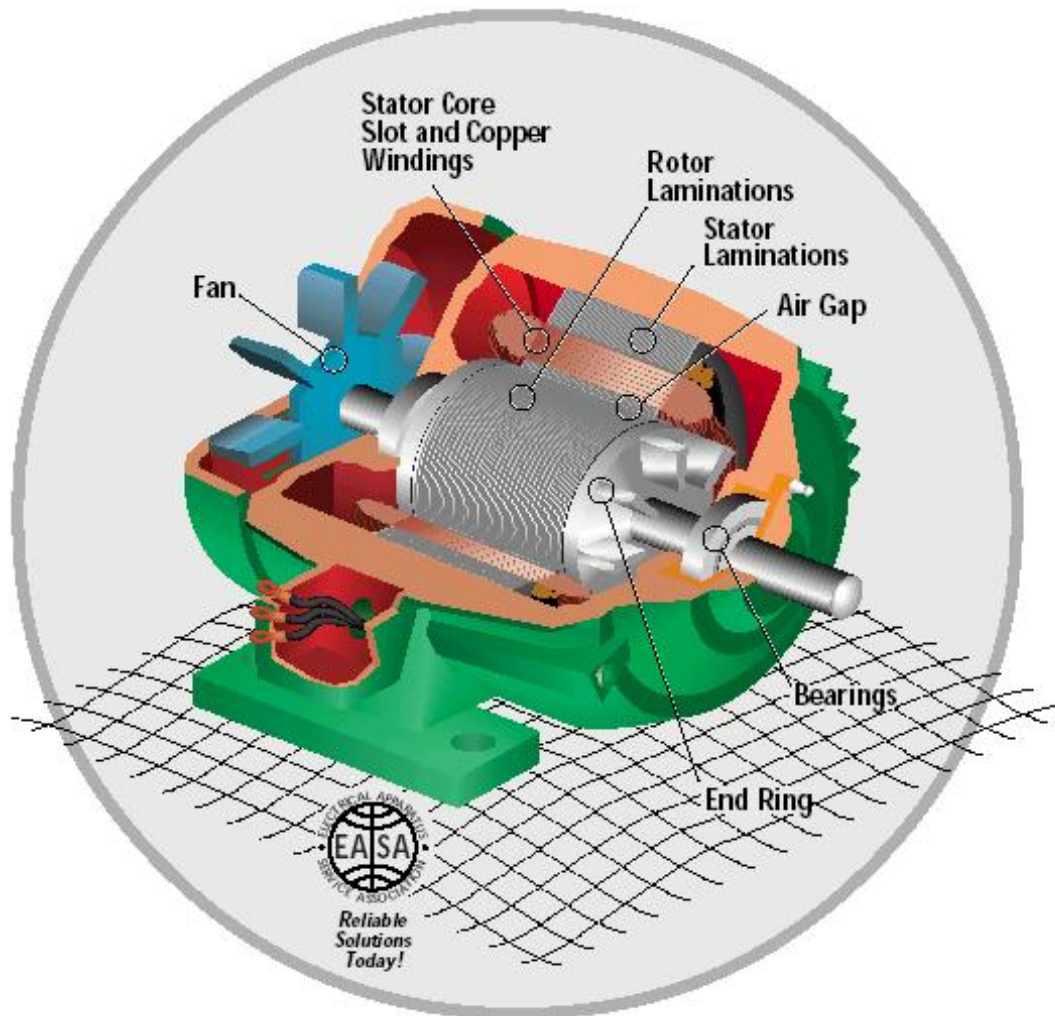
پس موتوری که دارای توان ۶ اسب بخار باشد برای کار عنوان شده در مثال مناسب خواهد بود . لازم بذکر است که یکی از پارامترهای مهم در انتخاب موتورهای الکتریکی ، ماکزیمم باری است که موتور باید تغذیه کند . همچنین این نکته حائز اهمیت است که هر موتور درصد محدودی بیشتر از توان نامی خود را می تواند تغذیه نماید . لذا در استفاده از رابطه ۱-۳ به نکات فوق الذکر بایستی دقت نمود .

### ۱-۱۱ - مزایای موتورهای پر بازده ( HIGH EFFICIENCY MOTORS )

همانطور که قبلاً نیز گفته شد ، موتورهای پر بازده با توان مکانیکی خروجی مشابه و توان الکتریکی مصرفی ( kW ) کمتر نسبت به موتورهای استاندارد ممنوع خود عمل می کنند . میتوان فوائد موتورهای پر بازده را بطور خلاصه بصورت زیر ارائه نمود : [ ۵ ]

- ü کاهش انرژی الکتریکی مصرفی یا توان الکتریکی ورودی ( kW ) .
- ü دارا بودن راندمان بالا و اقتصادی .
- ü کاهش انواع تلفات ناشی از کارکرد این موتورها .
- ü دارا بودن پارامترهای ذخیره انرژی و دیمانند .
- ü کاهش دیمانند .
- ü کاهش هزینه‌ها بدلیل کاهش تلفات ، کاهش انرژی الکتریکی مصرفی و کاهش دیمانند .
- ü کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری .
- ü جدید و به روز شدن تکنولوژی موتورهای القایی بکار رفته در صنعت با جانشین نمودن آنها بجای موتورهای موجود .

در شکل ۹-۱ برش طولی از یک موتور پربازده جهت آشنائی بیشتر نمایش داده شده است [۵] .



( شکل ۹-۱): برش طولی از یک موتور پربازده





با معرفی و آشنایی موتورهای پربازده و دانستن فواید آنها در صنعت و مبحث مدیریت انرژی، میتوان جایگاه نسل جدید موتورها (موتورهای پربازده یا موتورهای راندمان) را در صنعت بشدت احساس نمود. بنابراین نیاز است که مدیران و سرمایه گذاران کارخانجات صنعتی و صنایع با موتورهای پربازده (موتورهای راندمان) و پارامترهای آنها در اقتصادی بودن هزینه های مصرف انرژی الکتریکی - دیمانند و دیگر هزینه های مباحث مدیریت انرژی بیشتر آشنا شده و سیاست های جایگزینی این موتورها (موتورهای پربازده) با موتورهای موجود (موتورهای استاندارد) را اتخاذ نمایند. در فصل بعدی جهت آشنائی با ساختارهای فنی و چگونگی طراحی این موتورها و همچنین مقایسه فنی و اقتصادی این نوع موتورها (موتورهای پربازده) با موتورهای استاندارد، ارائه و بتفصیل شرح داده شده است.

## ۱۲-۱ - تحلیل اقتصادی بکارگیری موتورهای پربازده

پس از معرفی و آشنایی با موتورهای پربازده و آگاهی از اقدامات خاص در طراحی و ساخت این موتورها و فوائد کاربرد آنها در صنعت که در بخشهای قبل ارائه گردید، در این قسمت به بحث اقتصادی بکارگیری این موتورها به جای موتورهای موجود (موتورهای استاندارد) پرداخته می شود. ساختار داخلی موتورهای پربازده نسبت به موتورهای استاندارد متفاوت است. طراحی شکل اجزاء تشکیل دهنده، بهینه نمودن نوع و میزان مواد بکار رفته در آنها، رمز رسیدن به یک موتور پربازده می باشد. ساختمان داخلی آنها طوری طراحی می گردد که در ایجاد راندمان بالا و اقتصادی و کاهش تلفات نسبت به موتورهای استاندارد مؤثر باشد. لذا این موتورهای الکتریکی تلفات کمتری نسبت به موتورهای استاندارد داشته و با کمتر شدن تلفات به دلیل طراحی خاص این موتورها، انرژی الکتریکی مصرفی آنها نسبت به موتور استاندارد همونوع خود کمتر خواهد بود.

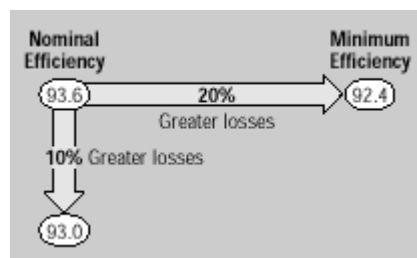
### ۱-۱۲-۱ - راندمان نامی (Nominal Efficiency)

بر اساس استاندارد NEMA راندمان نامی یک ماشین الکتریکی عبارتست از: میانگین راندمان بدست آمده از راندمانهای مجموعه بزرگی (تعداد زیادی) از موتورهای هم رنج و همسان [۶].

### ۱-۱۲-۲ - راندمان مینیمم (Minimum Efficiency)

مینیمم راندمان یک موتور بصورت زیر تعریف شده است: راندمانی که از کاربرد حداقل کیفیت و میزان مواد تشکیل دهنده در موتور که برطبق استاندارد تعریف شده است، بدست می آید [۶].

در شکل ۱۰-۱ یک گراف از تلفات به جهت تغییر راندمان طبق استاندارد IEEE-112-Method B نمایش داده شده است.



(شکل ۱۰-۱): میزان افزایش تلفات بجهت تغییر راندمان



همانطوریکه از شکل ۱۰ - ۱ همانطور که مشاهده می گردد اگر راندمان نامی به مینیمم راندمان کاهش یابد تلفات ۲۰ درصد افزایش و اگر راندمان از ۹۳/۶ (راندمان نامی) به ۹۳ برسد تلفات ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت .

### ۳-۱۲-۱ - توجیه پذیری اقتصادی

در این بخش بحث اقتصادی بودن بکارگیری موتورهای پربازده نسبت به موتورهای استاندارد هممنوع آنها بررسی و تحلیل می گردد. ابتدا پارامترهایی که در توجیه پذیری اقتصادی بکارگیری موتورهای پربازده وجود دارند ، تعیین می گردد. سپس بکمک آنها مطالعات اقتصادی جهت بکارگیری موتورهای پربازده به جای موتورهای استاندارد صورت گرفته و میزان صرفه جوئی در هر پارامتر مشخص می گردد . در ادامه روش محاسبه این پارامترها ارائه می گردد.

### ۴-۱۲-۱ - هزینه صرفه جویی انرژی سالیانه ( Energy Saving )

در موتورهای پربازده به دلیل اینکه سعی در کاهش هرچه بیشتر انواع تلفات موتور می گردد، طبیعتاً دارای توان ورودی کمتری بدلیل کاهش تلفات داخلی موتور نسبت به موتورهای هممنوع در جدول استاندارد می باشد . بنابراین توانی که صرف تلفات داخلی موتورهای پربازده میشود ، بسیار کمتر از توان مصرفی موتور استاندارد خواهد بود و لذا انرژی الکتریکی مصرفی با بکار بردن موتورهای پربازده نسبت به موتورهای استاندارد هممنوع کاهش یافته و هزینه پرداختی حاصل از انرژی مصرفی سالیانه کمتر خواهد شد . این بدان معنی است که در واقع هزینه ای از بابت کارکرد موتورهای پربازده در مقایسه با کارکرد موتورهای استاندارد صرفه جویی می شود .

### ۵-۱۲-۱ - هزینه صرفه جویی انرژی ناشی از جانشینی موتور پربازده بجای موتور سالم از نوع

#### استاندارد

در صورت تعویض یک موتور پربازده با یک موتور استاندارد متناظر که در حال کار بوده و زمان ساخت تاکنون تعمیر نگردیده است هزینه انرژی صرفه جویی شده از رابطه ۱-۱-۵ بدست می آید. همچنین در صورت مقایسه نصب موتور پربازده به جای موتور استاندارد از دیدگاه هزینه صرفه جویی شده می توان از رابطه ۴-۱ استفاده نمود [ ۷ ] .

$$S = 0.746 * C * LF * N * \left[ \left( \frac{100}{E_S} \right) - \left( \frac{100}{E_H} \right) \right] * P_{AVG} \quad (۱-۴)$$

که در آن:

S: هزینه انرژی صرفه جویی شده سالیانه حاصل از کارکرد موتور پربازده .

0.746: ضریب تبدیل توان اسب بخار به کیلووات .



- C: توان نوشته شده روی پلاک موتور بر حسب اسب بخار .  
 LF: ضریب بار کارکرد موتور .  
 N: تعداد ساعات کارکرد موتور در سال .  
 $E_S$ : راندمان موتور موجود (موتور استاندارد) .  
 $E_H$ : راندمان موتور پربازده .  
 $P_{AVG}$ : متوسط هزینه انرژی بر حسب H - KW / \$ .

### ۶-۱۲-۱ - هزینه انرژی صرفه جویی شده ناشی از جایگزینی با جانشینی موتور پربازده بجای موتور تعمیر شده از نوع استاندارد

موتورها به دلایل خطاهای ایجاد شده در شبکه تغذیه مانند اتصال کوتاه ها و ... یا بدلیل فرسودگی اجزاء و خراب شدن آنها بدلیل کارکرد زیاد مانند خراب شدن بلبرینگ ها و ، نیازمند تعمیر خواهند بود . بدلیل پایین بودن کیفیت مراحل تعمیر بخصوص پایین بودن کیفیت مواد بکار رفته در تعمیرات ، راندمان موتور خواهد بود . البته میزان کاهش راندمان بستگی به کیفیت تعمیر مراکز مختلف تعمیر موتور متفاوت خواهد داشت . در صورت جایگزینی یک موتور پربازده بجای یک موتور تعمیر شده و یا معیوب ، میزان هزینه انرژی صرفه جویی شده از رابطه ۵-۱ محاسبه می گردد [ ۸ ] .

$$S = 0.746 * HP * C * N \left( \frac{100}{E_B} - \frac{100}{E_H} \right) \quad (۱-۵)$$

که در آن:

- S: هزینه انرژی صرفه جویی شده سالیانه حاصل از کارکرد موتور پربازده .  
 0.746: ضریب تبدیل اسب بخار به کیلووات .  
 C: هزینه انرژی بر حسب H - KW / \$ .  
 N: تعداد ساعات کارکرد موتور در سال .  
 $E_B$ : راندمان موتور تعمیر شده موجود که طبیعتاً کمتر از راندمان نامی موتور می باشد .  
 $E_H$ : راندمان موتور پربازده .

### ۷-۱۲-۱ - صرفه جویی در هزینه دیماندا ( Demand Cost Saving )

کاهش انرژی الکتریکی مصرفی ناشی از بکارگیری موتورهای پربازده نهایتاً کاهش دیماندا (تقاضا) و همچنین کاهش هزینه دیماندا را در پی خواهد داشت . هزینه صرفه جویی شده بدلیل کاهش دیماندا از رابطه ۶-۱ بدست می آید [ ۸ ] .

$$S = 0.746 * HP * \left( \frac{100}{E_B} - \frac{100}{E_A} \right) * MDC * NM \quad (۱-۶)$$



که در آن:

- S : هزینه سالیانه صرفه جویی شده ناشی از کاهش دیمانند حاصل از کارکرد موتور پربازده .
- 0.746 : ضریب تبدیل اسب بخار به کیلووات .
- MDC : هزینه دیمانند ماهانه برحسب \$ /KW .
- NM : تعداد ماه های سال .
- $E_B$  : راندمان موتور موجود .
- $E_A$  : راندمان موتور پربازده .

### ۸-۱۲-۱ - طول عمر موتور

پس از مطالعه چگونگی محاسبه هزینه انرژی صرفه جویی سالیانه بدلیل کارکرد موتور پربازده نسبت به موتور هم‌نوع استاندارد، در این قسمت به بررسی هزینه انرژی صرفه جویی شده در طول عمر موتور پربازده جایگزین شده و یا هر بازه زمانی دلخواه پرداخته می شود. هزینه انرژی صرفه جویی شده در طول عمر موتور پربازده جایگزین شده و یا هر بازه زمانی دلخواه از رابطه ۷-۱ بدست می آید [ ۹ ] .

$$LCS = 0.746 * HP * L * EF \left( \frac{100}{E_B} - \frac{100}{E_A} \right) \quad (۷-۱)$$

که در آن:

- LCS : هزینه انرژی صرفه جویی شده در طول عمر یا هر بازه زمانی مورد نظر
- $E_B$  : راندمان موتور موجود از نوع استاندارد .
- $E_A$  : راندمان موتور پربازده .
- HP : توان موتور پربازده برحسب اسب بخار .
- L : ضریب بار .

- EF : فاکتور ارزیابی می باشد و به صورت  $EF = C * N * n$  تعریف می گردد که در آن:
- C : متوسط هزینه انرژی بر حسب \$ / KW-H .
- N : تعداد ساعات کارکرد موتور در سال .
- n : تعداد سالهای عمر مفید موتور یا تعداد سال های مورد ( پیرو ) نظر جهت مطالعه .

### ۹-۱۲-۱ - هزینه کارکرد موتور در سال ( Operation Cost )

هزینه ای که صرف کارکرد سالیانه یک موتور الکتریکی القائی می شود ، طبق رابطه ۸-۱ قابل محاسبه خواهد بود . [ ۹ ]



$$\text{Operating Cost} = \frac{0.746 * \text{HP} * \text{Loading} * \text{Operating Hours} * \text{Rate}}{\text{Motor Efficiency}} \quad (1-8)$$

که در آن:

Operating Cost : هزینه عملکرد سالیانه موتور برحسب ( سال / ریال )

HP : توان موتور برحسب اسب بخار .

Loading : میزان بارگذاری .

Operating Hours : تعداد ساعات کارکرد موتور در سال

Rate : درصد متوسط هزینه انرژی که از متوسط هزینه انرژی مصرفی و دیمانده حاصل می‌گردد

Motor Efficiency : راندمان موتور .

قابل توجه است که اگر دقیقاً پارامتر Loading موتور مشخص نباشد ، با یک تقریب خوب می‌توان آنرا ۶۵٪ در نظر گرفت [ ۷ ] .

**۱۰-۱۲-۱ - هزینه کارکرد موتور در طول عمر آن ( Lifetime Motor Operating Cost )**  
نحوه محاسبه هزینه کارکرد موتورها برای طول عمر مفیدی که کارخانجات سازنده برای هر موتور مشخص میکنند یا برای هر بازه زمانی مورد نظر ، از رابطه ۹-۱ بدست می‌آید [ ۹ ] .

$$C_L = P_1 + \frac{0.746 * \text{HP} * \text{TO} * \text{RU}}{E} \quad (1-9)$$

که در آن:

$C_L$  : هزینه کارکرد حاصل از طول عمر موتور .

$P_1$  : قیمت خریداری شده موتور .

HP : توان موتور برحسب اسب بخار .

TO : مجموع ساعات کارکرد موتور در طول عمر آن .

RU : هزینه انرژی مصرفی .

E : راندمان نامی موتور .

### ۱۱-۱۲-۱ - زمان بازگشت سرمایه

زمان بازگشت سرمایه در واقع مدت زمانی است که سود حاصل از بکارگیری موتورهای پربازده ناشی از هزینه های انرژی صرفه جویی شده در این مدت برابر با اختلاف سرمایه گذاری اولیه ناشی از خرید موتور پربازده نسبت به موتور استاندارد هم‌نوع می‌گردد. زمان بازگشت سرمایه از رابطه ۱۰-۱ بدست می‌آید [ ۷ ] :



$$\text{Payback} = \frac{\text{Price Premium}}{\text{Annual Electrical Saving}} \quad (1-10)$$

که در آن:

Price Premium: اختلاف هزینه ناشی از خرید موتورهای پربازده نسبت به موتور استاندارد همنوع.  
 Annual El. Saving: مقدار هزینه انرژی صرفه جویی شده سالیانه موتور پربازده.  
 اگر قیمت خرید یک موتور پربازده ۴۰۰ دلار بیشتر از قیمت خرید موتور استاندارد همنوع باشد و هزینه انرژی صرفه جویی شده در سال آن ناشی از بکارگیری آن مطابق رابطه ۱-۱-۵-۳۰۰ دلار در سال باشد، طبق رابطه ۱-۱۰-۱ مدت زمان بازگشت سرمایه ۱/۳۳ سال خواهد بود.  
 یعنی پس از گذشت ۱/۳۳ سال (تقریباً یکسال و پنج ماه) از نصب و راه‌اندازی موتور پربازده، میزان سرمایه‌گذاری اولیه اضافی مستهلک می‌گردد.  
 لازم به ذکر است که زمان بازگشت سرمایه کمتر از دو سال مطلوب بوده و معمولاً کارخانه‌های صنعتی این محدوده را مناسب و معقول می‌دانند و متمایل به سرمایه‌گذاری با زمان بازگشت سرمایه زیر ۲ سال می‌باشند.

#### ۱۲-۱۲-۱ - زمان بازگشت سرمایه از جانشینی موتور پربازده بجای موتور تعمیر شده

زمان بازگشت سرمایه در صورت جایگزینی یک موتور پربازده بجای یک موتور تعمیر شده یا نیازمند به تعمیر، از رابطه ۱-۱۱-۱ بدست می‌آید [۳]:

$$\text{SPB} = \frac{\text{NC} + \text{IC} + \text{RWC} + \text{UR}}{\text{ECS} + \text{DCS}} \quad (1-11)$$

که در آن:

- SPB: زمان بازگشت سرمایه حاصل از جایگزینی موتور پربازده بجای موتور تعمیری.
- NC: هزینه خرید موتور جدید (موتور پربازده).
- IC: هزینه‌های نصب موتور جدید (موتور پربازده).
- RWC: هزینه تعمیر موتور خراب شده.
- RU: تخفیف هزینه مصرفی از جانب اداره برق در صورت وجود.
- ECS: کاهش هزینه انرژی بدلیل استفاده نمودن از موتور پربازده.
- DCS: کاهش هزینه دیمانند بدلیل استفاده نمودن از موتور پربازده.

بنابراین با معرفی و ارائه روش محاسبه پارامترهای مورد نیاز جهت تحلیل‌های اقتصادی مشخص می‌گردد که جایگزینی موتورهای پربازده با موتورهای استاندارد خصوصاً با موتورهای تعمیر شده یا موتورهای که سالهای طولانی کار کرده و راندمان آنها از راندمان نامی کمتر شده است، صرفه جویی انرژی و دیمانند قابل توجهی را در پی خواهد داشت. بنابراین می‌توان دریافت که جایگزینی موتورهای



راندمان بالا (موتورهای پربازده) با موتورهای تعمیر شده در بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی و کاهش انرژی و دیماند، گامی موثر در بهبود مدیریت انرژی خواهد بود.

**مراجع:**

- [1]. [www.hydro.on.ca](http://www.hydro.on.ca)
- [2]. [www.bna.com](http://www.bna.com)
- [3]. [www.emtfsask.ca](http://www.emtfsask.ca)
- [4]. [www.motor.doe.gov](http://www.motor.doe.gov)
- [5]. [www.easa.com](http://www.easa.com)
- [6]. [www.motor.doe.gov](http://www.motor.doe.gov)
- [7]. [www.energydesignresources.com](http://www.energydesignresources.com)
- [8]. [www.easa.com](http://www.easa.com)
- [9]. NEMA motor characteristics  
( premium efficiency motors – energy Savings)