

# ارزیابی روش‌های افزایش بهره‌وری انرژی در وسایل حمل و نقل ریلی

نام محور مقاله: فناوری‌های نوین در ناوگان باری و مسافری (شهری، حومه‌ای، بین شهری)

یعقوب محمدی<sup>۱</sup>

## چکیده

با توجه به اهمیت مقوله انرژی در جهان بحث در مورد روش‌های کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری انرژی تمامی جوانب زندگی انسان را تحت تاثیر قرار داده است به طوری که حتی در بازار لوازم خانگی و اتوموبیل به یکی از مهمترین معیارهای انتخاب بدل گردیده و سازندگان نیز روز به روز با تکیه بر تکنولوژی‌های جدید سعی در افزایش بهره‌وری محصولات خود و افزایش سهم بازار دارند، امروزه بحث بازده انرژی از مهمترین عوامل رقابتی بین شرکت‌های سازنده وسایل نقلیه ریلی به شمار رفته و از معیارهای مهم سنجش و مقایسه محصولات ریلی می‌باشد، بعلاوه روند خصوصی‌سازی در کشورهای اروپایی نیز باعث افزایش فشار بر روی شرکت‌های بهره‌بردار برای صرفه اقتصادی و برتری نسبت به رقبایشان شده است. همچنین با توجه به اینکه بین متخصصان در مورد پتانسیل بالای کاهش مصرف انرژی در راه آهن اجماع کامل وجود دارد اپراتورهای ریلی نیز فرصت را از دست نداده و شروع به استفاده از این پتانسیل‌ها نموده‌اند با این حال اقدامات سازمان‌یافته در انتقال دانش و فن‌آوری در این زمینه اغلب بسیار پراکنده می‌باشد.

در این مقاله سعی گردیده مسائل و مشکلات موجود در بالابردن بهره‌وری انرژی و روش‌های نوین غلبه بر آن، مورد بررسی کلی قرار گیرد، بدیهی است با توجه به محدودیت‌های موجود امکان بیان جامع تمامی جوانب موجود نبوده و سعی گردیده است مطالب به صورت خلاصه‌وار ارائه گردد.

## کلمات کلیدی

انرژی، بهره‌وری انرژی، توان گسترده، توان متمرکز، ترمز احیایی

## ۱- مقدمه

انرژی مصرف شده در یک قطار را می‌توان به چهار بخش عمده تقسیم نمود که عبارتند از:

- انرژی مورد نیاز برای شتاب گیری و بالابردن قطار از فراز.
- انرژی مورد نیاز برای غلبه بر نیروهای مقاوم نظیر نیروی اصطکاک و نیروی مقاومت هوا.
- انرژی مورد نیاز برای مصارف داخلی واگن‌ها نظیر تهویه و روشنایی.
- افت انرژی بوجود آمده در سیستم محرکه و یا افت‌های بوجود آمده بر اثر لزوم تغییر در منبع انرژی (AC به DC).

<sup>۱</sup> کارشناس طراحی محصول - شرکت صنایع ریلی ایران خودرو (ایریکو) - آدرس تهران - بلوار آفریقا - خ شهید بابک بهرامی - پ ۸۳ - تلفن ۸۸۶۵۱۷۳۱-۰۲۱

در طراحی یک قطار هدف نهایی کاهش یکی و یا چند مورد از موارد فوق می‌باشد. هنگام مطالعه بر روی یک سیستم پیچیده نظیر راه‌آهن در نظر گرفتن تمامی شرایط ضروری می‌باشد، در این تحقیق هدف اصلی بررسی انرژی مصرفی توسط قطار می‌باشد و بنابراین انرژی مورد نیاز زیرساخت‌ها و تعمیر و نگهداری در نظر گرفته نشده است.

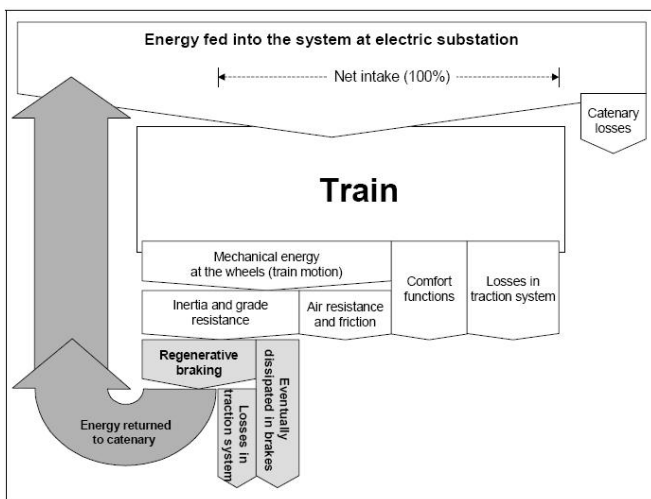
## ۲- دورنمای تئوریک

### ۲-۱- مصارف انرژی قطار

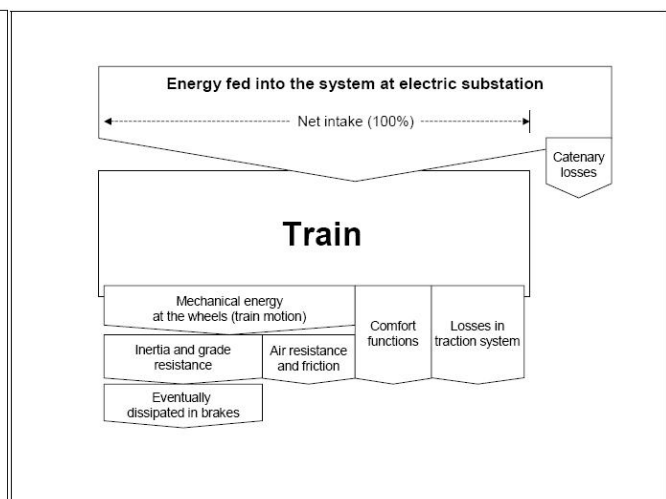
مصارف اصلی یک قطار به ۴ بخش عمده تقسیم می‌گردد:

- مصرف انرژی به منظور حرکت قطار: برای غلبه بر نیروهای مقاوم موجود در برابر حرکت قطار نیاز به اعمال توان مکانیکی در چرخها می‌باشد.
- افت توان در سیستم محرکه: نیروی محرکه قطار توسط تجهیزات سیستم محرکه تولید می‌گردد که در این مسیر مقداری از انرژی تلف می‌گردد بعلاوه سیستم‌های خنک‌کاری موتورها نیز مقداری از انرژی را مصرف می‌کند، به عبارت دیگر تمام انرژی دریافت شده از منبع انرژی سوخت دیزل و یا برق بالاسری به انرژی مکانیکی در چرخها تبدیل نمی‌شود.
- راحتی مسافرن: در سرویس مسافری سهم محسوسی از انرژی کلی صرف راحتی مسافرن می‌گردد نظیر مصارفی چون گرمایش، سرمایش و آب‌سردکن.
- تلفات انرژی سیستم تغذیه: در سیستم محرکه الکتریکی مقداری از انرژی در مسیر ایستگاه تغذیه تا پانتوگراف تلف می‌گردد.

تصویر شماره ۱ و ۲ به صورت شماتیک جریان انرژی را در داخل و خارج یک قطار مسافری با سیستم محرکه برقی بدون سیستم ترمز احیایی و مجهز به ترمز احیایی را نشان می‌دهد که در آن تمامی انرژی صرف شده برای غلبه بر نیروی مقاوم اینرسی و فراز نهایتاً در ترمزها به انرژی گرمایی تبدیل می‌گردد.



تصویر شماره ۲- جریان انرژی در یک قطار مجهز به ترمز احیایی



تصویر شماره ۱- جریان انرژی در یک قطار بدون ترمز احیایی

## ۱-۱-۲- نیروهای مقاوم در برابر حرکت قطار

یک قطار متحرک با نیروهای مقاوم متعددی روبرو می‌باشد.

نیروی مقاوم اینرسی و فراز (قابل احیا)

برای شروع به حرکت و در خلال شتابگیری نیاز به غلبه بر نیروی مقاوم اینرسی می‌باشد همچنین هنگام حرکت در فراز نیز نیاز به غلبه بر نیروی مقاوم منتهجه از وزن می‌باشد. این دو نیروی مقاوم به دو دلیل با هم در یک عبارت بیان می‌شوند، اول اینکه هر دو متناسب با جرم قطار هستند و با کاهش وزن قطار هر دو مقاومت کاهش می‌یابند، دوم اینکه انرژی لازم برای شتابگیری و حرکت در فراز به صورت گرما تلف نمی‌شود<sup>۲</sup> و به صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در قطار ذخیره می‌شود که در نتیجه میزان زیادی از آن را می‌توان با ترمز احیایی<sup>۳</sup> احیا نمود.

سهام انرژی مورد نیاز برای غلبه بر نیروهای مقاوم اینرسی و فراز توسط عواملی نظیر جرم قطار، توپوگرافی خط و تعداد توقف‌ها تعیین می‌شود و در نهایت باید گفت فراز بیشتر باعث افزایش میزان مصرف انرژی برای غلبه بر نیروی فراز و تعدد شتابگیری مثبت نیز باعث افزایش میزان مصرف انرژی برای غلبه بر نیروی مقاوم اینرسی می‌شود.

مقاومت حرکت<sup>۴</sup> (غیر قابل احیا)<sup>۵</sup>

این نیروها شامل نیروی مقاومت هوا و نیروی مقاومت اصطکاک چرخ و ریل بوده که وابسته به جرم قطار نمی‌باشند، انرژی مورد نیاز برای غلبه بر این نیروها غیر قابل بازیافت بوده و به صورت حرارت تلف می‌شود. نیروی مقاومت حرکت وابستگی شدید به سرعت داشته و به صورت فرمول شماره ۱ زیر بیان می‌گردد.

$$F_R = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

ضرایب  $A$ ,  $B$ ,  $C$  مقادیر ثابت مشخصی نبوده و وابسته به قطار (جرم، طول، شکل قطار و ...) و وضعیت خط (اصطکاک چرخ و ریل و ...) می‌باشند، نیروی  $A$  نشانگر نیروی اصطکاک مکانیکی (چرخ و ریل) بوده و مستقل از سرعت قطار می‌باشد و دو عبارت دیگر نشانگر نیروی مقاومت هوا می‌باشد، عبارت با توان ۲ نیز حاکم بر معادله بوده و ضریب آن با فرمول شماره ۲ تعریف می‌گردد.

$$[1] C = \frac{1}{2} \rho A_f C_D \quad (2)$$

در فرمول بالا  $A_f C_D$  را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول مستقل از طول قطار بوده و به شکل و بزرگی دو دیواره انتهایی قطار بستگی دارد و بخش دوم تقریباً ارتباط مستقیم با طول قطار دارد.

میزان انرژی مورد نیاز قطار برای غلبه بر نیروی مقاومت حرکت شدیداً به سرعت قطار وابسته است به طوری که در قطارهای پرسرعت که سرعت متوسط آنها بالا بوده و فاصله بین ایستگاه‌ها نسبتاً زیاد می‌باشد نیروی مقاوم حرکت نقش اصلی را بازی می‌کند که مقدار زیادی از آن ناشی از نیروی مقاومت هوا می‌باشد. در کل می‌توان گفت نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک در حالت کلی زیاد نیست و میزان آن بستگی به وزن قطار و شعاع خط دارد ولی در قطارهای سنگین باری اصطکاک چرخ و ریل یکی از مهمترین فاکتورهای نیروی مقاوم به شمار می‌رود.

## ۲-۱-۲- افت انرژی در سیستم محرکه

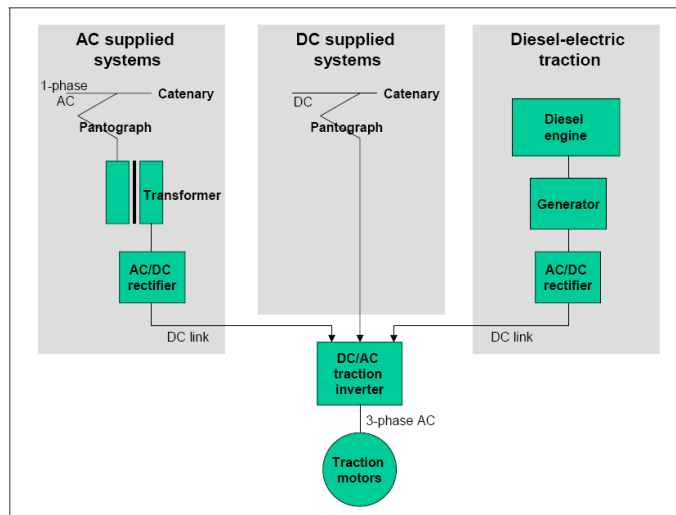
طبیعتاً انرژی مکانیکی مورد نیاز در چرخ‌ها توسط سیستم محرکه تولید می‌گردد که توسط انرژی برق بالاسری و یا سوخت دیزل تغذیه می‌گردد. با توجه به تغییر در صورت‌های انرژی از برق بالاسری و یا سوخت دیزل به انرژی مکانیکی اعمال شده به چرخ‌ها مقداری از انرژی به صورت حرارت تلف می‌گردد.

Non dissipative<sup>۲</sup>  
Regenerative brake<sup>۳</sup>  
Running resistance<sup>۴</sup>  
Dissipative<sup>۵</sup>

### سیستم محرکه الکتریکی

در سیستم محرکه الکتریکی انرژی از برق بالاسری دریافت و پس از تغییرات به موتورهای الکتریکی تغذیه شده و در موتورها به انرژی مکانیکی تبدیل می‌گردد. تمامی اجزاء درگیر در زنجیره قدرت شکلی از انرژی را به شکل دیگری از آن تبدیل می‌کنند که این پروسه هرگز نمی‌تواند با بازدهی ۱۰۰٪ انجام پذیرد و مقداری از انرژی به گرما تبدیل می‌شود بعلاوه برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد تجهیزات، تجهیزات خنک‌کاری مختلفی مورد نیاز می‌باشد که این موضوع خود مقداری انرژی مصرف می‌کند.

در قطارهای برقی مدرن از موتورهای القایی AC که توسط برق سه فاز با فرکانس و ولتاژ متغیر که توسط اینورتر تامین می‌گردد استفاده می‌شود. سیستم‌های مختلف تغذیه در واقع تا محل تامین برق DC اینورتر متفاوت می‌باشند که این موضوع را می‌توان در تصویر شماره ۳ مشاهده نمود. اینورترها در صورت استفاده از برق DC توسط برق بالاسری، در صورت AC بودن برق بالاسری توسط یک ترانسفورماتور و رکتیفایر (یکسوساز) و یا برق تولیدی از دیزل ژنراتور تغذیه می‌گردد. بازدهی سیستم‌های محرکه AC و DC نیز با هم متفاوت می‌باشد.



تصویر شماره ۳ - سیستم‌های محرکه الکتریکی

### سیستم محرکه دیزل

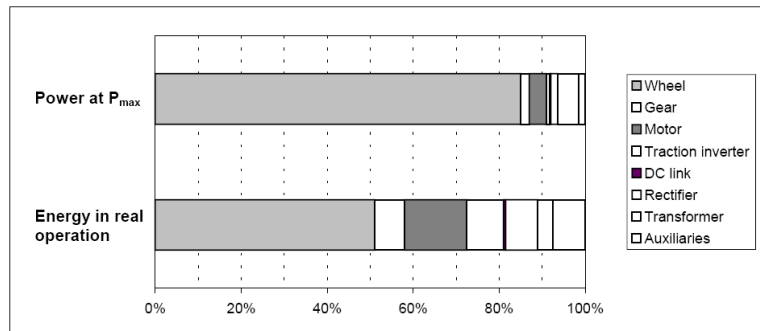
منبع انرژی یک سیستم محرکه دیزل سوخت موجود در تانک سوخت می‌باشد که انرژی شیمیایی آن در موتورهای احتراقی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود که عموماً بازدهی این پروسه حدود ۴۰٪ می‌باشد، یعنی میزان محتوای انرژی سوخت به انرژی خروجی سیستم محرکه. علاوه بر افت‌های موجود در موتور افت‌های دیگری نیز نظیر افت انرژی در ادامه زنجیره توان یعنی از موتور به چرخ‌ها (سیستم انتقال قدرت الکتریکی، هیدرولیک و یا مکانیکی) وجود دارد. بعلاوه مقداری از انرژی نیز صرف مصارف کمکی از قبیل سیستم خنک‌کن سیستم محرکه خواهد شد.

### بازده توانی و بازده انرژی

بازدهی یک لوکوموتیو معمولاً در یک بار خاص ارائه می‌شود، به عنوان مثال وقتی بازده را ۸۵٪ بیان می‌کنیم منظور این است که در یک بار خاص و مشخص ۸۵٪ توان دریافت شده از برق بالاسری به توان مکانیکی در چرخ‌ها تبدیل می‌شود. با توجه به ارتباط بازده با بار، تغییر بار قطار بازده توانی آن را تغییر خواهد داد. انرژی انتگرال زمانی توان می‌باشد بنابراین برای تعیین میزان مصرف انرژی احتیاج به دانستن دوره بارگذاری<sup>۶</sup> می‌باشد. میزان بازدهی سیستم محرکه در بارهای کم بسیار پایین

<sup>۱</sup> Load cycle

می‌آید که بخشی از آن به علت تلفات ثابت در سیستم می‌باشد که در بارهای پایین محسوستر می‌باشد. در نتیجه میزان بازده انرژی که به صورت میزان انرژی خروجی به انرژی ورودی در یک زمان مشخص تعریف می‌گردد از بازده توانی پایینتر می‌باشد. این موضوع را می‌توان با ذکر یک مثال مطابق تصویر شماره ۴ نمایش داد. این تصویر مصارف انرژی لوکوموتیو الکتریکی Re 465 راه آهن فدرال سوئیس<sup>۷</sup> را نمایش می‌دهد، همانطور که می‌توان دید میزان بازدهی در حداکثر توان ۸۵٪ می‌باشد اما در کارکرد نمونه میزان مفید انرژی انتقال یافته به چرخ‌ها فقط حدود ۵۱٪ می‌باشد [2].



تصویر شماره ۴

با در نظر گرفتن این موضوع و با توجه به اینکه قطار با توان متمرکز و یا توان گسترده الکتریکی مجهز به چندین محور محرک و یا بوژی با سیستم محرکه مستقل می‌باشد می‌توان در حالت‌های غیر از بار کامل به کمک یک سیستم کنترل اتوماتیک سیستم محرکه برخی بوژی‌ها را قطع نمود و در حالت بار کامل مجدداً به مدار قدرت وارد کرد که با این عمل می‌توان ۲٪ تا ۵٪ بازده انرژی را بالابرد که این مقدار خود بستگی به بازدهی سیستم محرکه دارد.

### ۲-۱-۳- راحتی مسافری

در قطارهای مسافری مصارف نظیر سرمایش، گرمایش و روشنایی واگن‌ها حدود ۲۰٪ از انرژی کل قطار را که از برق بالاسری و یا دیزل تغذیه می‌شود مصرف می‌نماید، که این انرژی حتی در واگن‌های پارک شده نیز برای محیا کردن شرایط راحتی مسافری مصرف می‌گردد.

### ۲-۱-۴- تلفات در سیستم تغذیه

یک قطار الکتریکی لزوماً باید در هنگام کارکرد توسط انرژی الکتریکی تغذیه گردد و انرژی الکتریکی باید در مسافت‌های طولانی از طریق شبکه برق‌رسانی و سیستم برق بالاسری به قطار انتقال پیدا کند که این فرایند همیشه با افت و تبدیل انرژی الکتریکی به سایر صورت‌های انرژی همراه است. در این مقاله تلفات در نیروگاه و تلفات شبکه اصلی انتقال برق مد نظر نمی‌باشد<sup>۸</sup> چون این تلفات کلی بوده و در سایر استفاده‌ها از برق نیز رخ خواهد داد. در اینجا فقط تلفات سیستم تغذیه شامل تلفات تبدیل ولتاژ در ایستگاه‌های تغذیه و سیستم انتقال برق بالاسری مد نظر می‌باشد که این تلفات به موارد متعددی بستگی دارد، به عنوان مثال تلفات با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد و در یک سیستم با تغذیه DC بالاسری با ولتاژ پایین تلفات بسیار زیاد خواهد بود.

در سیستم محرکه دیزل این تلفات آشکار نمی‌باشد ولی انرژی مورد نیاز برای حمل سوخت از پالایشگاه تا قطار و همچنین انرژی لازم برای حمل سوخت در مدت زمان حرکت را نباید از نظر دور داشت.

<sup>۷</sup> Re 465 SBB

<sup>۸</sup> این موضوع حالتی را که برق شبکه راه‌آهن توسط خود راه‌آهن تولید شود را نیز در بر می‌گیرد.

## ۲-۲- جنبه کمی مصارف انرژی

۲-۲-۱- یک فرمول ساده برای محاسبه میزان مصرف انرژی

اگر بازدهی قطار را  $\chi$  (انرژی از برق بالاسری به چرخها) فرض کنیم و از ترمز احیایی با بازدهی  $\beta$  در هنگام ترمزگیری استفاده کنیم و انرژی  $E_{kin+pot} + E_{run}$  که در آن انرژی مورد نیاز برای غلبه بر نیروهای مقاوم اینرسی و فراز  $E_{kin+pot}$  و مقاومت حرکت  $E_{run}$  بوده و  $E_{comfort}$  انرژی مورد نیاز برای راحتی مسافری باشد با توجه به افت انرژی در تجهیزات الکتریکی باید انرژی به میزان  $(E_{kin+pot} + E_{run} + E_{comfort}) / \chi$  از سیستم برق بالاسری تغذیه گردد. همانطور که در قبل اشاره شده بخش قابل احیای این انرژی (kin+pot) را می توان با استفاده از ترمزهای احیایی دوباره احیا نمود که بازدهی در حالت اعمال توان  $\chi$  بوده و در حالت ترمز با توجه به اینکه گاهی اوقات فعال می شود ( $\beta < 1$ ) می توان گفت انرژی  $\beta E_{kin+pot}$  را می توان احیا نمود. در نهایت می توان گفت میزان انرژی مورد نیاز در طول سیر مطابق فرمول شماره ۳ محاسبه می گردد.

$$E_{net} = \frac{1}{\chi} (E_{kin+pot} + E_{run} + E_{comfort}) - \chi \beta E_{kin+pot} \quad (3)$$

$E_{net}$  انرژی ورودی

$\chi$  بازده انرژی

$E_{kin+pot}$  مجموع انرژی که برای حرکت قطار و شتابگیری مورد نیاز می باشد

$E_{run}$  انرژی مورد نیاز در چرخها برای غلبه بر مقاومت های حرکت (اصطکاک مکانیکی + مقاومت هوا)

$E_{comfort}$  انرژی مورد نیاز برای راحتی مسافری

$\beta$  بازده انرژی ترمز احیایی

فرمول شماره ۳ را می توان برای سایر انواع قطارها نیز استفاده نمود به عنوان مثال در یک قطار توان متمرکز با لوکوموتیو دیزل باید عبارت مربوط به انرژی ترمز احیایی را حذف نمود و در قطار باری نیز باید عبارت مربوط به راحتی مسافری را حذف کرد. از فرمول بالا می توان استراتژی های کاهش مصرف انرژی را نیز استخراج نمود که شامل:

کاهش وزن قطار  $E_{kin+pot}$

بهبود شرایط آیرودینامیک قطار و کاهش اصطکاک چرخ و ریل  $E_{run}$

کاهش میزان افت های انرژی در لوکوموتیو و یا توان گسترده که باعث بالارفتن میزان  $\chi$  می شود

استفاده از انرژی ترمز احیایی  $\beta$

بهبود و هوشمند کردن سیستم راحتی مسافری  $E_{comfort}$

این موارد استراتژی های اصلی کاهش مصرف می باشند که در بخش بعد راجع به آن بحث خواهد شد.

## ۳- برخی از استراتژی های افزایش راندمان انرژی

### ۳-۱- کاهش وزن

قطارهای مسافری معمولاً بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر صندلی وزن دارند اما در برخی قطارها نظیر ICE2 این میزان به ۱۱۰۰ کیلوگرم بر صندلی نیز می رسد، بعلاوه محدودیت های نظیر پایداری در مقابل بادهای جانبی نیز در برابر کاهش وزن وجود دارد که در این میان می توان به قطار حومه ای کپنهاگ با ۳۶۰ کیلوگرم بر صندلی اشاره نمود.

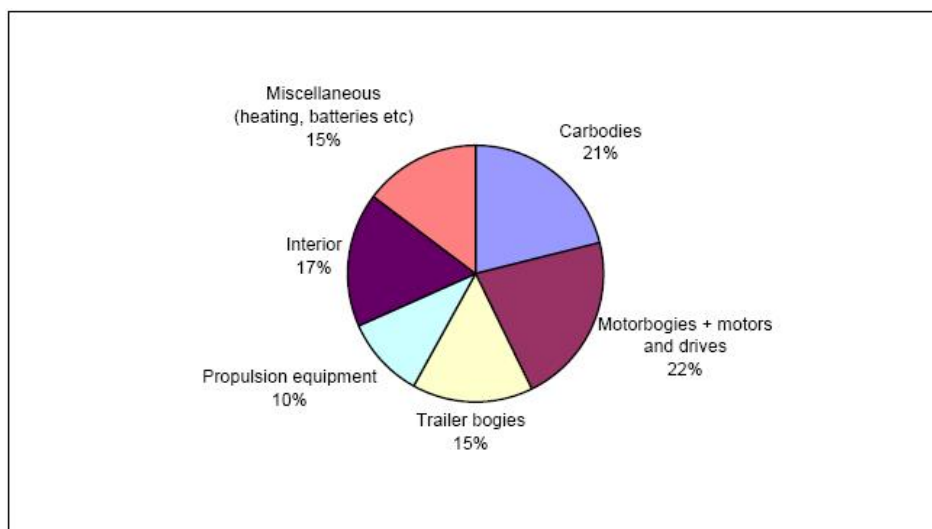
<sup>۱</sup> به عنوان مثال اگر ترمز احیایی تا ۶۰٪ انرژی ترمزی را جذب کرده و باقی انرژی به در دیسک های ترمز به حرارت تبدیل شود  $\beta = 0.6$  خواهد بود.

<sup>۱۰</sup> با فرض اینکه بازده انرژی تجهیزات راحتی مسافری نیز برابر با بازده سیستم محرکه می باشد.

در راستای استراتژی کاهش وزن دو شیوه برجسته به چشم می‌خورد: طراحی بر اساس کاهش وزن اجزاء و طراحی بر اساس کاهش وزن کلی قطار

طراحی بر اساس کاهش وزن اجزاء

در روش اول می‌توان به استفاده از مواد سبک و سیستم‌های محرکه نوین اشاره نمود. تصویر شماره ۵ [3] درصد وزن نیمه مجموعه‌های یک قطار توان گسترده را نمایش می‌دهد که بوسیله آن می‌توان پتانسیل موجود در هر بخش را مشاهده نمود. استفاده از بدنه‌های آلومینیومی از سالهای گذشته و مواد نوین نظیر فیبرکربن در امروز بسیار مورد توجه بوده، اجزاء سیستم‌های محرکه نوین نظیر استفاده از سیستم IGBT<sup>11</sup> به جای سیستم GTO<sup>12</sup> نیز از این دست می‌باشند. علاوه بر زمینه‌های یاد شده که معطوف به زمان طراحی یک محصول می‌باشند می‌توان در دوره تعمیرات اساسی نیز با توجه به نکاتی نظیر کاهش وزن تزئینات داخلی، صندلی‌ها و پنل‌های داخلی، وزن واگن را کاهش داد خصوصاً با استفاده از ساندویچ پنل و مواد مرکب.



تصویر شماره ۵

طراحی بر اساس کاهش وزن کلی قطار

امروزه روش‌هایی برای کاهش وزن بوژی که حدود یک سوم از وزن یک قطار را به خود اختصاص می‌دهد مورد استفاده و تحقیق قرار دارد که موجب تغییرات کلی در طراحی قطارها شده است، به عنوان نمونه با استفاده از بوژی ژاکوبی می‌توان از تعداد محورهای یک قطار و طبعاً وزن آن کاست و همچنین استفاده از بوژی‌های تک‌محوره که امروزه با موفقیت در حال سرویس‌دهی می‌باشند نیز پیامدی مشابه خواهد داشت. به عنوان مثال در قطار جدید سری S-trains کپنهاگ با افزایش عرض از ۳/۲ متر به ۳/۶ و استفاده از صندلی‌های ۳+۳ به جای صندلی‌های ۲+۳ در مدل قدیمی‌تر و استفاده از بوژی فرمان‌پذیر تک‌محوره، کف و بدنه آلومینیومی و مواد سبک در تزئینات داخلی حدود ۳۴٪ وزن بر واحد صندلی کاهش یافته است (حدود ۳۶۰ کیلوگرم بر صندلی) که این میزان باعث کاهش ۶۰٪ انرژی مصرفی به ازای هر صندلی در کیلومتر شده است. [4]

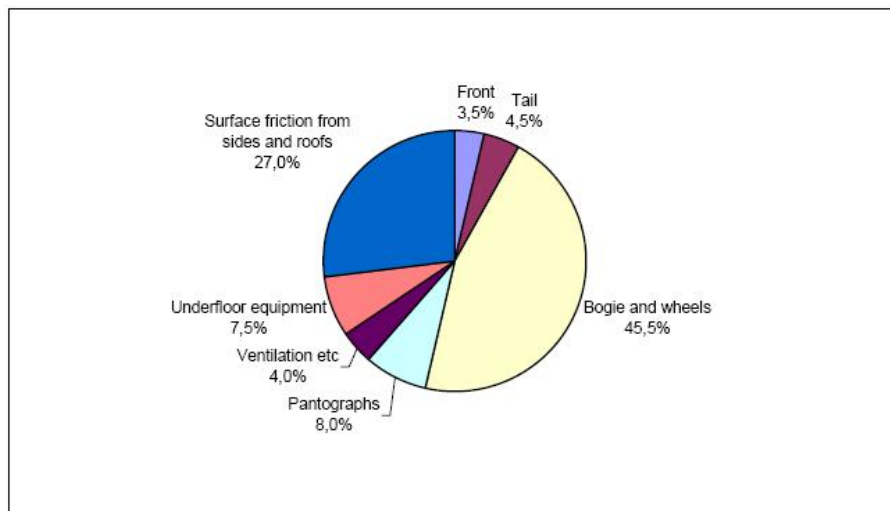
<sup>12</sup> Insolated-gate bipolar transistor

<sup>13</sup> Gate turn-off thyristor

## ۳-۲- آیرودینامیک و اصطکاک

### مقاومت هوا

همانطور که اشاره شد آیرودینامیک به دلیل مسائل انرژی، کاهش سطح صوت، ایمنی و راحتی مسافران در قطارهای پر سرعت مورد توجه قرار دارد. نیروی پسا<sup>۱۳</sup> به دو عامل شکل ظاهری و صافی سطح قطار بستگی دارد. تصویر شماره ۶ نیروی پسای بخش‌های مختلف یک قطار نمونه با ۱۴ واگن را نشان می‌دهد [5]، در این نمودار می‌توان مشاهده نمود که بیش از ۷۰٪ نیروی پسا ناشی از بوژی، چرخ‌ها و اصطکاک سطوح خارجی دیواره‌های جانبی و سقف می‌باشد و می‌توان دید که بر خلاف تصور عموم در مورد بالابودن نیروی پسای دماغه جلویی و انتهایی، این دو سهم کمی را به عهده دارند اگر چه سهم آنها در قطارهای با طول کوتاهتر بیشتر می‌شود.



تصویر شماره ۶

در قطارهای پرسرعت می‌توان با پوشش‌دهی آیرودینامیک بوژی حدود ۱۰٪ از نیروی مقاوم هوا کاست، همچنین روشهایی نظیر حذف زوایای تند و تغییرات شدید در بدنه، ایجاد پوشش آیرودینامیک برای تجهیزات زیر واگن، تجدید نظر در طراحی درب و پنجره و حتی پوشش‌های با اصطکاک کمتر در مقابل هوا مد نظر قرار دارند. در قطارهای باری نیز علیرغم تصور عمومی به علت شکل واگن‌های باری، پوشیده نبودن فضای بین واگن‌ها، مسقف نبودن برخی واگن‌ها و خالی بودن برخی از آنها انرژی زیادی صرف غلبه بر نیروی مقاوم هوا می‌گردد که با اقداماتی نظیر مسقف کردن واگن‌های باز و چینش آیرودینامیکی واگن‌های باری با ارتفاع‌های مختلف می‌توان تا ۱۰٪ از میزان مصرف انرژی قطار را کاست.

## ۳-۳- استفاده بهینه از فضای داخلی

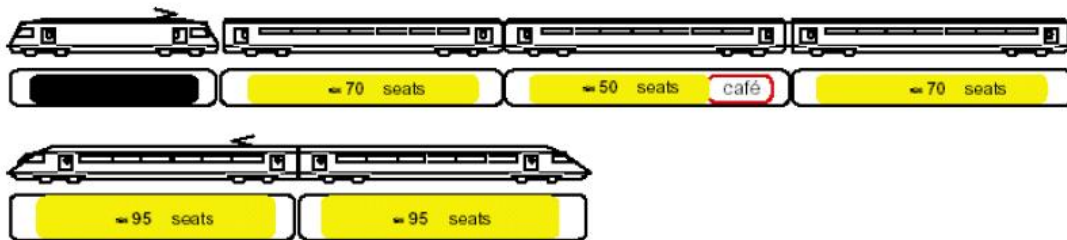
می‌توان با افزایش ارتفاع و یا عرض واگن و همچنین اضافه نمودن صندلی به واگن‌هایی که در گذشته برای مصارف دیگر نظیر لوکوموتیو استفاده می‌شده و بکارگیری قطارهای توان گسترده و یا حذف واگن‌های رستوران و مولد و اضافه نمودن صندلی، نسبت وزن واگن به صندلی را کاهش داد.

امروزه از واگن‌های دوطبقه به طور وسیع در خطوط اصلی استفاده می‌گردد بعلاوه نمونه‌هایی از قطارهای دوطبقه پرسرعت نیز نظیر Shinkansen و TGV نیز در حال بهره‌برداری می‌باشند هرچند موانعی نظیر راحتی مسافران در مسافت‌های طولانی عامل مهمی به شمار می‌آید. علاوه بر موارد فوق با استفاده از قطارهای توان گسترده یا خودکشش که تجهیزات سیستم محرکه

<sup>۱۳</sup> Drag



آن در زیر واگن‌ها و به صورت غیر متمرکز نصب می‌شوند و حذف لوکوموتیو و استفاده از یک کابین کوچک در واگن‌های اول و آخر و یا فقط یک طرف می‌توان میزان وزن قطار را نسبت به تعداد صندلی‌ها کاهش داد که این موضوع را می‌توان به راحتی در تصویر شماره ۷ [6] مشاهده نمود. اگرچه بسیاری از بهره‌برداران صنعت راه‌آهن از حذف واگن‌های رستوران و اومه دارند ولی حذف آن و یا کوچک نمودن آن و پذیرایی در محل مسافر نیز از عوامل مهم در کاهش نسبت وزن قطار به تعداد صندلی می‌باشد. به عنوان مثال از سال ۱۹۹۶، SNCF<sup>۱۴</sup> در حال بهره‌برداری از واگن‌های دوطبقه TGV که نسل سوم قطارهای TGV می‌باشد در خطوط سریع‌السير پرازدحام نظیر پاریس-لیون می‌باشد که توسط شرکت آلتستوم با ظرفیت ۵۴۵ مسافر طراحی و ساخته شده است، در کنار منافع اقتصادی استفاده از این قطارها (سرمایه‌گذاری اولیه پایین به ازای هر صندلی) این قطار نسبت وزن به تعداد صندلی پایین و بازدهی انرژی بالایی داشته و ظرفیت مسافر این قطار ۴۵٪ بیشتر از قطار مشابه یک طبقه می‌باشد در صورتی که وزن و میزان مصرف انرژی آن با نوع یک طبقه آن اختلاف زیادی ندارد، در نتیجه نسبت وزن به تعداد صندلی ۳۶٪ کاهش یافته و میزان مصرف انرژی بر صندلی -کیلومتر حدود ۳۰٪ کاهش یافته است. علاوه بر این SNCF مدعی است که راحتی مسافری به علت فاصله بیشتر صندلی‌ها در این قطارها بیشتر از نوع یک طبقه آن می‌باشد. در حال حاضر تعداد ۳۰ قطار از ۳۰۰ قطار TGV دوطبقه بوده و به‌زودی این تعداد به ۸۰ قطار خواهد رسید. [7]



تصویر شماره ۷ [8]

### ۳-۴- کاهش تلفات تبدیلات انرژی در سیستم محرکه

۳-۴-۱- سیستم محرکه الکتریکی

ترانسفورماتورها عموماً با افزایش وزن بازده بالاتری پیدا می‌کنند بنابراین برای ارزیابی این گونه تجهیزات معمولاً نسبت بین بازدهی و وزن به عنوان آیت مهمتری مطرح می‌باشد. در زمینه ترانسفورماتورها دو تکنولوژی جدید مورد نظر کارشناسان می‌باشد که یکی ترانسفورماتورهای HTSC<sup>۱۵</sup> که در آنها با استفاده از مواد ابررسانا تلفات تا حدود صفر کاهش می‌یابد که حتی استفاده از این مواد در سیستم انتقال قدرت و موتورهای نیز بسیار جذاب به نظر می‌رسد. بر اساس تحقیقی که شرکت زیمنس بر روی این نسل از ترانسفورماتورها انجام داده است نتایج ارائه شده در جدول شماره ۱ برای کاهش وزن و افزایش راندمان ترانسفورماتور چند نوع قطار حاصل شده است [9]، البته این تکنولوژی با محدودیت‌هایی نیز روبرو می‌باشد. بعلاوه با توجه به اینکه با افزایش فرکانس میزان القاء مغناطیسی نیز افزایش می‌یابد استفاده از ترانسفورماتورهای فرکانس متوسط<sup>۱۶</sup> باعث کاهش جرم و افزایش راندمان می‌شود. در زمینه اینورتورها نیز با تغییر سیستم‌های قدیمی تر GTO<sup>۱۷</sup> با سیستم‌های مدرن IGBT<sup>۱۸</sup> بازدهی این اجزا نیز افزایش یافته است. موتورهای آسنکرون نیز به راه‌حل استاندارد تکنولوژی قطارهای الکتریکی بدل گشته‌اند که شاید در آینده موتورهای با مگنت دائمی<sup>۱۹</sup> به عنوان یک جایگزین برای آن مطرح گردند.

<sup>۱۴</sup> راه آهن فرانسه

<sup>۱۵</sup> High-temperature superconductivity

<sup>۱۶</sup> Medium-frequency transformer

<sup>۱۷</sup> Gate turn-off thyristor

<sup>۱۸</sup> Insulated-gate bipolar transistor

<sup>۱۹</sup> Permanent magnet motors

بازده در توان نامی		حجم مجموعه ترانسفورماتور		جرم شامل جرم سیستم خنک کن		
ترانسفورماتور HTSC	ترانسفورماتورهای معمول	ترانسفورماتور HTSC	ترانسفورماتورهای معمول	ترانسفورماتور HTSC	ترانسفورماتورهای معمول	
99.30%	92%	0.36 m <sup>3</sup>	0.69 m <sup>3</sup>	2200 kg	4800 kg	قطارهای حومه‌ای
99.60%	93%	2.33 m <sup>3</sup>	2.65 m <sup>3</sup>	8700 kg	14500 kg	لوکوموتیو
99.70%	92%	1.3 m <sup>3</sup>	1.6 m <sup>3</sup>	5400 kg	9300 kg	قطار سرعت بالا

جدول شماره ۱

میزان مصارف کمکی مربوط به سیستم محرکه نظیر سیستم خنک کن و ترمزها در حداکثر بار نسبتاً کوچک می‌باشد با این حال در ظرفیت‌های پایینتر این میزان افزایش می‌یابد که این موضوع پتانسیل خوبی را برای استراتژی خاموش کردن برخی از موتورها در حالت نیمه‌بار ایجاد می‌کند.

### ۳-۵- ترمزهای احیایی

انرژی صرف شده برای شتاب دادن به قطار و همچنین بالابردن از فراز به صورت انرژی پتانسیل و جنبشی در قطار ذخیره می‌گردند. در قطارهایی با سیستم محرکه الکتریک (الکتریک و دیزل الکتریک) بخش بزرگی از این انرژی را می‌توان با استفاده از موتورهای الکتریکی به الکتریسیته تبدیل نمود و در واقع می‌توان گفت در زمان‌های ترمزگیری موتورها را به ژنراتور تبدیل کرد. بر خلاف ترمز احیایی ترمز دینامیکی وجود دارد که هدف آن صرفاً کاستن از درگیری دیگر ترمزها و کاهش خوردگی پد ترمز می‌باشد و در آن انرژی بازیافت نمی‌شود. البته استفاده از سیستم ترمز احیایی برای قطارهای با ترمزگیری متعدد توجیه بسیار بالاتری نسبت به سایر انواع آن دارد با این حال پتانسیل افزایش بهره‌وری انرژی با استفاده از این سیستم را نباید در قطارهای پرسرعت از نظر دور داشت.

### ۳-۶- کاهش مصرف انرژی راحتی مسافری

در کشورهای اروپایی حدوداً یک پنجم از کل انرژی مصرف قطار صرف راحتی مسافران می‌گردد که گرمایش در زمستان و سرمایش در تابستان بزرگترین بخش آن را تشکیل می‌دهد و میزان آن نیز شدیداً به شرایط جغرافیایی و فصول دارد که در شرایطی نظیر شرایط ایران این میزان به حدود ۸۵٪ می‌رسد.

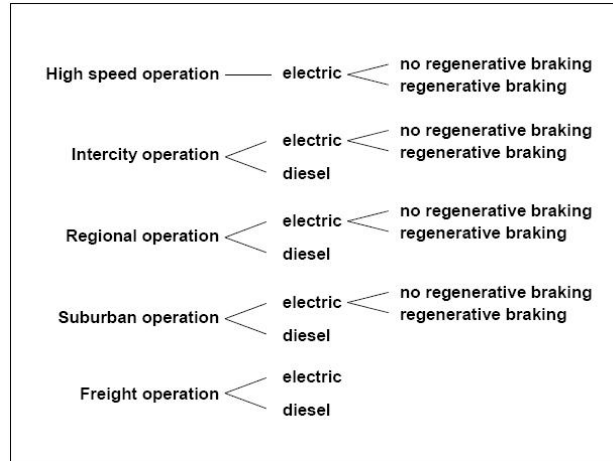
در یک قطار می‌توان با استفاده از عایق‌های حرارتی مناسب از تلفات حرارتی واگن‌ها کاست، اما بار حرارتی، برودمی مربوط به هوای تازه در سیستم‌های معمول ثابت و تابعی از تعداد صندلی‌ها و یا مسافران قطار می‌باشد و در صورت نیمه پر بودن واگن‌ها نیز ظرفیت هوای تازه تغییر نخواهد کرد که این موضوع باعث افت انرژی سیستم می‌گردد، بنابراین در سیستم‌های تهویه مطبوع مدرن میزان هوای تازه تابعی از میزان CO<sub>2</sub> هوای داخل واگن می‌باشد و فقط نیاز هوای تازه واقعی واگن را برآورده می‌کند. استراتژی دیگر استفاده از منابع گرمایی دیگر قطار است به عنوان نمونه در یک قطار توان گسترده می‌توان از انرژی گرمایی سیستم محرکه که باید تلف شود برای گرمایش واگن استفاده کرد این نوع گرمایش اکنون در برخی قطارهای توان گسترده دیزلی استفاده می‌گردد اما در قطارهای برقی عمومیت نیافته است.

### ۴- انعطاف پذیری<sup>۲۰</sup>

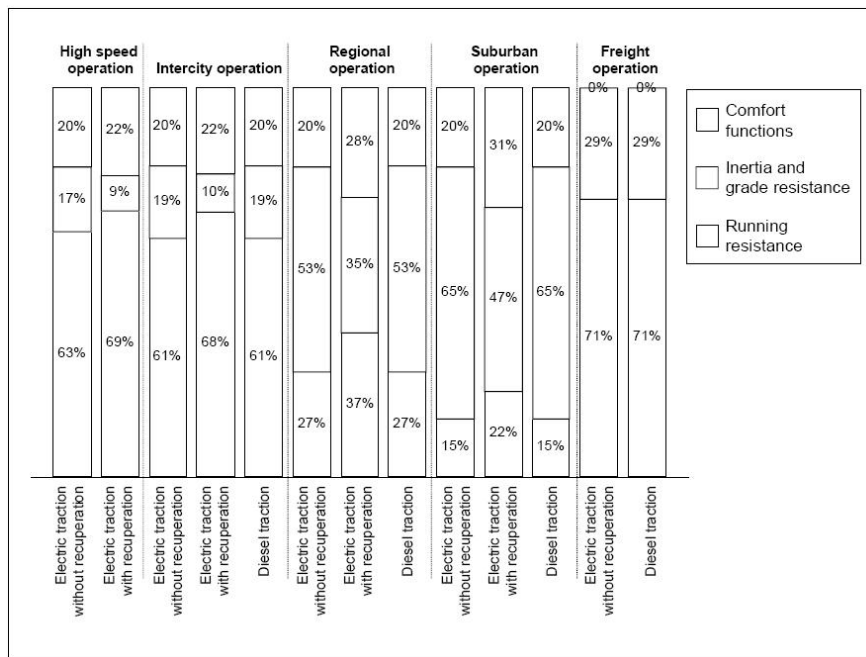
ضریب انعطاف پذیری عددی است که میزان وابستگی دو پارامتر را مشخص می‌کند به عنوان مثال، میزان مصرف انرژی قطاری با ضریب انعطاف پذیری ۰/۵ نسبت به جرم قطار به این معنی است که با کاهش ۴٪ جرم قطار میزان ۲٪/۵=۴\*۰٪ از میزان

<sup>۲۰</sup> Basic Elasticity

مصرف انرژی قطار کم خواهد شد. هرچه میزان ضریب انعطاف پذیری بالاتر باشد نشان دهنده تاثیر بالای آن آیتم در نتیجه می باشد. ضریب انعطاف پذیری برای قطارهای مختلف و بهره برداری های مختلف متفاوت می باشد. در تصویر شماره ۸ می توان ۱۳ مورد از انواع بهره برداری و وسایل نقلیه ریلی را مشاهده نمود که در تصویر شماره ۹ میزان انرژی مصرفی بخش های مختلف آنها نمایش داده شده است [10][11].



تصویر شماره ۸



تصویر شماره ۹

در جدول شماره ۲ [11] نیز میزان ضرایب انعطاف پذیری مصرف انرژی ۱۳ نوع قطار نسبت به وزن، مقاومت حرکت و بازدهی سیستم محرکه نشان داده شده است که بوسیله آن می توان تاثیر کمی استراتژی های مورد بحث برای افزایش بهره وری انرژی که در مقاله توضیح داده شده است را بر روی میزان بهره وری انرژی مشاهده نمود. به عنوان نمونه در مورد محصول اتوبوس ریلی ساخت شرکت ایریکو که یک قطار توان گسترده با سیستم محرکه دیزل هیدرولیک می باشد به راحتی می توان مشاهده نمود که بهترین و کاراترین استراتژی برای افزایش راندمان انرژی این محصول افزایش بازدهی سیستم محرکه می باشد به طوری که با افزایش راندمان سیستم محرکه به میزان ۵٪ میزان  $1=5\%$  افزایش راندمان انرژی خواهیم داشت و یا با کاهش

وزن ۱۰٪ این محصول می‌توان  $0.6/4 = 15\%$  به ضریب بهره‌وری انرژی آن افزود. در واقع جدول شماره ۲ معیاری به دست می‌دهد تا بتوان مقایسه‌ای از هزینه‌ها و عوایدی که از میزان کاهش تلفات انرژی حاصل خواهد شد را بدست آورد و اقتصادی بودن استراتژی‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده و بهترین و اقتصادیترین راه را برگزید.

	Traction	Recuperation	Elasticities with regard to		
			traction efficiency	mass	running resistance
High speed train	electric	no	1,00	0,17	0,63
		yes	1,11	0,12	0,66
Intercity train	electric	no	1,00	0,19	0,61
		yes	1,12	0,14	0,65
	diesel	-	1,00	0,19	0,61
Regional train	electric	no	1,00	0,52	0,27
		yes	1,33	0,44	0,31
	diesel	-	1,00	0,52	0,27
Suburban train	electric	no	1,00	0,64	0,15
		yes	1,42	0,57	0,18
	diesel	-	1,00	0,64	0,15
Freight	electric	no	1,00	0,29	0,71
	diesel	-	1,00	0,29	0,71

جدول شماره ۲

## ۵- نتیجه

در این مقاله سعی گردید با تکیه بر تجارب و تحقیقاتی که توسط سازندگان معتبر محصولات ریلی و نهادهای مرتبط کسب شده است به طور اجمالی راه‌کارهای افزایش بهره‌وری انرژی و میزان آن را برای استراتژی‌های مختلف و محصولات مختلف معرفی شود. با استفاده از جدول شماره ۲ می‌توان دریافت که پتانسیل‌های بسیار خوبی برای افزایش میزان بهره‌وری انرژی وجود دارد و می‌توان با مد نظر قرار دادن یک یا چند استراتژی از موارد یاد شده در فاز طراحی و یا تعمیرات اساسی قطار به میزان قابل‌قبولی در مصرف انرژی قطار صرفه‌جویی نمود که این موضوع نهایتاً باعث صرفه اقتصادی بیشتر محصول و کاهش هزینه سفر خواهد گردید.

## ۶- مراجع

- [1] Lukaszewicz (2001), *Energy Consumption and Running Time for Trains* (Doctoral Thesis). KTH Railway Technology, Stockholm, 2001
- [2] Meyer, M.; M. Aeberhard (1997), *An algorithm for the optimal control of the driving of trains*.
- [3] Euro Transport Consult (1997), *Energy Saving – potential in rolling stock and train operation*. Utrecht, 1997.
- [4] [Http://www.railway-energy.org](http://www.railway-energy.org), *The purchase of the new Copenhagen S-trains*.
- [5] Fors, J. (2001), *Energy consumption of passenger train X2 with regenerative braking and induction motors*. KTH Railway Technology, Stockholm, 2001.
- [6] Andersson, E.; K. Kottenhoff; B. Nelldal (2001), *Extra Wide-body Passenger Trains in Sweden – background and introduction*. Proceedings of the World Congress of Railway Research WCRR 2001, Cologne, 2001.
- [7] MOREAU M. (1998), *The TGV family and future developments*. ETR 5/98.
- [8] Andersson, E.; K. Kottenhoff; B. Nelldal (2001), *Extra Wide-body Passenger Trains in Sweden – background and introduction*. Proceedings of the World Congress of Railway Research WCRR 2001, Cologne, 2001.
- [9] Weigel, W.-D. (2000), *Reduction of Energy Consumption in Traction Systems with Superconducting Transformers*. Proceedings of the UIC Energy Efficiency Conference, Paris, 2000
- [10] Unger-Weber, F.; K.-H. Ketteler (1999), *Advanced Energy Management on Railway Vehicles*. Proceedings of the World Congress of Railway Research WCRR 99, Tokyo, 1999.
- [11] International Union of Railways (UIC), *The concept of elasticities* - 2003.