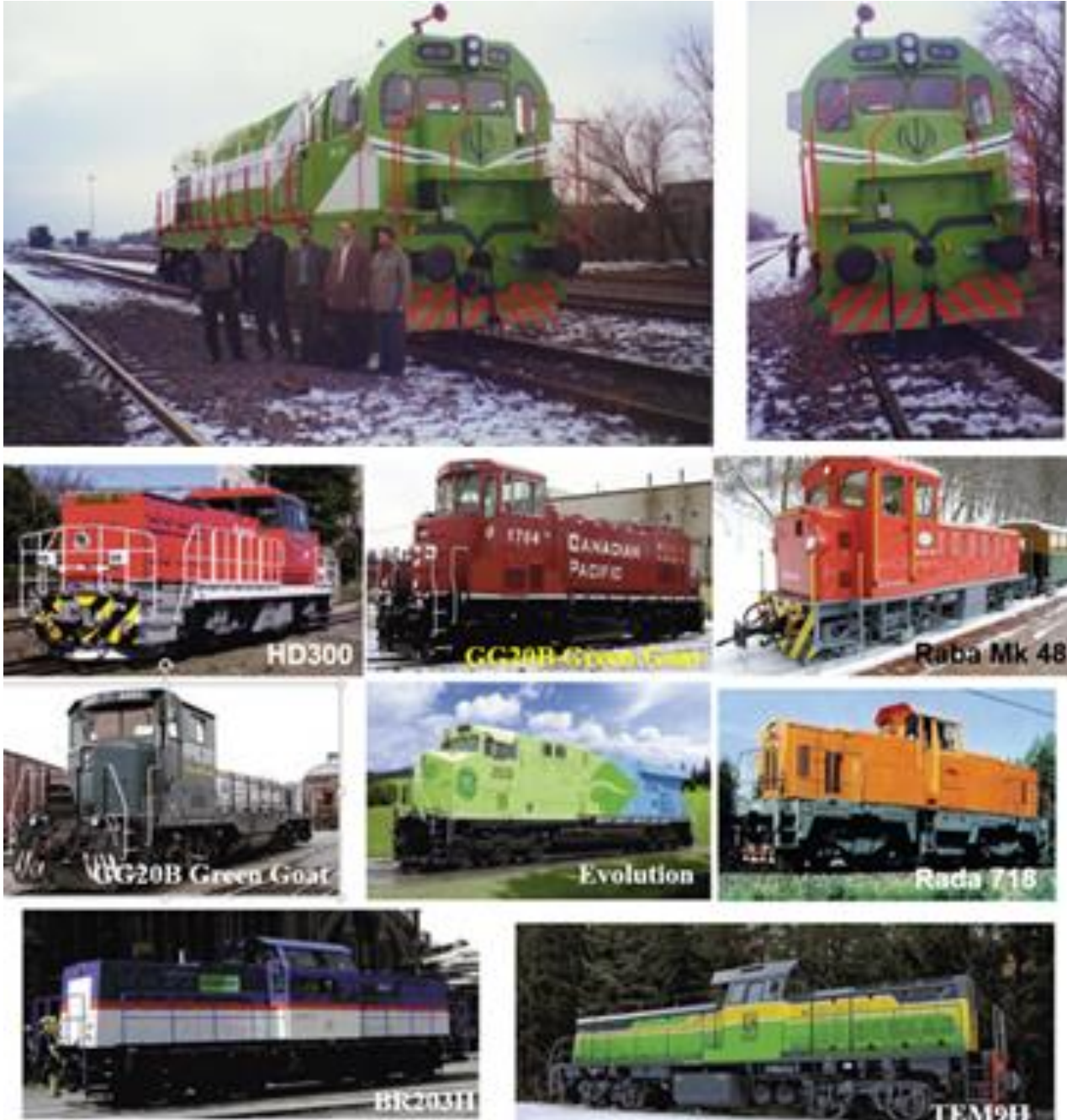


"ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریکی به هیبریدی"



نام و نام خانوادگی مدیر پروژه: محمد رضا نیکزاد

نام و نام خانوادگی مجری: سهراب امینی ولاشانی



"ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریکی به هیبریدی"

مؤلفان:

محمد رضا نیکزاد

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۳۹۹

کد گزارش: NRI-ER-708-PEAPN51-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.304

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریکی به
هیبریدی / مدیر پروژه. محمدرضا نیکزاد. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۹

۱۹۴ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. ابراهیمی، مهناز، همکار پروژه.
۲. خوانینزاده، محمد، همکار پروژه.
۳. امینی ولاشانی، سهراب، مجری.



انتشارات پژوهشگاه نیرو

مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب محمدرضا نیکزاد متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :

۱. مهناز ابراهیمی

۲. محمد خوانین‌زاده

پیشگفتار

امروزه استفاده از سیستم‌های رانشی هیبرید به عنوان راهکاری مرسوم جهت کاهش مصرف سوخت و همچنین کاهش آلودگی خودروهای با موتور درونسوز محسوب می‌شود. طی بیست سال اخیر خودروهای هیبرید مختلفی تولید شده و به بازار عرضه شده‌اند و تقریباً تمامی تولیدکنندگان مطرح دنیا سهمی از تولیدات خود را به خودروهای هیبرید اختصاص داده‌اند. این تولیدات فقط منحصر به خودروهای سواری نبوده و در انواع خودروها نظیر موتور سیکلت، اتوبوس‌ها، مینی بوس‌ها و حتی لوکوموتیوها محصولاتی مشاهده می‌شود.

لوکوموتیوها در کاربردهای مختلف در سیستم حمل‌ونقل ریلی و صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از کاربردهای لوکوموتیو استفاده مانوری آن است. لوکوموتیوهای مانوری در ایستگاههای قطار به منظور جابجایی واگن‌ها در بین مسیرها و همچنین در صنایع سنگین نظیر فولاد، ذوب آهن و صنایع معدنی جهت جابجایی مواد اولیه و تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع لوکوموتیو به دلیل زمان توقف زیاد (تا ۶۰٪ سیکل کاری) و روشن بودن دیزل ژنراتور درحین توقف، راندمان پایین بوده و مصرف سوخت بالا است. این درحالیست که این لوکوموتیوها به دلیل وجود دیزل ژنراتور و موتور الکتریکی در سیستم رانشی خود ساختاری نزدیک به هیبرید نوع سری دارند. بنابراین می‌توان با افزودن فقط مجموعه باتری، لوکوموتیوها را به نوع هیبرید تبدیل نمود و مصرف سوخت و آلودگی آنها را تا حدود زیادی کاهش داد.

از اینرو لوکوموتیوهای مانوری هیبریدی طی چند سال اخیر مورد توجه تولیدکنندگان مختلف جهان قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۰ شرکت توشیبا موفق به تولید لوکوموتیو مانوری هیبریدی با نام HD300 شد، که توانست با استفاده از مزایای هیبرید کردن مصرف سوخت را ۴۱٪، آلودگی را ۶۲٪ و همچنین نویز صوتی را ۲۰دسی بل نسبت به نوع دیزلی خود کاهش دهد. یا اینکه در کشور کانادا در لوکوموتیوهای هیبرید تولید شده تحت عنوان GG20B Green Goat تا ۷۰٪ کاهش مصرف سوخت و همچنین ۹۰٪ کاهش آلودگی حاصل شده است.

طبق بررسی‌ها در کشور ایران، با توجه به بالا بودن زمان توقف لوکوموتیوهای مانوری در صورت هیبرید کردن آنها کاهش مصرف سوختی زیادی حاصل می‌گردد. از طرفی با توجه به عمر بالای لوکوموتیوهای مانوری در ایران اکثر آنها در حال از رده خارج شدن و تعمیرات اساسی هستند بنابراین می‌توان با هیبرید کردن آنها ساینز دیزل ژنراتور مورد نیاز را کاهش داد و علاوه بر بازسازی مناسب با هزینه کمتر، شرایط کاهش مصرف سوخت را فراهم نیز در حین بازسازی نمود.

با توجه به مطالب فوق پروژهای تحت عنوان "ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری

دیزل الکتریکی به هیبریدی "به منظور بررسی و مطالعه هیبرید سازی لوکوموتیوهای دیزل الکتریک با همکاری مرکز توسعه فناوری خودروهای برقی در مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته پژوهشگاه نیرو در حال انجام است.

گزارش پیش رو مربوط به تمامی بندهای خدمات پروژه است که با مدیریت دکتر محمدرضا نیک زاد و محققین سرکار خانم مهندس مهناز ابراهیمی، مهندس مصطفی خوانینزاده و دکتر محمدرضا نیک زاد تدوین شده است. همچنین مجری پروژه جناب آقای مهندس سهراب امینی ولاشانی (رئیس مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته)، مجری طرح جناب آقای مهندس مهدی اسکویی (رئیس مرکز توسعه فناوری خودروهای برقی)، ناظر پروژه جناب آقای دکتر محمد چرخگرد می باشند.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل ۱- شناسایی صنایع و شرکتهای دارای لوکوموتیو.....	۴
۱-۱ مقدمه.....	۵
۲-۱ بررسی انواع سیستمهای رانشی در لوکوموتیو.....	۵
۱-۲-۱ مقدمه.....	۵
۲-۲-۱ تقسیمبندی لوکوموتیو دیزل.....	۶
۳-۲-۱ ساختار لوکوموتیوهای دیزل-الکتریک.....	۸
۳-۱ آمار لوکوموتیوهای مانوری داخلی و مشخصات فنی و انواع آنها.....	۱۰
۱-۳-۱ مقدمه.....	۱۰
۲-۳-۱ آمار لوکوموتیو مانوری در راهآهن جمهوری اسلامی ایران.....	۱۲
۳-۳-۱ مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری.....	۱۷
۴-۳-۱ لوکوموتیوهای مانوری در وزارت صنعت و معدن و تجارت.....	۲۵
۵-۳-۱ لوکوموتیو مانوری در صنایع پالایش و پخش فرآوردههای نفتی ایران.....	۲۵
۶-۳-۱ شرکت ملی پالایش و پخش فرآوردههای نفتی.....	۲۶
۷-۳-۱ لوکوموتیو مانوری در صنعت پتروشیمی.....	۲۷
۴-۱ برآورد مصرف سوخت، رژیم کاری، بازدهی لوکوموتیوهای مورد بررسی.....	۲۷
۵-۱ نتیجه گیری.....	۲۹
فصل ۲- بررسی تجارب داخلی و جهانی هیبرید سازی لوکوموتیو.....	۳۲
۱-۲ مقدمه.....	۳۳
۲-۲ تجارب داخلی.....	۳۳
۱-۲-۲ طراحی و ساخت لوکوموتیو نیمه صنعتی هیبریدی در ایران.....	۳۳
۳-۲ تجارب خارجی.....	۴۰
۱-۳-۲ لوکوموتیو هیبرید، سری HD300 محصول شرکت توشیبا ژاپن.....	۴۱
۲-۳-۲ لوکوموتیو هیبرید سینارا TEM9H محصول روسیه.....	۴۵

۳-۳-۲	GG20B Green Goat محصول شرکت ریل پاور کانادا.....	۴۶
۴-۳-۲	لوکوموتیو هیبرید Evolution محصول شرکت GE کشور ایالات متحده.....	۴۸
۵-۳-۲	لوکوموتیو هیبرید BR203H محصول شرکت آلستوم آلمان.....	۴۹
۶-۳-۲	لوکوموتیو Rada 718 محصول کشور چکوسلاواکی.....	۵۰
۷-۳-۲	لوکوموتیو هیبرید Raba Mk 48 محصول کشور مجارستان.....	۵۰
۴-۲	نتیجه گیری.....	۵۱
فصل ۳-	بررسی الزامات فنی هیبریدسازی یک لوکوموتیو.....	۵۲
۱-۳	مقدمه.....	۵۲
۲-۳	المان های مورد نیاز در سیستم رانشی لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک.....	۵۳
۱-۲-۳	موتور دیزلی.....	۵۴
۲-۲-۳	ژنراتور اصلی.....	۵۴
۳-۲-۳	ژنراتور فرعی یا کمکی.....	۵۴
۴-۲-۳	دمنده موتور.....	۵۵
۵-۲-۳	ورودی های هوا.....	۵۵
۶-۲-۳	یکسوساز/اینورتر.....	۵۵
۷-۲-۳	سیستم کنترل الکترونیکی.....	۵۶
۸-۲-۳	میز کنترل.....	۵۶
۹-۲-۳	باتری.....	۵۶
۱۰-۲-۳	بوژی.....	۵۷
۱۱-۲-۳	موتور کششی (تراکشن).....	۵۹
۱۲-۲-۳	دنده.....	۵۹
۱۳-۲-۳	مخزن سوخت.....	۶۰
۱۴-۲-۳	مخزن هوا.....	۶۱
۱۵-۲-۳	کمپرسور هوا.....	۶۱
۱۶-۲-۳	محور محرکه.....	۶۱
۱۷-۲-۳	رادیاتور و فن رادیاتور.....	۶۱

۶۱	۳-۲-۱۸ سیستم توربو-شارژر.....
۶۲	۳-۳ انواع موتورهای کششی.....
۶۲	۳-۳-۱ موتورهای جریان مستقیم (DC).....
۶۳	۳-۳-۲ موتورهای جریان متناوب (AC).....
۶۹	۳-۴ پیکره‌بندی لوکوموتیوهای هیبرید.....
۷۰	۳-۴-۱ هیبرید سری.....
۷۰	۳-۴-۲ هیبرید موازی.....
۷۰	۳-۵ سیستم کنترلی مورد نیاز.....
۷۰	۳-۵-۱ استراتژی کنترلی.....
۷۱	۳-۵-۲ استراتژی کنترلی ترموستات.....
۷۲	۳-۵-۳ استراتژی کنترلی دنبال کننده توان.....
۷۳	۳-۵-۴ استراتژی کنترلی مورد استفاده در لوکوموتیو مانوری هیبریدی HD300 محصول شرکت توشیبا ژاپن [۲۹].....
۸۰	۳-۵-۵ استراتژی کنترلی بیشینه وضعیت شارژباتری.....
۸۱	۳-۵-۶ استراتژی کنترلی پیشنهادی.....
۸۷	۳-۶ سایر لزومات.....
۸۷	۳-۷ جمع‌بندی.....
۸۸	۴- طراحی کلی یک نمونه اولیه هیبرید.....
۸۹	۴-۱ طراحی سیستم رانشی یک لوکوموتیو هیبرید نمونه با توجه به عملکرد درخواستی.....
۸۹	۴-۱-۱ مقدمه و فرضیات طراحی.....
۹۳	۴-۱-۲ محاسبه سائز دیزل ژنراتور.....
۹۵	۴-۱-۳ تعیین ظرفیت باتری.....
۹۹	۴-۲ مقایسه عملکردی نمونه طراحی شده با نمونه پایه.....
۱۰۲	۴-۳ مقایسه اقتصادی نمونه طراحی شده با نمونه پایه.....
۱۰۳	۴-۴ جمع‌بندی.....
۱۰۵	۵- فصل برآورد هزینه اکتساب دانش فنی.....
۱۰۶	۵-۱ مقدمه.....
۱۰۶	۵-۲ برآورد اقتصادی اجزاء مورد استفاده در لوکوموتیو مانوری هیبریدی.....

۱-۲-۵	موتور دیزلی.....	۱۰۷
۲-۲-۵	ژنراتور.....	۱۱۱
۳-۲-۵	باتری.....	۱۱۲
۴-۲-۵	مبدل dc/dc.....	۱۳۸
۳-۵	برآورد اقتصادی نمونه اولیه.....	۱۳۹
۴-۵	برآورد اقتصادی تبدیل انبوه.....	۱۳۹
۵-۵	نتیجه‌گیری.....	۱۴۰
فصل ۶ -	ارائه یک طرح کسب‌وکار برای جایگزینی لوکوموتیوهای دیزلی با انواع هیبریدی آن.....	۱۴۱
۱-۶	مقدمه.....	۱۴۲
۲-۶	معرفی طرح.....	۱۴۲
۱-۲-۶	طرح مسئله.....	۱۴۲
۳-۶	ارائه راه‌حل.....	۱۴۴
۴-۶	تحلیل صنعت.....	۱۴۶
۱-۴-۶	بررسی بازار هدف طرح.....	۱۴۶
۲-۴-۶	بازیگران اصلی طرح.....	۱۴۶
۳-۴-۶	چرا پژوهشگاه نیرو؟.....	۱۴۶
۵-۶	طرح تولید.....	۱۴۷
۱-۵-۶	فهرست تجهیزات و فناوری مورد نیاز.....	۱۴۷
۲-۵-۶	موقعیت و فضای لازم.....	۱۴۷
۶-۶	طرح اقتصادی و مالی.....	۱۴۷
۱-۶-۶	میزان جریان نقدینگی در طول افق برنامه ریزی.....	۱۴۸
۲-۶-۶	بررسی روش‌های ارزیابی اقتصادی.....	۱۵۸
۳-۶-۶	تحلیل حساسیت.....	۱۶۲
۷-۶	نتیجه‌گیری.....	۱۶۴
	مراجع.....	۱۶۵
	پیوست‌ها.....	۱۶۸

شماره صفحه	فهرست اشکال
۵.....	شکل ۱-۱ طبقه‌بندی انواع لوکوموتیو بر اساس منبع انرژی.....
۹.....	شکل ۱-۲: لوکوموتیو دیزل-الکتریک.....
۱۰.....	شکل ۱-۳: هیستوگرام عملکرد دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو.....
۱۰.....	شکل ۱-۴: سیستم پیش‌رانه سری-هیبرید در لوکوموتیو مانوری Green Goat.....
۱۸.....	شکل ۱-۵: تصویری از لوکوموتیو G-12.....
۱۸.....	شکل ۱-۶: تصویری از لوکوموتیو G-8.....
۱۹.....	شکل ۱-۷: تصویری از لوکوموتیو G-16.....
۱۹.....	شکل ۱-۸: تصویری از لوکوموتیو G-18.....
۲۰.....	شکل ۱-۹: تصویری از لوکوموتیو G-22.....
۲۱.....	شکل ۱-۱۰: تصویری از لوکوموتیو GT26CW.....
۲۶.....	شکل ۱-۱۱: تانکر ربلی جهت حمل محموله نفتی.....
۳۴.....	شکل ۲-۱ مجری پروژه و تیم تست عملکرد لوکوموتیو برقی.....
۳۷.....	شکل ۲-۲ لوکوموتیو هیبریدی در حال نصب تجهیزات و بازسازی شاسی.....
۳۷.....	شکل ۲-۳ اینورترهای ۱۵۰ کیلووات و مخزن هوای ترمز.....
۳۹.....	شکل ۲-۴ نمای لوکوموتیو هیبریدی از جلو و عقب در حال تست عملکرد.....
۴۰.....	شکل ۲-۵ نمای لوکوموتیو هیبریدی از پهلو.....
۴۰.....	شکل ۲-۶ وضعیت حال حاضر باتری‌ها لوکوموتیو برقی هیبرید در کارخانجات بازسازی لوکوموتیو کرج.....
۴۱.....	شکل ۲-۷ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید سری HD300 [۸].....
۴۱.....	شکل ۲-۸ شمای جایابی اجزاء در لوکوموتیو هیبرید HD300 [۸].....
۴۲.....	شکل ۲-۹ دیاگرام بخش رانشی لوکوموتیو هیبرید سری HD300 [۹].....
۴۲.....	شکل ۲-۱۰ شارش توان لوکوموتیو هیبرید سری HD300 در دو وضعیت الف) رانشی و ب) ترمزی.....
۴۳.....	شکل ۲-۱۱ نمای ظاهری مجموعه باتری مورداستفاده در لوکوموتیو هیبرید سری HD300.....
۴۴.....	شکل ۲-۱۲ موتور الکتریکی مورداستفاده در لوکوموتیو هیبرید سری HD300 [۹].....
۴۵.....	شکل ۲-۱۳ مقایسه تلفات در موتور القایی و موتور PMSM.....
۴۶.....	شکل ۲-۱۴ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید سینارا TEM9H محصول روسیه [۱۰].....

- شکل ۱۵-۲ تصویر نمونه اولیه لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat [۱۲] ۴۶
- شکل ۱۶-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat بکار گرفته شده در شرکت Canadian Pacific [۱۲] ۴۷
- شکل ۱۷-۲ شمای فناوری هیبرید به کاررفته در لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat [۱۴] ۴۷
- شکل ۱۸-۲ دیاگرام سیستم پیشرانه لوکوموتیو مانوری هیبرید Green Goat [۱۳] ۴۸
- شکل ۱۹-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید Evolution محصول شرکت GE کشور ایالات متحده [۱۶] ۴۸
- شکل ۲۰-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید BR203H محصول شرکت آلتوم آلمان [۱۸] ۴۹
- شکل ۲۱-۲ مدهای مختلف عملکردی لوکوموتیو مانوری هیبرید BR203H محصول شرکت آلتوم آلمان [۱۸] ۵۰
- شکل ۲۲-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید Rada 718 محصول کشور چکوسلاواکی [۱۹] ۵۰
- شکل ۲۳-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید Raba Mk 48 محصول کشور مجارستان [۲۱] ۵۱
- شکل ۱-۳ اجزاء اصلی سیستم رانشی لوکوموتیو دیزل-الکتریک ۵۴
- شکل ۲-۳ تصویر بوژی در یک لوکوموتیو ۵۸
- شکل ۳-۳ انواع آرایش بوژی در یک لوکوموتیو ۵۹
- شکل ۴-۳ نحوه اتصال موتور به بوژی (الف) توسط جعبه دنده (ب) بدون جعبه دنده ۶۰
- شکل ۵-۳ توپولوژی مرسوم اتصال موتور DC به دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو ۶۳
- شکل ۶-۳ نمونه‌ای از اتصال موتور AC به دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو با استفاده از اینورتر مرکزی در بوژی ۶۵
- شکل ۷-۳ نمونه‌ای از اتصال موتور AC به دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو با استفاده از اینورترهای مجزا ۶۵
- شکل ۸-۳ مقایسه تلفات در موتور القایی و موتور PMSM [۲۹] ۶۸
- شکل ۹-۳ پیکره‌بندی لوکوموتیو هیبرید (الف) هایبرید سری (ب) هیبرید موازی ۶۹
- شکل ۱۰-۳ شرح عملکرد استراتژی کنترلی ترموستات ۷۱
- شکل ۱۱-۳ شمای استراتژی کنترلی در لوکوموتیو هیبرید HD300 ۷۴
- شکل ۱۳-۳ حالت محدودیت تولید توان توسط موتور دیزلی -ژنراتور (الف) تزریق توان به سیستم توسط سیستم ذخیره ساز انرژی در حالت خاموش بودن موتور-ژنراتور و (ب) تزریق توان به سیستم توسط سیستم ذخیره ساز انرژی و موتور دیزلی-ژنراتور ۷۶
- شکل ۱۴-۳ حالت عملکرد استاندارد ۷۷
- شکل ۱۵-۳ حالت تولید توان عادی ۷۸

- شکل ۱۶-۳ حالت ممنوعیت تامین توان..... ۷۹
- شکل ۱۷-۳ شرح عملکردی استراتژی کنترلی بیشینه وضعیت شارژ باتری..... ۸۱
- شکل ۱۸-۳ میزان توان کششی در دنده‌های مختلف در یک لوکوموتیو نمونه..... ۸۲
- شکل ۱۹-۳ مصرف سوخت مخصوص چند نوع دیزل-ژنراتور مختص لوکوموتیوهای مانوری شرکت جنرال موتورز با توان‌های نامی مختلف به ازای دنده‌های مختلف..... ۸۳
- شکل ۱-۴ دیاگرام بخش تولید توان در لوکوموتیو G12..... ۹۰
- شکل ۲-۴ میزان مصرف سوخت در هر دنده دیزل ژنراتور..... ۹۱
- شکل ۳-۴ ساختار بخش تولید توان لوکوموتیو بعد از هیبریداسیون..... ۹۲
- شکل ۴-۴ سیکل رانشی لوکوموتیو مانوری تحت بررسی..... ۹۳
- شکل ۵-۴ (الف) مدت زمان و (ب) درصد زمانی فعالیت لوکوموتیو در دنده‌های مختلف در سیکل رانشی..... ۹۳
- شکل ۶-۴ انرژی تامین شده از دیزل ژنراتور در طول سیکل رانشی..... ۹۴
- شکل ۷-۴ متوسط توان در سیکل رانشی..... ۹۵
- شکل ۸-۴ عملکرد اجزا لوکوموتیو در یک سیکل کاری (الف) سیکل کاری لوکوموتیو، (ب) توان تامین شده توسط دیزل ژنراتور و (ج) سطح انرژی باتری..... ۹۶
- شکل ۹-۴ منحنی تعداد سیکل عمر باتری و میزان درصد انرژی مورد استفاده از باتری در یک باتری لیتیوم یون [۴۲]..... ۹۷
- شکل ۱۰-۴ بررسی عملکرد لوکوموتیو دیزلی پایه، (الف) سیکل رانشی (ب) توان خروجی دیزل ژنراتور..... ۱۰۱
- شکل ۱۱-۴ بررسی عملکرد لوکوموتیو هیبریدی طراحی شده، (الف) سیکل رانشی (ب) توان خروجی دیزل ژنراتور و (ج) وضعیت شارژ باتری..... ۱۰۲
- شکل ۱-۵: طرح موتور ملی G87 شرکت دسا [۲]..... ۱۰۸
- شکل ۲-۵: منحنی توان و گشتاور خروجی و مصرف سوخت در دیزل ۴۵۷..... ۱۱۰
- شکل ۳-۵: نحوه عملکرد سلول حین شارژ و دشارژ..... ۱۱۳
- شکل ۴-۵: استفاده از باتری سرب-اسید در لوکوموتیو هیبرید داخلی ساخته شده در سال ۱۳۷۹..... ۱۱۵
- شکل ۵-۵: سلول لیتیوم-یون [۵۰]..... ۱۱۸
- شکل ۶-۵: بررسی تغییرات قیمت باتری لیتیوم یون از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ [۴۱]..... ۱۱۹
- شکل ۷-۵: ویژگی‌های انواع کاتدهای بکار رفته در سلول‌های لیتیوم-یونباتری اکسید لیتیوم - کبالت [۵۱]..... ۱۲۰
- شکل ۱۲-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری اکسید لیتیوم نیکل کبالت آلومینیم [۵۲]..... ۱۲۵

- شکل ۱۳-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری لیتیوم تیتانات..... ۱۲۶
- شکل ۱۴-۵: مقایسه انواع باتری‌های لیتیوم-یون [۵۰]..... ۱۲۸
- شکل ۱۵-۵: مقایسه هزینه و چگالی انرژی انواع باتری لیتیوم-یون [۵۲]..... ۱۲۹
- شکل ۱-۶: بوم مدل کسب و کار تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریک مرسوم به هیبریدی..... ۱۴۳
- شکل ۲-۶: دیاگرام سیستم پیشرانه یک لوکوموتیو دیزل الکتریک مرسوم..... ۱۴۴
- شکل ۳-۶: دیاگرام سیستم پیشرانه لوکوموتیو دیزل الکتریک هیبریدی پیشنهادی..... ۱۴۵
- شکل ۴-۶: جریان نقدینگی..... ۱۴۹
- شکل ۵-۶: موقعیت نسبی ایستگاه راه‌آهن تهران..... ۱۵۲
- شکل ۶-۶: میزان تولید آلودگی‌های مختلف موتور دیزلی EMD 12-645E به ازای دنده‌های مختلف..... ۱۵۳
- شکل ۷-۶: درصد زمانی فعالیت لوکوموتیو در دنده‌های مختلف در طی مدت زمان ۲۴ ساعت..... ۱۵۴
- شکل ۸-۶: جریان نقدینگی طرح هیبریدکردن لوکوموتیو مانوری در طی افق برنامه‌ریزی ۶ ساله بدون در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش هزینه اجتماعی..... ۱۵۷
- شکل ۹-۶: جریان نقدینگی طرح هیبریدکردن لوکوموتیو مانوری در طی افق برنامه‌ریزی ۶ ساله با در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش هزینه اجتماعی..... ۱۵۷

فهرست جداول

شماره صفحه

جدول ۱-۱: تعداد لوکوموتیوهای شرکت راه آهن بر اساس طبقه بندی سنی [۲]	۱۱
جدول ۱-۲: میانگین تعداد لوکوموتیو مانوری در سرویس [۳] و [۴]	۱۱
جدول ۱-۳: میانگین روزانه تعداد لوکوموتیو در گردش نیمه اول سال ۹۷ (در تمام کارکردهای مانوری، باری و مسافری) [۵]	۱۲
جدول ۱-۴: میانگین روزانه تعداد لوکوموتیوهای در سرویس (به تفکیک نوع) در سال ۱۳۹۷ [۵]	۱۳
جدول ۱-۵: کاربرد لوکوموتیو G-12 در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری	۱۴
جدول ۱-۶: کاربرد لوکوموتیو G-22 در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری	۱۵
جدول ۱-۷: کاربرد لوکوموتیو GT-26 CW در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری	۱۵
جدول ۱-۸: کاربرد لوکوموتیو GE در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری	۱۵
جدول ۱-۹: کاربرد لوکوموتیو GT-26 CW-p در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری	۱۵
جدول ۱-۱۰: کاربرد لوکوموتیو GT-26 در دو حوزه مانوری، باری	۱۶
جدول ۱-۱۱: کاربرد لوکوموتیو CDN 10 در دو حوزه مانوری، باری	۱۶
جدول ۱-۱۲: میانگین آمار لوکوموتیوهای مانوری شرکت راه آهن در اسفند ۱۳۹۶ [۴]	۱۶
جدول ۱-۱۳: میانگین آمار لوکوموتیوهای مانوری شرکت راه آهن در اسفند ۱۳۹۴ [۳]	۱۶
جدول ۱-۱۴: مشخصات فنی لوکوموتیوهای کاربردی در مانور [۵] و [۶]	۲۳
جدول ۱-۱۵: مشخصات سیکل کاری نمونه یک لوکوموتیو مانوری G12 (استعلام از شرکت راه آهن)	۲۸
جدول ۱-۱۶: مشخصات سیکل کاری، میزان مصرف سوخت، توان قابل تامین در دنده های مختلف یک لوکوموتیو مانوری G12 (استعلام از شرکت راه آهن)	۲۹
جدول ۲-۱: مشخصات فنی موتور الکتریکی مورد استفاده در لوکوموتیو هیبرید سری HD300 [۹]	۴۳
جدول ۲-۲: مشخصات فنی لوکوموتیوهای هیبرید مورد نظر	۴۴
جدول ۳-۱: مشخصات توانی و هزینه اجزاء اصلی بخش رانشی لوکوموتیوهای مانوری مورد استفاده در شرکت راه آهن جمهوری اسلامی	۶۴
جدول ۳-۲: مزایا و معایب موتور سنکرون آهن ربا دائمی و موتور القایی در کاربردهای حمل نقل ریلی	۶۸
جدول ۳-۳: عملکرد سیستم ذخیره ساز انرژی در استراتژی ترموستات	۷۲
جدول ۳-۴: نحوه عملکرد استراتژی دنبال کننده توان	۷۳
جدول ۳-۵: مشخصات فنی لوکوموتیو هیبرید HD300	۷۳
جدول ۳-۶: وضعیت های عملکردی ۸ گانه استراتژی کنترل مدیریت انرژی در لوکوموتیو HD300	۸۰

جدول ۲-۴ مقدار توان دیزل ژنراتور در هر دنده	۹۰
جدول ۳-۴ اطلاعات محاسبه شده مصرف سوخت	۹۹
جدول ۴-۴ بررسی هزینه سیستم تولید توان دو نوع لوکوموتیو دیزل-الکتریک و معادل هیبریدی آن	۱۰۳
جدول ۵-۱: مشخصات فنی موتور ملی شرکت دسا [۲]	۱۰۸
جدول ۵-۲: مشخصات فنی دیزل ۴۵۷ شرکت ایدم	۱۰۹
جدول ۵-۳: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه دیزل ۴۵۷ با توان ۳۱۵ کیلو وات	۱۱۰
جدول ۵-۴: مشخصات فنی ژنراتور DSG52M2-4 ماه نیرو	۱۱۱
جدول ۵-۵: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه ژنراتور منتخب	۱۱۱
جدول ۵-۶: مقایسه انواع باتری قابل کاربرد در خودروهای برقی	۱۱۶
جدول ۵-۱۲: مشخصات باتری اکسید لیتیوم نیکل کبالت آلومینیم [۵۲]	۱۲۵
جدول ۵-۱۳: مشخصات باتری لیتیوم تیتانات	۱۲۶
جدول ۵-۱۴: مقایسه عملکرد انواع باتری‌های لیتیوم-یون [۵۱]	۱۲۸
جدول ۵-۱۵: ویژگی‌های انواع ساختار باتری‌های لیتیوم-یون [۵۰]	۱۳۰
جدول ۵-۱۶: مشخصات مازول ۴۸ ولتی مورد استفاده در طراحی [۵۳]	۱۳۱
جدول ۵-۱۷: مشخصات مجموعه باتری طراحی شده	۱۳۴
جدول ۵-۱۸: هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از مازول وارداتی	۱۳۴
جدول ۵-۱۹: مشخصات سلول سری 38120 SE شرکت توان [۵۴]	۱۳۵
جدول ۵-۲۰: هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های داخلی	۱۳۷
جدول ۵-۲۱: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه مجموعه باتری	۱۳۷
جدول ۵-۲۲: هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مبدل dc/dc	۱۳۸
جدول ۵-۲۳: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه مبدل	۱۳۹
جدول ۵-۲۴: برآورد هزینه تبدیل یک نمونه لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریکی	۱۳۹
جدول ۵-۲۵: برآورد هزینه تبدیل انبوه لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریک	۱۳۹
جدول ۶-۱: تجهیزات مورد نیاز جهت تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریک	۱۴۷
جدول ۶-۲: برآورد هزینه تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریک	۱۵۰
جدول ۶-۳: اطلاعات محاسبه شده مصرف سوخت و میزان کاهش آن در لوکوموتیو هیبریدی	۱۵۱

- جدول ۴-۶ میزان آلاینده‌گی موتور دیزلی EMD 12-645E به ازای دنده‌های مختلف بر حسب گرم بر ساعت فعالیت ۱۵۳
- جدول ۵-۶ میزان آلاینده‌گی روزانه و سالانه لوکوموتیو دیزلی معمولی و هیبریدی و همچنین میزان کاهش آلاینده‌گی (روزانه و سالانه) لوکوموتیو مانوری بعد از هیبریداسیون بر حسب ۱۵۴
- جدول ۶-۶ هزینه اجتماعی هر کدام از آلاینده‌ها و همچنین مقدار هزینه اجتماعی سالیانه ناشی از آلودگی هوا برای دو نوع لوکوموتیو دیزل معمولی و هیبریدی به همراه مقدار کاهش هزینه اجتماعی سالیانه ۱۵۵
- جدول ۷-۶ میزان ارزش خالص فعلی طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری (جریان نقدینگی بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) ۱۵۹
- جدول ۸-۶ دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری (جریان نقدینگی بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) ۱۶۱
- شکل ۱۰-۶ مقادیر ارزش خالص فعلی به ازای قیمت‌های مختلف سوخت (بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) ۱۶۳
- شکل ۱۱-۶ دوره بازگشت سرمایه به ازای قیمت‌های مختلف سوخت (بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) ۱۶۳

فصل ۱ - شناسایی صنایع و شرکت‌های دارای لوکوموتیو

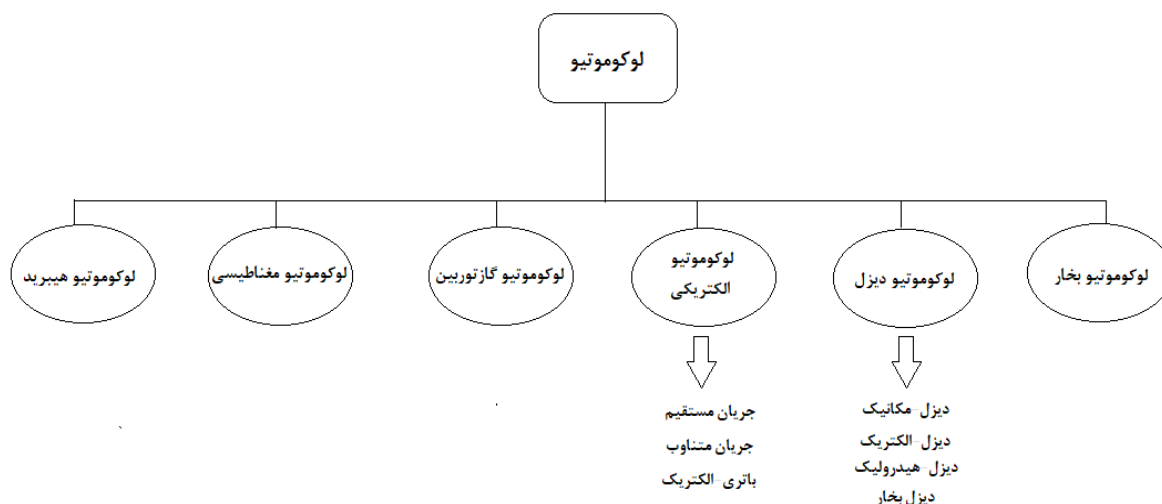
۱-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا به بررسی انواع سیستم‌های رانشی در لوکوموتیو پرداخته می‌شود. سپس بطور دقیق‌تر به معرفی ساختار لوکوموتیو دیزل الکتریک اشاره می‌شود. در ادامه به معرفی صنایعی که در آنها از لوکوموتیو مانوری استفاده و بهره‌وری می‌شود پرداخته خواهد شد. در ادامه نتایج مذاکرات با این مراکز جهت اعلام مشخصات لوکوموتیو مورد استفاده بیان می‌شود و در بخش انتهایی این فصل سیکل رانشی اعلام شده توسط شرکت راه آهن و همچنین مشخصات انرژی، توانی و همچنین میزان مصرف سوخت آن اشاره خواهد شد.

۲-۱ بررسی انواع سیستم‌های رانشی در لوکوموتیو

۱-۲-۱ مقدمه

لوکوموتیو ماشینی کشنده یا وسیله نقلیه ریلی است که واگن‌ها یا قطار به آن متصل شده و نیروی محرکه‌ی لازم را برای حرکت آن‌ها ایجاد می‌کند. لوکوموتیوها نیروی حرکتی خود را از سوخت‌های فسیلی یا از یک منبع الکتریکی خارجی به دست می‌آورند. لوکوموتیوها از نظر کاربری به چهار دسته باری، مسافری، مانور و چندمنظوره تقسیم می‌شوند. لوکوموتیوهای مانور گشتاور راه‌انداز زیادی دارند و جهت انجام عملیات مانور در محوطه‌های ایستگاه و کار (سیر در سرعت‌های پایین و به طور مداوم) استفاده می‌شوند. لوکوموتیوها را می‌توان بر اساس منبع انرژی نیز طبقه‌بندی کرد که این نوع طبقه‌بندی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱-۱ طبقه‌بندی انواع لوکوموتیو بر اساس منبع انرژی

نیروی محرکه لوکوموتیو بخار به وسیله یک دستگاه ماشین بخار تأمین می‌شود که با بخار داغ (سوپرهیت) و سیلندرهایی که فشار بخار داغ را به نیروی رانش برای تولید گشتاور حرکت تبدیل

می‌کنند، کار می‌کند و راندمان آن در حدود ۶٪ تا ۱۲٪ است. علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته در اروپا و آمریکا برای تولید نسل جدید ابر لوکوموتیوهای بخار، این نوع لوکوموتیوها در اغلب کشورها منسوخ و از رده خارج شده‌اند.

با ابداع موتور دیزل و ساخت نخستین لوکوموتیو دیزلی در سال ۱۹۳۴ در آمریکا، لوکوموتیوهای دیزلی به‌طور گسترده در اغلب راه‌آهن‌های جهان جایگزین لوکوموتیو بخار گردید و به‌عنوان اصلی‌ترین مولد قدرت و کشش راه‌آهن شناخته شد. امروزه مدل‌های متنوعی از انواع لوکوموتیوهای دیزلی برحسب نوع موتور و نوع سیستم انتقال قدرت در جهان تولید و عرضه می‌شوند. راندمان کلی این نوع لوکوموتیوها بین ۳۰ تا ۴۰ درصد است. این لوکوموتیوها مجهز به موتورهای دیزلی دوزمانه یا چهارزمانه با قدرت ۱۲۵ اسب بخار به ازای هر سیلندر در نوع معمولی و قدرت ۲۵۰ اسب بخار به ازای هر سیلندر در نوع توربوشارژی می‌باشند.

۲-۲-۱ تقسیم‌بندی لوکوموتیو دیزل

لوکوموتیوهای دیزلی از لحاظ نوع موتور دیزل ممکن است دو زمانه و یا چهارزمانه باشند اما از لحاظ سیستم انتقال قدرت عمدتاً به سه نوع زیر تقسیم می‌شوند:

دیزل مکانیک

در این نوع از لوکوموتیوها سیستم انتقال قدرت به‌صورت مکانیکی و همانند کامیون‌ها است. توان از طریق کلاچ، گیربکس و میل‌گردان از موتور به محور و چرخ‌ها منتقل می‌شود. این نوع از سیستم انتقال قدرت در لوکوموتیوهای دیزلی نسل اول کاربرد بیشتری داشته و امروزه نیز در لوکوموتیوهای دیزلی سبک که عمدتاً در عملیات مانور و یا خطوط فرعی محلی سیر می‌کنند، استفاده می‌شود. لوکوموتیوهای داوونپورت آلمانی نمونه‌ای از این لوکوموتیوها می‌باشد که به تعداد محدود در راه‌آهن ایران به‌عنوان لوکوموتیو مانوری در کارخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [1].

دیزل هیدرولیک

این لوکوموتیوها دارای دو نوع سیستم انتقال قدرت هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک بوده که نوع اول بیشتر در لوکوموتیوهای مانوری و سبک مسافری و نوع دوم بیشتر در خودکشنده‌های سبک استفاده می‌شود.

– هیدرواستاتیک: سیستم انتقال قدرت به‌وسیله کانورتر (مبدل گشتاور هیدرولیک)، میل گردان و گیربکس انجام می‌شود.

– هیدرودینامیک: سیستم انتقال قدرت به‌وسیله هیدروپمپ و آکومولاتور هیدرولیکی و هیدروموتور انجام می‌شود.

دیزل الکتریک

سیستم انتقال قدرت از طریق تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی به وسیله ژنراتور و تبدیل مجدد از الکتریکی به مکانیکی در موتور کششی انجام می‌شود. در این نوع لوکوموتیو قدرت مکانیکی موتور دیزل به وسیله ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل و سپس در موتورهای کششی نصب شده روی محورها مجدداً به انرژی مکانیکی تبدیل و به صورت گشتاور دورانی به چرخ‌ها منتقل می‌شوند. از این نوع لوکوموتیو بیشتر در خطوط اصلی و در انواع AC-DC و AC-AC استفاده می‌شود. در این نوع لوکوموتیو سیستم انتقال قدرت به روش هیدرومکانیکی انجام می‌شود و در دو نوع هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. که عمدتاً از نوع هیدرواستاتیک در لوکوموتیوهای مانوری و ترن‌س‌های دیزلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع لوکوموتیو قدرت موتور از طریق سیستم تبدیل گشتاور هیدرولیکی به نام هیدروکانورتر به گیربکس و شافت‌های انتقال دهنده قدرت به چرخ‌ها منتقل می‌شود.

در لوکوموتیوهای الکتریکی یا برقی که در اغلب راه آهن‌های مدرن باری و مسافری مورد استفاده قرار می‌گیرند، قدرت مورد نیاز برای تولید نیرو محرکه از طریق یک شبکه انتقال بالاسری و یا ریل سوم از طریق شبکه مولد الکتریسیته خارج از لوکوموتیو تأمین می‌شود و بر حسب میزان ولتاژ و فرکانس انواع مختلف و متنوعی دارند. راندمان کلی این لوکوموتیو با احتساب تلفات نیروگاه مولد الکتریسیته بین ۲۰ تا ۲۵ درصد است. اما به دلیل سروصدای کمتر و عدم آلودگی هوا در اغلب مناطق شهری و راه آهن‌های مدرن و سریع‌السیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به موازات پیشرفت‌های چشم‌گیر در ساخت موتورهای توربوفن و استفاده گسترده از آن در صنایع هواپیمایی و هوانوردی، استفاده از این موتورها در قطارهای مسافری سریع‌السیر در اروپا و آمریکا مطرح و نیز ساخت قطارهای توربو ترن مورد توجه قرار گرفت. این نوع قطارها علی‌رغم پیش‌بینی‌های اولیه در عمل توفیق چندانی نداشته و به جز در موارد خاص مورد استقبال قرار نگرفتند. زیرا سرعت بالای موتورهای توربینی در هوای غلیظ و مرطوب سطح زمین با ذرات معلق کارایی مناسبی ندارد. علی‌رغم این مشکلات، با توجه به توان و شتاب بالای موتورهای توربینی که برای قطارهای سریع‌السیر مسافری مناسب می‌باشد، تلاش در زمینه ساخت موتورهای توربینی مناسب برای ترن‌س‌های مسافری همچنان در آمریکا دنبال می‌شود.

لوکوموتیو مغناطیسی یا مگلو^۱ از دو واژه انگلیسی مغناطیسی^۲ و شناوری^۳ گرفته شده است. در این نوع از قطارها حرکت در ابتدا بر روی چرخ‌ها انجام می‌پذیرد و پس از مدتی با استفاده از نیروی

^۱ MagLev

^۲ Magnetic

^۳ Levitation

مغناطیسی قوی قطار توسط قطب‌های همنام میدان مغناطیسی به بالا و توسط قطب‌های غیرهمنام به جلو حرکت می‌نماید.

قطار هیبرید یک لوکوموتیو یا یک قطار است که از یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی قابل شارژ جانبی^۱ (RESS) بهره می‌گیرد. این سیستم بین منبع توان (که اغلب یک موتور دیزل محرک اصلی است) و موتور کششی که به چرخ‌ها متصل است، قرار دارد. از آنجایی که بیشتر لوکوموتیوها از نوع دیزل-الکتریک هستند، لذا همه تجهیزات لوکوموتیوهای هیبرید سری به جز RESS را دارا می‌باشند. این ویژگی، ساخت لوکوموتیوهای هیبریدی را بسیار ساده می‌سازد. انرژی مازاد تولیدشده از منبع توان یا انرژی بازگشتی در هنگام ترمزگیری، سیستم ذخیره‌سازی انرژی را شارژ می‌کند. انرژی ذخیره‌شده به سیستم انتقال متصل بوده و پس از تقویت به منبع توان اصلی متصل می‌گردد. در دیزل‌های موجود سیستم ذخیره‌سازی می‌تواند باتری‌های الکتریکی یا چرخ طیار باشد.

لوکوموتیوهای دیزل-الکتریک پتانسیل بسیار خوبی برای ذخیره‌سازی انرژی در هنگام ترمز دینامیک هستند. در هنگام ترمز دینامیک موتورهای کششی از حالت موتوری به حالت ژنراتوری جهت توقف قطار تغییر وضعیت می‌دهند. در صورتی که راهی برای تبدیل و ذخیره‌سازی این انرژی وجود نداشته باشد، این انرژی به صورت حرارت از طریق مقاومت ترمز دینامیک لوکوموتیو وارد اتمسفر خواهد شد؛ که برای این موضوع نیز به سیستم خنک‌کاری مجهزی نیاز است. استفاده از یک سیستم ذخیره‌سازی به این معنی است که یک قطار نیمه برقی می‌تواند از سیستم ترمز دینامیک استفاده نماید و حتی در حالتی که لوکوموتیو در حالت بی‌باری یا متوقف است، موتور دیزل را خاموش نماید.

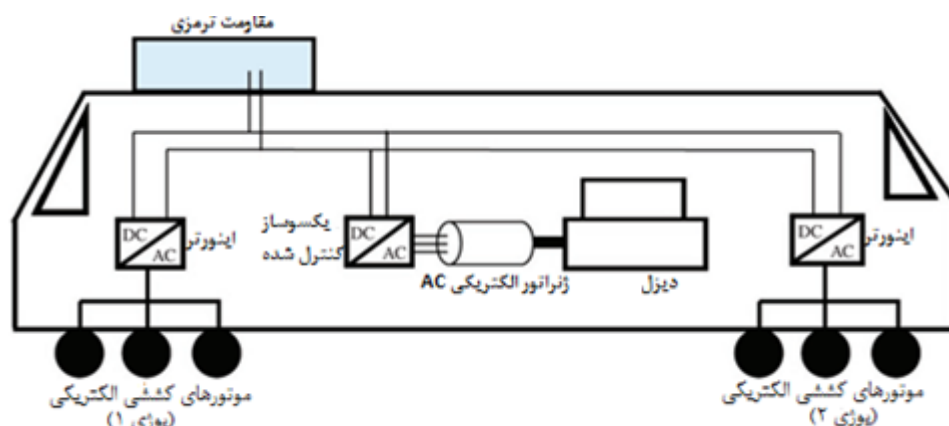
۱-۲-۳ ساختار لوکوموتیوهای دیزل-الکتریک

شکل ۱-۲ نمونه کلاسیک مجموعه انتقال قدرت یک لوکوموتیو مانور دیزل-الکتریک را نشان می‌دهد که شامل موتور دیزل، ژنراتور، اینورتر برق اصلی و سیستم مقاومت کششی^۲ است.

در ساختار دیزل-الکتریک مرسوم به دلیل عدم استفاده از ذخیره‌کننده انرژی، انرژی ترمزی به صورت انرژی گرمایی در مقاومت‌های تعبیه شده در لوکوموتیو تلف می‌شود. این نوع وسایل نقلیه برای حمل‌ونقل بارهای سنگین مثل کشتی‌ها روی خطوط غیربرقی استفاده می‌شود.

¹ Rechargeable energy system source

² Crowbar resistive system



شکل ۱-۲: لوکوموتیو دیزل-الکتریک

به طور کلی لوکوموتیوهای مانوری به دو گروه تقسیم بندی می شوند: لوکوموتیوهای مانوری سبک و سنگین. لوکوموتیوهای مانوری سنگین در محوطه ها کار کرده و معمولاً واگن های قطار با بار سنگین را جابه جا می کنند. لوکوموتیوهای مانوری سبک نزدیک ایستگاه های راه آهن های صنعتی برای برداشتن یا گذاشتن واگن ها فعالیت می کنند.

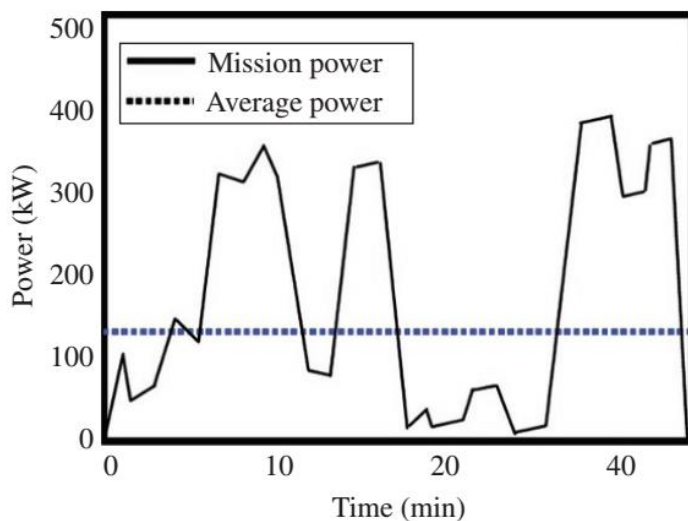
یکی از نکات مهمی که در مورد لوکوموتیوهای مانوری دیزل-الکتریک باید مدنظر داشت این است که آن ها به صورت تصادفی با توان پایین موتور دیزلی کار می کنند. در این لوکوموتیوها موتور دیزل اکثر اوقات بی بار و در توان پایین با پیک های توان بالای کوتاه است. این امر منجر به مصرف سوخت مخصوصاً بالاتر، بازده کمتر و در نتیجه مصرف سوخت و آلودگی بیشتر می گردد. شکل ۱-۳ پروفیل توان واقعی موتور دیزلی را بر روی یک لوکوموتیو مانوری دیزل-الکتریک سنگین و هیستوگرام عملکرد دیزل ژنراتور را نشان می دهد. حتی اگر پیک توان ۵۷۰ کیلووات در نظر گرفته شود، میانگین توان کم (۲۰۰ کیلووات) است. این نکته را باید در نظر داشت که حتی اگر در اکثر اوقات توان پایین مورد نیاز باشد ولی اندازه موتور دیزلی باید به اندازه حداکثر پیک توان مورد نیاز طراحی شود. این موضوع منجر به عملکرد غیر بهینه موتور دیزل و آلودگی زیاد می شود.

برای جلوگیری از عملکرد غیر بهینه ذاتی لوکوموتیوهای مانوری می توان از یک سیستم منبع انرژی (ESS)^۲ on-board با اضافه کردن یک منبع انرژی دیگر مثل باتری یا ابرخازن یا هر دو به سیستم پیشران، استفاده کرد. شکل ۱-۴ یک لوکوموتیو مانوری دیزل-الکتریک هیبرید سری را نشان می دهد که در آن دو ESS توسط مبدل ها به باس DC مشترک متصل اند. ابرخازن توان مورد نیاز boosting و باتری به همراه موتور دیزل، انرژی متوسط مورد نیاز را فراهم می سازد. هدف اصلی این

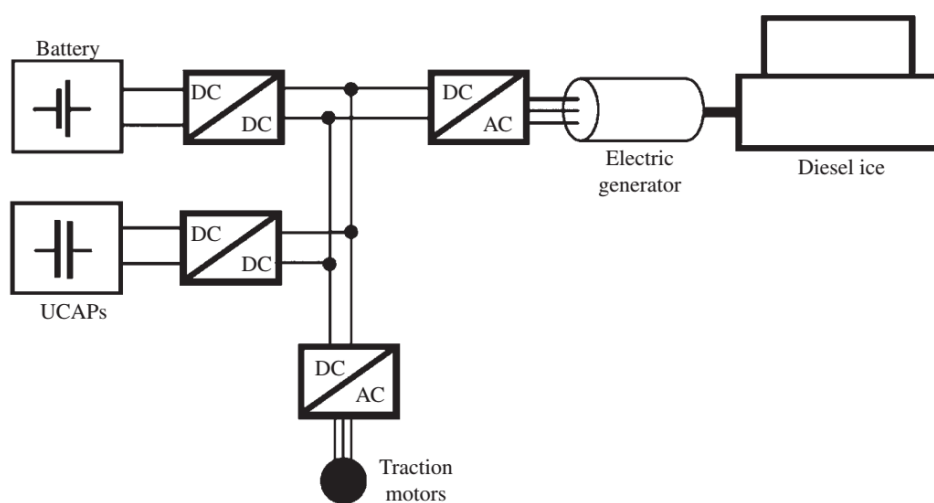
^۱ Specific fuel consumption

^۲ Energy system source

ساختار پیشرانه کوچک تر کردن اندازه دیزل ژنراتور است.



شکل ۳-۱: هیستوگرام عملکرد دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو



شکل ۳-۴: سیستم پیشرانه سری-هیبرید در لوکوموتیو مانوری Green Goat

۳-۱ آمار لوکوموتیوهای مانوری داخلی و مشخصات فنی و انواع آنها

۱-۳-۱ مقدمه

یکی از کاربردهای وسیع لوکوموتیوهای مانوری، در صنعت حمل و نقل ریلی کشور است. لذا

به منظور ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریکی به هیبریدی، لازم است آماری از تعداد لوکوموتیوهای کشور که در شرایط مانور مشغول به فعالیت می باشند، استخراج شود. لازم به ذکر است که عمر لوکوموتیوهای مورد استفاده در حمل و نقل ریلی کشور بالا بوده و طبق آماری که شرکت راه آهن منتشر نموده و در جدول ۱-۱ آورده شده است، در حدود ۴۵٪ از لوکوموتیوهای موجود بالغ بر ۴۰ سال در سیستم ریلی کشور مورد استفاده قرار گرفته اند. لذا با توجه به بالا بودن عمر لوکوموتیوهای مانوری، هیبریداسیون می تواند بازسازی مناسبی برای لوکوموتیوهای از رده خارج باشد. به علاوه در کاهش مصرف سوخت نیز تأثیر قابل توجهی خواهد داشت. در جدول ۱-۱ تعداد لوکوموتیوهای شرکت راه آهن (غیراجاره ای و غیرخصوصی)، بر اساس طبقه بندی سنی تا سال ۱۳۹۵ مشخص شده است. میانگین تعداد لوکوموتیوهای مانوری در سرویس در سال های ۱۳۸۷-۱۳۹۶ نیز توسط شرکت راه آهن منتشر شده و در جدول ۲-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۱ تعداد لوکوموتیوهای شرکت راه آهن بر اساس طبقه بندی سنی [۲]

تاریخ ساخت	در گردش	درصد
۱۳۹۴-۱۳۹۵	۴۰	۷/۴
۱۳۸۹-۱۳۹۳	۹۶	۱۷/۷
۱۳۸۴-۱۳۸۸	۲۹	۵/۳
۱۳۷۹-۱۳۸۳	۱۵	۲/۸
۱۳۷۴-۱۳۷۸	۰	۰/۰
۱۳۶۹-۱۳۷۳	۴۳	۷/۹
۱۳۶۴-۱۳۶۸	۰	۰/۰
۱۳۵۹-۱۳۶۳	۷۷	۱۴/۲
قبل از سال ۵۹	۲۴۳	۴۴/۸
جمع کل	۵۴۳	۱۰۰

جدول ۲-۱ میانگین تعداد لوکوموتیو مانوری در سرویس [۳] و [۴]

میانگین تعداد لوکوموتیو	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶
	۸۵	۸۸	۹۱	۹۳	۹۴	۹۷	۹۸	۹۵	۹۱	۸۹	۹۱	۹۴

												مانوری در سرویس
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--------------------

۱-۳-۲ آمار لوکوموتیو مانوری در راه آهن جمهوری اسلامی ایران

با توجه به آماری که راه آهن جمهوری اسلامی ایران در ۶ ماهه اول سال ۱۳۹۷ منتشر نموده است، می توان گفت که ۱۲ نوع لوکوموتیو مختلف در حال حاضر در سیستم حمل و نقل ریلی و با کاربرد مانوری موجود است. در جدول ۱-۳ و جدول ۱-۴ میانگین روزانه تعداد لوکوموتیوهای در گردش و تعداد لوکوموتیوهای در سرویس در ۶ ماهه اول سال ۹۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تعداد لوکوموتیوهای در گردش، درواقع مجموع وسایل نقلیه ریلی در سرویس، منتظر سرویس و تحت تعمیر کوتاه مدت است و همچنین منظور از تعداد لوکوموتیوهای در سرویس، آن دسته از وسایل نقلیه ریلی می باشد که عملاً در حال کار می باشند [۵].

جدول ۱-۳: میانگین روزانه تعداد لوکوموتیو در گردش نیمه اول سال ۹۷ (در تمام کارکردهای مانوری، باری و مسافری) [۵]

نوع لوکوموتیو	قدرت موتور (HP)	تعداد کل سال ۹۶	فروردین ۹۷	اردیبهشت ۹۷	خرداد ۹۷	تیر ۹۷	مرداد ۹۷	شهریور ۹۷
G-8	۹۶۰	۱۴	۹	۹	۹	۹	۹	۹
G-12	۱۴۲۵	۱۱۸	۷۱	۷۰	۶۹	۶۹	۷۰	۷۰
HD-10	۱۰۵۰	۳۷	۲۱	۲۰	۱۹	۱۹	۲۰	۲۰
G-16	۱۹۶۰	۲۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
G-18	۱۱۰۰	۲	۲	۲	۲	۲	۱	۲
G-22	۱۶۵۰	۳۸	۱۹	۱۹	۲۰	۲۰	۲۱	۲۱
GT-26 CW	۳۳۰۰	۲۳۸	۲۰۱	۲۰۲	۱۹۹	۱۹۵	۱۹۷	۱۹۳
GT-26 CW-p (متعلق به بخش خصوصی)	۳۳۰۰	۷۹	۶۷	۶۴	۶۴	۶۲	۶۲	۶۲
RC-4	۴۶۸۰	۸	۵	۵	۵	۵	۶	۶
GE	۳۲۵۰	۶۱	۴۴	۴۳	۴۳	۴۳	۴۱	۴۳
AD43C	۴۳۰۰	۹۹	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۶
DF8BI-1 (متعلق به بخش خصوصی)	۵۱۷۴	۳۱	۲۰	۲۱	۲۰	۱۹	۱۹	۱۹
DF8BI-2 (متعلق به بخش خصوصی)	۵۱۷۴		۹	۸	۷	۷	۸	۸
ER24PC	۲۴۰۰	۱۵۰	۱۳۴	۱۱۶	۱۰۹	۱۲۳	۱۳۱	۱۲۸

۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳۵۵۰	CDN10 (متعلق به بخش خصوصی)
۱	۱	۱	۲	۰	۰	...		چینی پرس
۱	۱	۱	۱	۰	۰			چینی سیون ترابر
۱	۱	۱	۱	۰	۰	...		مپنا GT 26
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰		رومانی اجاره‌ای
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۲۶۴۰	DE 626
	۶۳۶	۶۲۴	۶۱۷	۶۲۷	۶۴۸			جمع

اطلاعات ذیل از طریق سیستم ثبتی روزانه دیزل‌ها جمع‌آوری شده است. همان‌طور که در جدول ۱-۴ مشخص است، ۱۲ نوع لوکوموتیو مانوری در سیستم حمل‌ونقل ریلی موجود است که از این بین لوکوموتیوهای G12 بیشترین سهم را داشته و پس از آن لوکوموتیوهای HD-10 و G22 و GT-26 و GE و G-8 به ترتیب کاربرد بیشتری در شرایط مانور دارند.

جدول ۱-۴: میانگین روزانه تعداد لوکوموتیوهای در سرویس (به تفکیک نوع) در سال ۱۳۹۷ [۵]

ماه						نوع لوکوموتیو و سرویس‌دهی	
فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مانوری	
۹	۸	۹	۸	۹	۸	G-8	
۰	۰	۰	۱	۱	۰	G-16	
۲	۲	۲	۱	۱	۲	G-18	
۲۰	۲۰	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	HD-10	
۱۲	۱۱	۱۲	۱۲	۱۳	۱۳	G-22	
۹	۹	۹	۹	۸	۹	GE	
۹	۱۲	۱۰	۱۰	۹	۸	GT-26 CW	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	مپنا GT-26	
۲	۰	۰	۱	۱	۰	GT-26 CW-p	
۶۲	۶۱	۵۸	۵۵	۶۱	۶۰	G-12	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	CDN10	
۱۲۵	۱۲۳	۱۱۸	۱۱۶	۱۲۲	۱۲۱	جمع	
							باری
۴	۴	۴	۴	۳	۳	G-12	
۴	۳	۳	۳	۳	۳	G-22	
۱۵۰	۱۴۳	۱۴۶	۱۵۲	۱۶۰	۱۵۴	GT-26 CW	
۵۸	۵۴	۵۴	۵۰	۵۰	۵۱	GT-26 CW-p	
۳	۳	۴	۴	۵	۵	RC-4	
۳۰	۲۹	۲۸	۲۸	۲۷	۲۹	GE	

۳۹	۳۷	۳۸	۳۸	۳۷	۳۸	AD-43C	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	ER 24 PC	
۱۴	۱۵	۱۵	۱۶	۱۷	۱۶	DF 8 BI-1	
۶	۶	۶	۵	۶	۸	DF 8 BI-2	
۱	۱	۱	۱	۰	۰	چینی پرس	
۱	۱	۱	۰	۰	۰	چینی سیون تراپر	
۱	۱	۱	۱	۰	۰	مپنا GT-26	
۱	۲	۲	۲	۲	۲	CDN 10	
۳۰۹	۳۱۰	۳۰۳	۳۰۲	۲۹۹	۳۱۳	جمع	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	G-12	مسافری
۳	۲	۲	۳	۲	۲	G-22	
۶	۵	۱۰	۲۰	۲۷	۲۱	GT-26 CW	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	GT-26 CW-P	
۱	۱	۱	۱	۲	۲	RC-4	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	GE	
۱۲۰	۱۲۳	۱۱۵	۹۵	۱۰۱	۱۲۹	ER24PC	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	DF8BI-2	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	AD-43C	
۱۲۹	۱۳۲	۱۲۸	۱۱۹	۱۳۲	۱۵۴	جمع	

با توجه به آماری که توسط شرکت راه آهن منتشر شده است، لوکوموتیوهای G-8، G16 و G-18 و HD-10 فقط در گروه لوکوموتیوهای مانوری دسته بندی شده اند ولی سایر لوکوموتیوهای جدول ۱-۴ علاوه بر مانوری در حوزه باری و مسافری نیز کاربرد دارند. با استفاده از اطلاعات جدول ۱-۴، در جدول ۱-۵ الی جدول ۱۱-۱ لوکوموتیوهایی که در حوزه مانور، باری و مسافری باری کاربرد مشترک دارند، دسته بندی شده و حوزه های که لوکوموتیو مورد نظر در آن بیشترین کاربرد را دارد با خط چین قرمز مشخص شده است.

جدول ۱-۵: کاربرد لوکوموتیو G-12 در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری

ماه						لوکوموتیو G12
شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	
۶۰	۶۱	۵۵	۵۸	۶۱	۶۲	مانوری

باری	۴	۴	۴	۴	۳
مسافری	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۶-۱: کاربرد لوکوموتیو G-22 در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری

لوکوموتیو G-22	ماه					
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مانوری	۱۲	۱۱	۱۲	۱۲	۱۳	۱۳
باری	۴	۳	۳	۳	۳	۳
مسافری	۲	۲	۳	۲	۲	۳

جدول ۷-۱: کاربرد لوکوموتیو GT-26 CW در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری

لوکوموتیو GT-26CW	ماه					
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مانوری	۹	۱۲	۱۰	۱۰	۹	۸
باری	۱۵۰	۱۴۳	۱۴۶	۱۵۲	۱۶۰	۱۵۴
مسافری	۲۱	۲۷	۲۰	۱۰	۵	۶

جدول ۸-۱: کاربرد لوکوموتیو GE در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری

لوکوموتیو GE	ماه					
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مانوری	۹	۹	۹	۹	۸	۹
باری	۳۰	۲۹	۲۸	۲۸	۲۷	۲۹
مسافری	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۹-۱: کاربرد لوکوموتیو GT-26 CW-p در هر سه حوزه مانوری، باری، مسافری

ماه	
-----	--

لوکوموتیو GT-26CW-p	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مانوری	۲	۰	۰	۱	۱	۰
باری	۵۸	۵۴	۵۴	۵۰	۵۰	۵۱
مسافری	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۰-۱: کاربرد لوکوموتیو GT-26 در دو حوزه مانوری، باری

لوکوموتیو مپنا GT-26	ماه					
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مانوری	۰	۰	۰	۰	۰	۰
باری	۰	۰	۱	۱	۱	۱

جدول ۱۱-۱: کاربرد لوکوموتیو CDN 10 در دو حوزه مانوری، باری

لوکوموتیو CDN10	ماه					
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
مانوری	۰	۰	۰	۰	۰	۰
باری	۲	۲	۲	۲	۲	۱

شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران، هرساله آمار و اطلاعاتی مرتبط با لوکوموتیوهای در سرویس، واگن ها، تناژ بار حمل شده و مسافت آن و ... منتشر می کند که می تواند مبنایی برای مقایسه عملکرد و شرایط موجود باشد. طبق گزارش ها سال ۹۶ و ۹۴ شرکت راه آهن تنها چهار نوع لوکوموتیو را به عنوان لوکوموتیو مانوری معرفی نموده که آمار آن در جدول ۱۲-۱ و

جدول ۱۳-۱ ارائه شده است [۳] و [۴].

جدول ۱۲-۱: میانگین آمار لوکوموتیوهای مانوری شرکت راه آهن در اسفند ۱۳۹۶ [۴]

نوع لوکوموتیو	تعداد کل	در گردش (اسفند ۹۶)	در سرویس (اسفند ۹۶)	تحت تعمیر (اسفند ۹۶)	متوقف در بازسازی (اسفند ۹۶)	متوقف در کارخانه اساسی (اسفند ۹۶)	متوقف در بافق، آپرین و ... (اسفند ۹۶)
G-8	۱۴	۹	۸	۱	۵	۰	۰
G-12	۱۱۸	۶۹	۶۵	۴	۳۲	۱۴	۳
G-18	۲	۲	۲	۰	۰	۰	۰
HD-10	۳۷	۲۱	۲۰	۱	۷	۹	۰

جدول ۱۳-۱: میانگین آمار لوکوموتیوهای مانوری شرکت راه آهن در اسفند ۱۳۹۴ [۳]

نوع لوکوموتیو	تعداد کل	در گردش (اسفند ۹۶)	در سرویس (اسفند ۹۶)	تحت تعمیر (اسفند ۹۶)	متوقف در بازسازی (اسفند ۹۶)	متوقف در کارخانه اساسی (اسفند ۹۶)	متوقف در بافق، آپرین و ... (اسفند ۹۶)
G-8	۱۴	۹	۸	۱	۴	۱	۰
G-12	۱۱۸	۷۰	۶۶	۴	۳۸	۷	۳
G-18	۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰
HD-10	۳۷	۱۹	۱۸	۱	۶	۱۱	۱

مشاهده می‌شود که تحت بهره‌برداری مانوری، لوکوموتیو G-12 بیشترین تعداد لوکوموتیو در گردش را دارد، با این وجود تعداد لوکوموتیو G-12 در حال تعمیرات سبک و سنگین نیز نسبت به سایر لوکوموتیوها بیشتر است. مطابق آمار جدول ۱۲-۱ که در اسفند ۹۶ منتشر شده، در حدود ۴۵٪ از لوکوموتیوهای G-12 در حال تعمیر بوده‌اند که به نوبه خود سهم قابل توجهی است و یکی از دلایل آن می‌تواند قدیمی بودن این قبیل لوکوموتیوها باشد. شاید بتوان با هیبرید نمودن این نوع لوکوموتیوهای دیزلی، از میزان توقف و تعمیرات آن‌ها کاست.

۳-۳-۱ مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری

لوکوموتیو G-12

این نوع لوکوموتیو به منظور حمل قطار و جایگزینی برای لوکوموتیوهای بخاری بین سال‌های ۱۳۳۵ تا ۱۳۴۱ به ناوگان راه‌آهن ایران پیوست و ۱۳۷ دستگاه از این نوع لوکوموتیو در سه مرحله از کشور آمریکا خریداری شد.

این لوکوموتیو از نوع ۴ محوره و سبک می‌باشد و روی آن یک دستگاه موتور دیزلی ۱۲ سیلندر V شکل خورجینی مدل C567 نصب شده است. در انتهای دیزل از یک دستگاه ژنراتور مدل D-12 استفاده شده که برق تولیدی آن از نوع DC بوده و به مصرف چهار دستگاه موتور کششی مدل D-47B می‌رسد. این لوکوموتیو دارای دو بوژی^۱ دو محوره می‌باشد که بر روی هر کدام دو موتور کششی مدل D-47-B نصب شده است. برای تأمین برق فشار ضعیف و تحریک ژنراتور اصلی و شارژ باتری و سایر مصرف‌کننده‌های فشار ضعیف، از یک دستگاه ژنراتور کمکی DC مدل A-7159 و توان ۱۰KW استفاده شده است. قدرت موتور ۱۴۲۵ اسب بخار است. در شکل ۵-۱ نمایی از لوکوموتیو G-12 ارائه شده است [۶] و [۷].

^۱ بوژی به سیستم حرکتی (ناقله) واگن گفته می‌شود و متشکل از قاب (تیرهای طولی و عرضی)، مجموعه فنربندی (تعلیق)، مجموعه چرخ و محور، مجموعه ترمز و ادوات مربوطه می‌باشد. بوژی ضمن توزیع یکنواخت وزن واگن روی خط باعث سهولت در گردش واگن هنگام عبور از قوس، ایمنی سیر، سهولت در مبادله واگن بین راه‌آهن‌های با عرض خط مختلف، افزایش ظرفیت بارگیری واگن در بار محوری ثابت می‌شود.



شکل ۵-۱: تصویری از لوکوموتیو G-12

لوکوموتیو G-8

لوکوموتیوهای G-8 از سال ۱۳۳۶ برای عملیات مانور در راه آهن ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوع لوکوموتیو ۴ محوره بوده و از نظر مشخصات تقریباً شبیه لوکوموتیوهای G-12 است. دارای یک دستگاه موتور دیزلی ۸ سیلندر مدل VC576 تک بلووری است. ژنراتور آن DC و مدل 15-D و موتور کششی آن مدل 37-D است. این نوع لوکوموتیو فاقد ترمز دینامیک و تجهیزات مربوط به آن است. در این لوکوموتیو قدرت موتور ۹۶۰ اسب بخار است. در شکل ۶-۱ نمای از لوکوموتیو G-8 ارائه شده است [۶] و [۷].



شکل ۶-۱: تصویری از لوکوموتیو G-8

لوکوموتیو G-16

این نوع لوکوموتیو از نوع ۳ محوره و دارای طول و وزن و قدرت بیشتری نسبت به مدل‌های قبلی است که از سال ۱۳۳۶ به‌مرور تعداد ۲۰ دستگاه از این مدل لوکوموتیو به راه آهن ایران راه یافت. این

لوکوموتیوها دارای یک دستگاه موتور ۵۴۶C شانزده سیلندر با مشخصات لوکوموتیوهای G-12 است که در آن از یک دستگاه ژنراتور اصلی DC مدل D-12-L استفاده شده است. لوکوموتیو مذکور دارای شش دستگاه موتور کششی مدل D-47 می باشد و بقیه مشخصات آن شبیه لوکوموتیوهای G-12 است. در این لوکوموتیو قدرت موتور ۱۹۶۰ اسب بخار است. در شکل ۷-۱ نمایشی از لوکوموتیو G-16 ارائه شده است [۶] و [۷].



شکل ۷-۱: تصویری از لوکوموتیو G-16

لوکوموتیو G-18

این نوع لوکوموتیو در سال ۱۳۴۲ وارد ناوگان حمل و نقل ریلی گردید. دارای موتور دیزلی هشت سیلندر 645E و یک دستگاه ژنراتور DC مدل D-25 و چهار دستگاه موتور کششی مدل D-75 می باشد. تعداد این لوکوموتیوها ۲ دستگاه می باشد. در این لوکوموتیو قدرت موتور ۱۱۰۰ اسب بخار است. نمایشی از لوکوموتیو G-18 در شکل ۸-۱ ارائه شده است [۶] و [۷].



شکل ۸-۱: تصویری از لوکوموتیو G-18

لوکوموتیو G-22

این نوع لوکوموتیو ۴ محوره بوده که از سال ۱۳۵۴ به ناوگان حمل و نقل ریلی ایران وارد شده است

و به دیزل‌های سبک (شمالی) مشهور می‌باشند. این نوع لوکوموتیوها دو مدل بوده که یک گروه ساخت کشور آمریکا و در سال ۱۳۵۳ و گروه دوم ساخت کشور یوگوسلاوی و در سال ۱۳۶۰ خریداری شده‌اند. در حال حاضر ۳۸ دستگاه از این نوع لوکوموتیو در راه‌آهن کشور موجود است. این نوع لوکوموتیو مجهز به یک دستگاه موتور دیزل دوازده سیلندر V شکل خورجینی مدل 645E است. در قسمت عقب دیزل، انتهای میل‌لنگ از طریق فلاپیول به یک دستگاه ژنراتور اصلی مدل D-25-P از نوع DC کوپل شده و آن را به گردش درمی‌آورد. برق تولیدی این ژنراتور به مصرف چهار دستگاه موتور کششی مدل D77 می‌رسد. در بالای ژنراتور اصلی و بر روی شاسی، یک دستگاه ژنراتور کمکی مدل A-8102 با توان ۱۸KW از نوع DC نصب شده است که وظیفه تولید برق با ولتاژ پایین جهت شارژ باتری‌ها و تحریک ژنراتور اصلی و سایر مصرف‌کننده‌های فشار ضعیف را بر عهده دارد. در این لوکوموتیو قدرت موتور ۱۶۵۰ اسب بخار است. در شکل ۹-۱ نمایی از لوکوموتیو G-22 نشان شده است [۶] و [۷].



شکل ۹-۱: تصویری از لوکوموتیو G-22

لوکوموتیوهای GT-26-CW

• آمریکایی

سری اول لوکوموتیوهای EMD GT26CW ساخت آمریکا بوده که در سال ۱۹۷۱ وارد ایران شدند. این سری از لوکوموتیوها، اولین لوکوموتیوهای شش محوره سنگین با ۱۲۰ تن وزن بودند که دارای موتورهای ۱۶ سیلندر مدل E3645 16 و قدرت ۳۰۰۰ اسب بخار می‌باشند. تعداد این لوکوموتیوها ۷۰ عدد است که تاکنون نیز در راه‌آهن ایران کاربرد بسیاری در حمل بار دارد و پس از حدود ۴۸ سال فعالیت طاقت‌فرسا، روزانه رقمی در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلومتر سیر دارند.

• کانادایی

در سال ۱۹۸۴ و زمانی که شرکت جنرال موتورز آمریکا به دلیل اجرای تحریم‌ها علیه ایران، از

فروش لوکوموتیو و قطعات یدکی امتناع ورزید، راه آهن ایران موفق شد تعداد ۶۰ دستگاه لوکوموتیو GT26CW2 را از کمپانی GMDL کشور کانادا خریداری نماید.

• کره‌ای

در سال ۱۹۸۵ راه آهن ایران ۲۰ دستگاه لوکوموتیو GT26CW-2A مجهز به دیزل E3B 64516 را از شرکت هیوندای کره جنوبی خریداری کرد.

این نوع لوکوموتیو دارای دیزل ۱۶ سیلندر V شکل خورجینی مدل 645E3645، E3B است. میل‌لنگ عقب دیزل به یک مجموعه ژنراتور مدل AR-10A5-DI4 و یا AR-10A5-D18 که شامل دو ژنراتور اصلی و همراه است، کوپل شده و آنان را به گردش درمی‌آورد. برق تولیدی ژنراتور اصلی AC بوده و توسط یکسوکننده به صورت برق مستقیم درآمده و در ۶ دستگاه موتور کششی مدل D77B (که بر روی دو دستگاه بوژی نصب گردیده‌اند) مصرف می‌گردد.

ژنراتور همراه کمکی نیز AC بوده و برای الکتروموتور پروانه خنک‌کننده رادیاتور، موتور مکنده و همچنین پس از یکسو شدن برای تحریک میدان ژنراتور اصلی استفاده می‌شود.

یک دستگاه ژنراتور کمکی DC مدل A-8102 با توان ۱۸KW و یا از نوع AC مدل A-8147 با توان ۱۸KW نیز با دیزل مرتبط بوده که جهت تولید برق با ولتاژ پایین برای شارژ باتری‌ها و تحریک ژنراتور همراه و روشنایی و سایر مصارف فشار ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱۰-۱ نمایشی از لوکوموتیو GT26CW ارائه شده است [۶] و [۷].



شکل ۱۰-۱: تصویری از لوکوموتیو GT26CW

لوکوموتیو HD-10C

این لوکوموتیو ساخت شرکت هیتاچی ژاپن بوده و تعداد ۳۷ دستگاه در شرکت راه آهن ایران موجود است. این نوع لوکوموتیو ۴ محوره بوده و از دیزل ۱۲ سیلندر D-398-TA با قدرت ۱۰۵۰ اسب

بخار در آن استفاده شده است که ساخت شرکت کاترپیلار آمریکا است. در این لوکوموتیو قدرت موتور ۱۰۵۰ اسب بخار است [۶] و [۷].

۱-۳-۳-۱ لوکوموتیوهای GE

این نوع لوکوموتیو ساخت شرکت جنرال الکتریک کانادا و در دو مدل GE U30 و GE C30-7i، ۶ محوره و مجهز به دیزل ۱۲ سیلندر چهارزمانه خورجینی FDL7 است. لوکوموتیوهای GE U30 در سال ۱۳۷۱ و به تعداد ۳۳ دستگاه وارد ناوگان کشش شدند و لوکوموتیوهای GE C30-7i در سال ۱۳۷۲ و به تعداد ۲۹ دستگاه از کشور کانادا خریداری شدند. در این لوکوموتیو قدرت موتور ۳۲۵۰ اسب بخار است [۶] و [۷].

در جدول ۱-۱۴ مشخصات فنی تمام لوکوموتیوهای کاربردی در مانور ارائه شده است.

جدول ۱۴-۱ مشخصات فنی لوکوموتیوهای کاربردی در مانور [۵] و [۶]

نوع لوکوموتیو	نوع دیزل	توان (bHP)	نوع ژنراتور	تعداد موتور کششی	نوع موتور کششی	آرایش محورها	تعداد تولیدشده	سازنده	وزن long) (ton	سال ساخت	تعداد در ایران (مانور، باری، مسافری)
G-12	۱۲ سیلندر V شکل خورجینی مدل C567	۱۴۲۵	DC مدل D-12	۴	DC D- مدل 47B	BO-BO	۶۷۰	and General Motor Electro-Motive Division (USA)	۱۰۷	۱۹۶۸- ۱۹۵۳	۱۱۸
							۳۰۰	General Motors Diesel (Canada)			
							۶۶	Clyde Engineering (Australia)			
G-8	۸ سیلندر مدل VC576 تک بلووری	۸۷۵	DC مدل D-15	۴	DC D- مدل 37	BO-BO	۳۸۲	and General Motors Electro-Motive Division (USA)	۶۶.۲	۱۹۶۵- ۱۹۵۴	۱۴
G-16	۱۶ سیلندر مدل 567C	۱۸۰۰	DC مدل D-12-L	۶	DC D- مدل 47	CO-CO	-----	Electro-Motive- Diesel General Motors Diesel Clyde Engineering MACOSA	۱۰.۶	----- -----	۲۰
G-22	دیزل ۱۲ سیلندر V شکل خورجینی مدل 645E	۱۶۵۰-۱۵۰۰ hp	DC مدل D-25-P	۴	DC D- مدل 77	BO-BO CO-CO	۶۳۵	Electro-Motive Division	۶۹/۹	۱۹۹۱- ۱۹۶۹	۳۸

۲	۱۹۷۸- ۱۹۶۵	---	GM-EMD (Electro-Motive Diesel)	-----	BO-BO A1A-A1A	DC مدل D-75	۴	DC مدل D-25	hp ۱۱۰۰	دیزل ۸ سیلندر مدل 645E	G-18
---	---------------	-----	--------------------------------	-------	------------------	----------------	---	----------------	---------	---------------------------	------

ادامه‌ی جدول (۲-۱۴)

۲۳۸	۱۹۸۸- ۱۹۶۷	۱۲۰ تن	EMD آمریکا	289	CO-CO	DC مدل D77B	۶	AC مدل AR-10A5- D14 و یا AR-10A5- D18	۳۰۰۰/۳۳۰۰ hp	دیزل ۱۶ سیلندر V شکل خورجینی مدل E3B, 645E3645	GT-26CW
۳۷	-----	-----	هیتاچی ژاپن	---	BO-BO	-----	-----	-----	hp ۱۰۵۰	دیزل ۱۲ سیلندر دو زمانه مدل D-398-TA	HD-10C
۶۱	---		جنرال الکتریک کانادا		CO-CO	-----	-----	----	hp ۳۲۵۰	دیزل ۱۲ سیلندر ۴ زمانه خورجینی مدل FDL7	GE (GEU30 و GE C30-7i)

۴-۳-۱ لوکوموتیوهای مانوری در وزارت صنعت و معدن و تجارت

شرکت معدن جو

شرکت معدن جو یکی از شرکت‌های بزرگ در زمینه استخراج زغال سنگ از معادن طبس و داربیدخون در خراسان جنوبی است. طبق مذاکراتی که با آقای رستم‌زاده یکی از کارکنان شرکت معدن جو صورت گرفته، در این مجموعه دو نوع لوکوموتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از آن‌ها لوکوموتیو برقی بوده که با شارژ باتری انرژی حرکتی مورد نیاز تأمین می‌شود و در حدود ۱۹ دستگاه از این نوع لوکوموتیو در مجموعه شرکت معدن جو فعال است. لوکوموتیوهای مذکور ساخت کشور روسیه هستند. نوع دیگری از لوکوموتیوهای مدنظر که در شرکت معدن جو نیز فعال می‌باشند، از نوع دیزل هیدرولیک مدل دیما ساخت آلمان بوده که از پمپ هیدرولیک برای انتقال قدرت به محورها و چرخ‌ها استفاده می‌شود و در حدود ۸ دستگاه از آن در مجموعه فعال است. طبق اظهارات آقای رستم‌زاده لوکوموتیوهای دیما بسیار قدیمی بوده و آلودگی بالایی نیز دارند.

معدن فسفات جیروود (صنایع شهید زین‌الدین)

اطلاعات دریافتی از معدن فسفات جیروت واقع در شمیرانات تهران حاکی از آن است که در حال حاضر چهار عدد لوکوموتیو در مجموعه مذکور به صورت مانور فعالیت دارند. این لوکوموتیوها از نوع برقی بوده و با شارژ باتری کار می‌کنند و در تونل‌ها جهت حمل واگن‌های کوچک مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمر این لوکوموتیوها در حدود ۷ سال بوده و نسبتاً نو می‌باشند. هر دستگاه لوکوموتیو در حدود ۱۰۰ ساعت در ماه کار می‌کند. در پیوست اطلاعات ارسال شده از سوی شرکت صنایع شهید زین‌الدین در پاسخ به نامه ارسالی از سوی پژوهشگاه (درخواست ارسال اطلاعات) ارائه شده است.

معدن منگنز

اطلاعات دریافتی از معادن منگنز و نارچ بیانگر وجود ۱۲ عدد لوکوموتیو مانوری در مجموعه بوده که ۱۰ عدد آن از نوع لوکوموتیو دیما است. این لوکوموتیوها در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۸۶ مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. هر دستگاه در ماه به طور میانگین در حدود ۱۵۰ ساعت کار می‌کند. در پیوست سایر اطلاعات ارسال شده از سوی شرکت مربوطه ارائه شده است.

۵-۳-۱ لوکوموتیو مانوری در صنایع پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران

به‌طور کلی چهار روش برای انتقال نفت وجود دارد که از جمله آن می‌توان به کشتی‌های نفتکش، خط

لوله، تانکرهای ریلی^۱ و جاده‌پیما^۲ اشاره نمود. تانکرهای جاده‌پیما بیشتر برای انتقال نفت یا فرآورده‌های آن در مسیرهای کوتاه و با حجم کم کاربرد دارد. در صورتی که تانکرهای ریلی برای مسیرهای طولانی‌تر و با حجم بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور نمونه ظرفیت تنها یک تانکر مدل DOT-111 در حدود ۳۴۵۰۰ گالون آمریکا است که با اتصال واگن‌ها به یکدیگر لوکوموتیوهایی با توان بالا جهت حمل محموله به پالایشگاه یا ... مورد نیاز خواهد بود. یک نمونه تانکر ریلی جهت حمل محموله نفتی اعم از نفت خام، گاز مایع، فرآورده‌های پالایشگاهی در شکل ۱۱-۱ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه حمل‌ونقل ریلی و تجهیزات مرتبط با آن در صنایع نفتی نیز کاربرد دارد، لذا انتظار می‌رود عملیات مانور برای جابه‌جایی تانکرها در محوطه صورت بگیرد. لذا لازم است اطلاعاتی شامل تعداد، نوع و مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری به‌کاررفته در صنعت نفت و پتروشیمی کشور نیز جمع‌آوری شود. بدین ترتیب مکاتبات لازم با شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران و شرکت ملی صنایع پتروشیمی جهت دسترسی به اطلاعات مذکور صورت گرفته است.



شکل ۱۱-۱: تانکر ریلی جهت حمل محموله نفتی

۱-۳-۶ شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی

با توجه به مکاتباتی که با شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی صورت گرفت، درخواست گردید که اطلاعات مربوط به تعداد و مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری به‌کاررفته در مجموعه شرکت مورد نظر در اختیار پژوهشگاه نیرو قرار بگیرد، ولی درعین حال مشخص گردید که شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران به فراخور نیازهای عملیاتی خود از لوکوموتیوهای مانوری تحت مالکیت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران در ترمینال‌های نفتی ماهشهر، مشهد، نکا، تبریز، اصفهان و اراک بهره می‌برد که شرکت راه‌آهن مالکیت لوکوموتیوهای مورد بهره‌برداری را در اختیار دارد.

¹ Rail Tank Car

² Tank Truck

در پیوست نامه‌ای که از طرف شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی در پاسخ به درخواست پژوهشگاه نیرو (ارسال آمار و مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری) دریافت گردید، ارائه شده است.

۱-۳-۷ لوکوموتیو مانوری در صنعت پتروشیمی

با توجه به مکاتبه‌ای که با شرکت ملی صنایع پتروشیمی، صورت گرفت، درخواست گردید که اطلاعات مربوط به تعداد و مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری به‌کاررفته در مجموعه شرکت موردنظر در اختیار پژوهشگاه نیرو قرار بگیرد، ولی شرکت مذکور در نامه‌ای اعلام نمودند که لوکوموتیو مانوری در مجموعه پتروشیمی موجود نمی‌باشد. در پیوست نامه‌ای که از طرف شرکت ملی صنایع پتروشیمی در پاسخ به درخواست پژوهشگاه نیرو (ارسال آمار و مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری) دریافت گردید، ارائه شده است.

۴-۱ برآورد مصرف سوخت، رژیم کاری، بازدهی لوکوموتیوهای مورد بررسی

پس از انجام مکاتبات و استعلام‌های مربوطه با شرکت‌ها، سازمان‌ها و نهادهایی که از لوکوموتیو مانوری در کشور استفاده می‌کنند، به‌غیر از شرکت راه‌آهن، پاسخ مناسب و قابل اتکایی (که مفید باشند) از بقیه مراکز جهت همکاری دریافت نشد. البته با در نظر گرفتن این نکته که شرکت راه‌آهن را می‌توان اصلی‌ترین و شاید تنها بهره‌بردار عمده لوکوموتیو مانوری از نوع دیزل-الکتریک در کشور دانست اطلاعات ارسالی آن شرکت برای مطالعات آتی بسیار مفید خواهد بود.

در جدول ۱-۱۵ میزان عملکرد (سیکل کاری) یک لوکوموتیو مانوری G12 نمونه در طی روز و در دنده های مختلف نشان داده شده است.

همچنین در جدول ۱-۱۶ میزان مصرف سوخت به ازای هر دنده و همچنین توان قابل تامین در هر دنده و مصرف روزانه لوکوموتیو مانوری مربوطه ارائه شده است.

جدول ۱۵-۱ مشخصات سیکل کاری نمونه یک لوکوموتیو مانوری G12 (استعلام از شرکت راه آهن)

مقدار کار روزانه هر دنده در ۲۴ ساعت		
دنده	درصد زمان	ساعت کار
دنده خشی	۵۹/۸	۱۴/۳۵
دنده ۱	۱۲/۴	۲/۹۸
دنده ۲	۱۲/۳	۲/۹۵
دنده ۳	۵/۸	۱/۳۹
دنده ۴	۳/۶	۰/۸۶
دنده ۵	۳/۶	۰/۸۶
دنده ۶	۱/۵	۰/۳۶
دنده ۷	۰/۲	۰/۰۴۸
دنده ۸	۰/۸	۰/۱۹۲

شایان ذکر است که طبق اطلاعات کارشناس مربوطه شرکت راه آهن، این تنها اطلاعات موجود در این زمینه در شرکت راه آهن است و در صورت نیاز به اطلاعات بیشتر نیاز به انجام تحقیقات میدانی خواهد بود. که موضوع کفایت و یا عدم کفایت این داده ها در دو مرحله بعد بررسی خواهد شد و در صورت نیاز اطلاعات جدید با هماهنگی شرکت راه آهن گردآوری می شود.

جدول ۱۶-۱ مشخصات سیکل کاری، میزان مصرف سوخت، توان قابل تامین در دنده‌های مختلف یک لوکوموتیو مانوری G12 (استعلام از شرکت راه آهن)

مقدار مصرف سوخت هر دنده در ۲۴ ساعت				
دنده	ساعت کار (h)	توان (kw)	متوسط (g/kwh)	روزانه (g)
دنده خنثی	۱۴/۳۵	۲۲/۳۸	۲۲۹	۷۳۵۴۴
دنده ۱	۲/۹۸	۵۹/۶۸	۲۲۹	۴۰۷۲۷
دنده ۲	۲/۹۵	۱۶۴/۱۲	۲۲۹	۱۱۰۸۷۱
دنده ۳	۱/۳۹	۲۱۶/۳۴	۲۲۹	۶۸۸۶۳
دنده ۴	۰/۸۶	۳۶۵/۵۴	۲۲۹	۷۱۹۸۹
دنده ۵	۰/۸۶	۴۷۷/۴۴	۲۲۹	۹۴۰۲۷
دنده ۶	۰/۳۶	۶۳۴/۱	۲۲۹	۵۲۲۷۵
دنده ۷	۰/۰۴۸	۷۸۳/۳	۲۲۹	۸۶۱۰
دنده ۸	۰/۱۹۲	۹۳۲/۵	۲۲۹	۴۱۰۰۰
مجموع مصرف سوخت در یک روز کاری (g)				۴۶۲۱۲۲

۵-۱ نتیجه‌گیری

در ابتدای این گزارش به بررسی دسته بندی انواع لوکوموتیوها پرداخته شد. مشاهده شد که لوکوموتیوهای دیزلی از لحاظ نوع موتور دیزل ممکن است دو زمانه و یا چهارزمانه باشند اما از لحاظ سیستم انتقال قدرت عمدتاً به سه نوع دیزل الکتریک، دیزل هیدرولیک و دیزل مکانیک تقسیم‌بندی می‌شوند. در ادامه به بررسی ساختار لوکوموتیوهای نوع دیزل الکتریک که لوکوموتیوهای تحت بررسی در این پروژه هستند پرداخته شد.

لوکوموتیوهای مانوری به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: لوکوموتیوهای مانوری سبک و سنگین. لوکوموتیوهای مانوری سنگین در محوطه‌ها کار کرده و معمولاً واگن‌های قطار با بار سنگین را جابه‌جا می‌کنند. لوکوموتیوهای مانوری سبک نزدیک ایستگاه‌های راه‌آهن‌های صنعتی برای برداشتن یا گذاشتن واگن‌ها فعالیت می‌کنند.

در ادامه به مطالعه آمار شرکت راه آهن پرداخته شد. بر اساس جدول های ارائه شده در این گزارش، لوکوموتیوهای شرکت راه آهن را می توان به سه گروه لوکوموتیوهای مسافری، باری و مانوری دسته بندی نمود. مطابق با آمار و اطلاعات ارائه شده در سالنامه های شرکت راه آهن، به طور کلی ۱۸ نوع لوکوموتیو (مانوری، مسافری، باری) در سیستم راه آهن شناسایی شد که از آن بین، برخی فقط در شرایط مانور کاربرد دارند و برخی بین سه گروه دارای کاربرد مشترک هستند. طبق آمار شرکت راه آهن، لوکوموتیوهای G-8، G-16، G-18 و HD-10 تنها در شرایط مانور مورد بهره برداری قرار می گیرند. لوکوموتیوهای G-12 و G-22 علاوه بر مانور در شرایط مسافری و حمل بار نیز بهره برداری می شوند ولی باید توجه داشت که کاربرد آن ها در شرایط مانور بیشتر است و تعداد کمی از این نوع لوکوموتیو به صورت مسافری و باری بهره برداری می شود. لوکوموتیوهای GE، GT-26CW و GT-26CWp در هر سه حالت مانوری، مسافری و باری کاربرد دارند ولی بیشترین کاربرد آن ها تحت شرایط حمل بار است و تنها تعدادی از آن ها (در حدود ۱۰ عدد) در شرایط مانور مورد بهره برداری قرار می گیرند.

جدول های آماری نشان می دهند که بیشترین تعداد لوکوموتیوهای مانوری به کار رفته در حمل و نقل ریلی کشور، از نوع لوکوموتیوهای G-12 هستند. در حال حاضر در حدود ۱۱۸ دستگاه از این نوع لوکوموتیو در سیستم حمل و نقل ریلی موجود بوده که در حدود ۷۰ دستگاه از آن ها در شرایط مانور و ۴ دستگاه در شرایط حمل بار مورد بهره برداری می باشند و باقی آن ها تحت تعمیر و بازسازی قرار دارند که تعداد آن ها نسبتاً قابل توجه است. قدرت موتور این نوع لوکوموتیو ۱۴۲۵ HP است.

یکی از چالش هایی که در این زمینه مطرح می شود، علت پر کاربرد بودن لوکوموتیو G-12 در شرایط مانور است. در واقع لازم است دلایلی که محبوبیت لوکوموتیو G-12 را در کاربرد مانوری افزایش می دهد، شناسایی شود. لذا در ادامه مشخصات فنی لوکوموتیوهای مانوری ارائه خواهد شد و با بررسی آن ها می توان به علت محبوبیت لوکوموتیو G-12 پی برد.

در ادامه پروژه برای شناسایی آمار لوکوموتیوهای دیزل الکتریک مانوری علاوه بر شرکت راه آهن سعی شد که معادن و صنایع پتروشیمی که احتمال وجود لوکوموتیو دیزل الکتریک مانوری در آن ها وجود داشت نیز مورد بررسی قرار گیرد که در بررسی ها مشخص شد که لوکوموتیوهای مورد استفاده در معادن از نوع شارژی تمام برقی و همچنین دیما دیزل هیدرولیک هستند که با توجه به اینکه پروژه مربوط به لوکوموتیوهای مانوری از نوع دیزل الکتریک می باشد، لذا در آمار تعداد لوکوموتیوهای مانور دیزل الکتریک لحاظ نمی گردد و لوکوموتیوهای پتروشیمی نیز در آمار شرکت راه آهن لحاظ می گردد. در انتهای این بخش نیز به بررسی و ارائه سیکل رانشی ارائه شده توسط شرکت راه آهن پرداخته شد.

فصل ۲ - بررسی تجارب داخلی و جهانی هیبرید سازی
لوکوموتیو

۱-۲ مقدمه

در حال حاضر، اکثر شرکت‌های راه‌آهن دنیا با دو چالش اساسی روبرو هستند. یکی از این چالش‌ها پرداخت هزینه‌ی مربوط به استفاده از سیستم کهنه موتورهای احتراق داخلی قدیمی و دیگری اقدام به توسعه فناوری جدید، می‌باشد. بسیاری از شرکت‌های راه‌آهن در سراسر دنیا اقداماتی را در جهت مدرن کردن ناوگان خود انجام داده تا بتوانند نیازهای زیست‌محیطی از جمله کاهش گازهای آلاینده و همچنین کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی صوتی را پاسخ دهند.

در لوکوموتیوهای هیبرید، معمولاً از یک منبع ذخیره‌ساز انرژی که بین منبع اصلی توان (موتور احتراق داخلی) و سیستم انتقال متصل به چرخ‌ها قرار دارد، استفاده می‌شود. از آنجایی که یک لوکوموتیو دیزل الکتریک تمامی اجزاء یک لوکوموتیو هیبرید سری به‌جز باتری را دارا است، ارتقاء آن به نوع هیبریدی، ساده به نظر می‌رسد. بنابراین در ساده‌ترین حالت می‌توان به‌منظور کاهش آلاینده‌گی و بهبود مصرف سوخت یک لوکوموتیو دیزل الکتریک را به نوع هیبریدی ارتقاء داد.

در این بخش فعالیت‌های انجام‌گرفته داخلی و خارجی در زمینه توسعه لوکوموتیوهای هیبرید مانوری مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در بخش اول به‌مرور فعالیت‌های داخلی و در بخش دوم به بررسی تجربیات و فعالیت شرکت‌های مختلف خارجی از نقاط مختلف جهان پرداخته می‌شود. مطالب ارائه‌شده در این قسمت می‌تواند به‌منظور بررسی سمت‌وسوی این محصول در دنیا بسیار کارگشا باشد.

۲-۲ تجارب داخلی

شاید بتوان لوکوموتیو تولید داخلی را یکی از اولین تجربیات جهانی لوکوموتیو هیبریدی دانست. با همت مهندسان و متخصصان داخل کشور نمونه اولیه‌ی این لوکوموتیو در سال ۱۳۷۹ مورد آزمایش قرار گرفت. در قسمت بعدی به مراحل تولید و ساخت این لوکوموتیو اشاره می‌شود. بیشتر مطالب و اطلاعات این بند، از گزارش دریافتی از مرکز تحقیقات راه‌آهن استخراج شده است. قابل ذکر است که این نمونه لوکوموتیو هیبرید تولیدشده را می‌توان تنها تجربه داخلی در این زمینه برشمرد.

۱-۲-۲ طراحی و ساخت لوکوموتیو نیمه‌صنعتی هیبریدی در ایران

• شرح پروژه

ایده اصلی این پروژه از پروژه خودرو برقی پژو ۴۰۵ که در نمایشگاه بین‌المللی خودرو به نمایش درآمد، گرفته شده است. در سال ۱۳۷۷ این پروژه با همکاری دانشگاه یزد و مرکز تحقیقات ایران خودرو

با مدیریت آقای دکتر آسایی در قسمت الکتریکی و شرکت بنیان لوکوموتیو در قسمت مکانیکی با همکاری اداره نیروی کشش راه آهن و مرکز تحقیقات راه آهن آغاز شد. جهت طراحی این لوکوموتیو هیبرید از شاسی یک دستگاه لوکوموتیو G12 از رده خارج شده استفاده شد و قسمت های مختلف نظیر سیستم ترمز، پوسته موتور ها و ... توسط راه آهن در اختیار مجری طرح قرار گرفت. در شکل ۱-۲ نمایی از مجری و تیم تست پروژه نشان داده شده است. این پروژه صرف نظر از هزینه پرسنلی راه آهن (مرکز تحقیقات و نیروی کشش و...) و قطعات و تجهیزات واگذار شده، حدود هشتصد میلیون ریال هزینه در برداشت.



شکل ۱-۲ مجری پروژه و تیم تست عملکرد لوکوموتیو برقی

• بخش الکتریکی

در ابتدا مقرر شد که موتور کششی مربوط به سیستم محرکه اصلی این لوکوموتیو توسط شرکت واگن پارس از نوع موتورهای کششی لوکوموتیوهای آلمانی ME10 تأمین شود. لیکن به دلیل عدم توافق نهایی به دلیل هزینه بالای این نوع موتور، برنامه طراحی تغییر کرده و از ترکیب موتور الکتریکی پمپ آب، ساخت شرکت جمکو جوین، با پوسته موتور قبلی استفاده شد. این موتور ها با توان ۹۰ کیلووات در داخل پوسته موتورهای قدیمی تعبیه شده و از طریق پینیون آن به چرخ دنده محور محرک متصل شدند.

جهت تغذیه موتور ها از شش ست باتری سرب-اسید ساخته شده توسط شرکت صبا باتری که به منظور تغذیه لیفتراک تولید می شدند، استفاده شد. شارژ مجموعه باتری هم از طریق دیزل / ژنراتور در حین فعالیت لوکوموتیو و هم از طریق برق شهر در مواقع خاموشی دیزل امکان پذیر بود.

این سیستم توانایی حمل سه واگن با وزن ۸۰ تن و همچنین خود لوکوموتیو با وزن ۶۵ تن با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت در شیب صفر را دارا بود.

تجهیزات برقی سیستم لوکوموتیو

تجهیزات اصلی برقی به کاررفته در لوکوموتیو شامل موارد زیر می‌شود:

- ۱- دو عدد موتور القایی سه فاز، هر یک با توان ۹۰ کیلووات
 - ۲- دو عدد اینورتر ۲۷۰ کیلووات، ۳۰۰ آمپر، ۹۰۰ ولت سه فاز با استفاده از سویچ‌های IGBT
 - ۳- دیزل ژنراتور با توان ظاهری ۶۰ kVA
 - ۴- اینورتر ۳ kW با ولتاژ ۲۲۰V جهت تغذیه مصارف داخلی
 - ۵- یکسوساز سه فاز ۱۶۰A جهت شارژ
 - ۶- مبدل‌های DC/DC جهت تغذیه بوردهای کنترلی، چراغ‌ها، کنتاکتورهای DC
 - ۷- کمپرسور با ظرفیت حداکثر ۱۴۰ PSI و دو مخزن اصلی و کمکی جهت سیستم ترمز مکانیکی و پنیوماتیکی
 - ۸- باتری خانه با ولتاژ ۴۸۰ V، ۴۲۰ Ah جهت ذخیره انرژی الکتریکی
- بخش مکانیکی
- پس از انتخاب لوکوموتیو از رده خارج G12 به شماره ۴۰۹۱ جهت ساخت لوکوموتیو مانوری هیبرید، این لوکوموتیو به محل کارگاه شرکت بنیان لوکوموتیو منتقل و تحویل نماینده آن شرکت شد. این لوکوموتیو دارای دو دستگاه بوژی، شاسی، کابین و اتاق موتور بود که سایر مجموعه‌ها از قبیل موتور دیزل، ژنراتور اصلی، موتورهای کششی، اجزاء سیستم ترمز و برخی از اهرم‌بندی‌های ترمز در آن موجود نبودند. شایان ذکر است که در گزارش مرحله سوم و در یک بخش مجزا به بررسی تک تک این اجزا پرداخته شده است.

عملیات شرکت بنیان لوکوموتیو شامل دو بخش طراحی و اجرا به شرح زیر انجام گرفت:

– عملیات طراحی

عملیات طراحی شامل جاسازی دو دستگاه الکتروموتور AC با توان ۹۰ کیلووات در داخل پوسته موتور کششی D77 و همچنین برآورد و طراحی و نصب باتری‌ها، دیزل ژنراتور و تغییرات لازم برای حذف ترمز شش دنده‌ای لوکوموتیو بود.

– عملیات اجرایی

این عملیات شامل مونتاژ، شستشو و آماده‌سازی لوکوموتیو G12 و نصب کلیه مجموعه‌ها و اجزاء ناقص لوکوموتیو می‌باشد. کلیه مجموعه‌های لازم جهت انجام عملیات موردنظر شرکت بنیان لوکوموتیو توسط اداره کل نیروی کشش در اختیار این شرکت قرار گرفت که به ترتیب زیر بر روی لوکوموتیو هیبرید به اجرا درآمد:

۱- پیاده کردن اجزاء از روی شاسی

۲- شستشوی شاسی

۳- دمونتاژ مجموعه‌های لوکوموتیو

۴- تعمیر مدار ترمز

۵- خرید و طراحی و جاسازی کمپرسور

۶- طراحی و جاسازی الکتروموتور

۷- طراحی و جاسازی دیزل ژنراتور

۸- طراحی و جاسازی مجموعه باتری

۹- طراحی و جاسازی اجزاء الکتریکی

۱۰- طراحی و جاسازی فن‌ها

۱۱- بازسازی بوژی و کابین لوکوموتیو

۱۲- مونتاژ مجموعه‌های لوکوموتیو

۱۳- رنگ آمیزی

در شکل ۲-۲ نمایی از نصب تجهیزات بر روی لوکوموتیو و بازسازی شاسی و در شکل ۲-۳ اینورتر و مخزن هوای ترمز لوکوموتیو به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۲-۲ لوکوموتیو هیبریدی در حال نصب تجهیزات و بازسازی شاسی



شکل ۲-۳ اینورترهای ۱۵۰ کیلووات و مخزن هوای ترمز

• مشخصات عمومی سیستم لوکوموتیو

مشخصات عمومی سیستم لوکوموتیو هیبریدی به شرح زیر است:

حداکثر سرعت قابل استحصال: ۶۰ km/h

حداکثر سرعت تنظیمی: ۴۰ km/h

قابلیت حمل بار: ۲۵۰ تن در فراز^۱ صفر درجه (۷ واگن مسافری یا سه واگن باری)

مسافت قابل پیمایش: ۸۰ km (با استفاده از انرژی ذخیره شده در باتری)، ۱۵۰ Km (با استفاده از انرژی باتری و دیزل ژنراتور کمکی)

حداکثر فراز: ۱۰ در هزار

دارای سیستم کنترل پیشرفته حلقه بسته سرعت با سخت افزار میکروکنترلی

قابلیت بازیافت انرژی در هنگام ترمز و لحاظ نمودن ترمز دینامیکی با استفاده از بانک سوئیچ های IGBT

قابلیت شارژ باتری ها از دو طریق برق شهر و دیزل ژنراتور کمکی

قابلیت نمایش دیجیتالی پارامترهای مهم سیستم نظیر ولتاژ، فرکانس، جریان، دما، سرعت و غیره در تابلوی کنترل فرمان

قابلیت حرکت در دو جهت و انتخاب آنی جهت حرکت

قابلیت کنترل کلیه تجهیزات برقی سیستم از کابین راننده

- استفاده از سیستم های محرکه AC با قابلیت تعمیر و نگهداری آسان و ارزان
- قابلیت بازیافت انرژی ترمز و بازیافت انرژی در سراسیبه ها
- عدم ایجاد آلودگی در هنگام توقف
- عدم ایجاد آلودگی صوتی (هنگام خاموش بودن دیزل ژنراتور کمکی)
- عدم مصرف انرژی در هنگام توقف

• تست میدانی و آزمایش عملکرد لوکوموتیو هیبریدی

برای اولین بار لوکوموتیو هیبریدی ساخته شده در آذرماه ۱۳۷۹ به حرکت درآمد. در آن زمان لوکوموتیو فاقد قلاب اتوماتیک بود و برای انجام عملیات مانور فقط قلاب زنجیری وجود داشت. آزمایش های اولیه به شرح زیر انجام گرفت:

۱- در ایستگاه آپرین در فراز ۹ در هزار با سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت حرکت نموده و به دلیل ایراد نرم افزاری و ریست شدن ناگهانی الکتروموتور مجبور به خاموش و روشن کردن کامل لوکوموتیو شده و با تحریک هر دو الکتروموتور، لوکوموتیو به حرکت درآمد که در این آزمایش جریان هر دو الکتروموتور

¹ grade

کمتر از ۱۰۰ آمپر بود.

۲- پس از اصلاح نرم افزار لوکوموتیو عملیات تست در خطوط انبار کالا انجام شد به طوری که پس از طی فاصله ۳۰۰ متر سرعت حرکت لوکوموتیو منفرد به ۳۰ کیلومتر بر ساعت رسید.

۳- سرعت لوکوموتیو از ایستگاه آپرین به ایستگاه تپه سفید در مسیرهای شیب دار به حدود ۳۰ کیلومتر بر ساعت و در مسیرهای بدون شیب و فراز به سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت و در مسیر بازگشت سرعت لوکوموتیو هیبرید تا حدود ۶۰ کیلومتر بر سرعت می رسید. در این مرحله از آزمایش جریان الکتروموتورها تا حدود ۳۲۰ آمپر افزایش یافت و به همین دلیل مقرر شد که از این پس حداکثر سرعت لوکوموتیو ۴۰ کیلومتر بر ساعت محدود شده و برای هر یک از اینورترها یک فن خنک کننده نصب گردد.

۴- پس از انجام اصلاحات عملیات تست در خطوط انبار کالا با اتصال شش واگن یخچال بر که هر یک حدود ۴۳ تن وزن داشتند، انجام شد. به طوری که با تشکیل قطار با وزنی در حدود ۲۶۰ تن، لوکوموتیو به حرکت در آمده و سرعت آن پس از طی ۲۰۰ متر به ۸ کیلومتر بر ساعت رسید؛ که در این آزمایش نیز جریان الکتروموتورها تا حدود ۳۲۰ آمپر افزایش یافت.

۵- در خط شستشوی واگن های مسافری رجاء در مرحله اول با اتصال ۸ سالن مسافری و در فاصله ۲۰۰ متر سرعت قطار به ۶ کیلومتر بر ساعت رسید.

نتیجه این آزمایش ها حاکی از آن بود که امکان بهره برداری از این نوع لوکوموتیو برای مانورهای سبک در ایستگاه ها وجود دارد و در صورت تمایل به استفاده از آن برای مانورهای سنگین لازم است که دو محور بوژی عقب نیز کشنده بوده و به موتورهای کششی تجهیز شده و اینورترهای آن تقویت شود. شکل ۴-۲ و شکل ۵-۲ لوکوموتیو هیبرید را در حال تست عملکردی، از نماهای مختلف نشان می دهد.



شکل ۴-۲ نمای لوکوموتیو هیبریدی از جلو و عقب در حال تست عملکرد



شکل ۵-۲ نمای لوکوموتیو هیبریدی از پهلو

• وضعیت کنونی لوکوموتیو هیبرید

پس از انجام آزمایش‌های میدانی و تست‌های ایستگاهی از لوکوموتیو برقی هیبرید و کسب اطمینان از امکان دستیابی به تکنولوژی موتورهای AC در موتورهای کششی لوکوموتیوهای مانوری، علیرغم حل مشکلات و محدودیت‌های ساخت اولیه این لوکوموتیو برای مانورهای سبک، اراده‌ای برای اعمال اصلاحات نهایی و تقویت توان کشش لوکوموتیو با افزودن موتورهای کششی بوژی عقب وجود نداشت و هم‌اکنون این لوکوموتیو در محل کارخانجات بازسازی لوکوموتیو کرج و در پارکینگ جنب سالن رنگ این کارخانه متوقف گردیده است که شکل ۶-۲ در نمایی از وضعیت حال حاضر این لوکوموتیو به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۶-۲ وضعیت حال حاضر باتری‌ها لوکوموتیو برقی هیبرید در کارخانجات بازسازی لوکوموتیو کرج

۳-۲ تجارب خارجی

در این بخش به مطالعه فعالیت‌های انجام‌گرفته در دنیا و بررسی تجارب شرکت‌های خارجی در زمینه توسعه لوکوموتیوهای هیبرید مانوری پرداخته می‌شود.

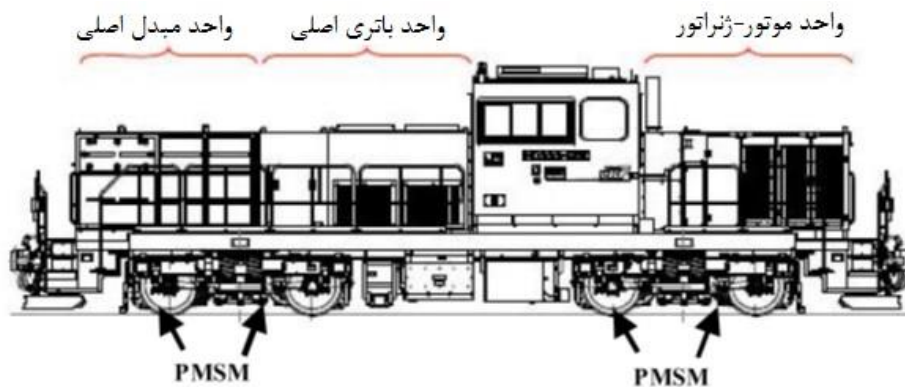
۱-۳-۲ لوکوموتیو هیبرید، سری HD300 محصول شرکت توشیبا ژاپن

تصویر لوکوموتیو هیبرید سری HD300 در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. این لوکوموتیو از نوع هیبرید دیزل-الکتริก با استفاده از ذخیره ساز باتری است. ساختار چرخ های این لوکوموتیو به صورت BO-BO بوده و به صورت لوکوموتیو مانوری در سیستم حمل و نقل راه آهن ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است. مدل اولیه این لوکوموتیو، با اهداف کاهش گازهای سمی، کاهش نویز صوتی، کاهش گاز CO₂ و همچنین کاهش مصرف سوخت، توسط بخش حمل و نقل شرکت توشیبا در مارس سال ۲۰۱۰ ساخته شد [۸].

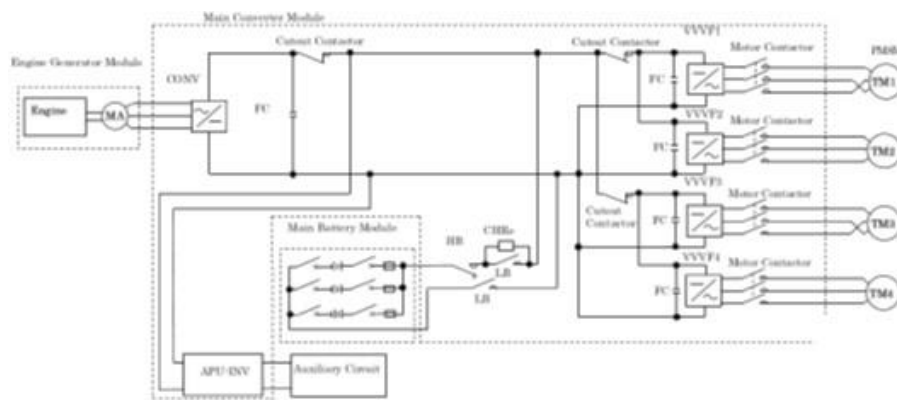


شکل ۷-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید سری HD300 [۸]

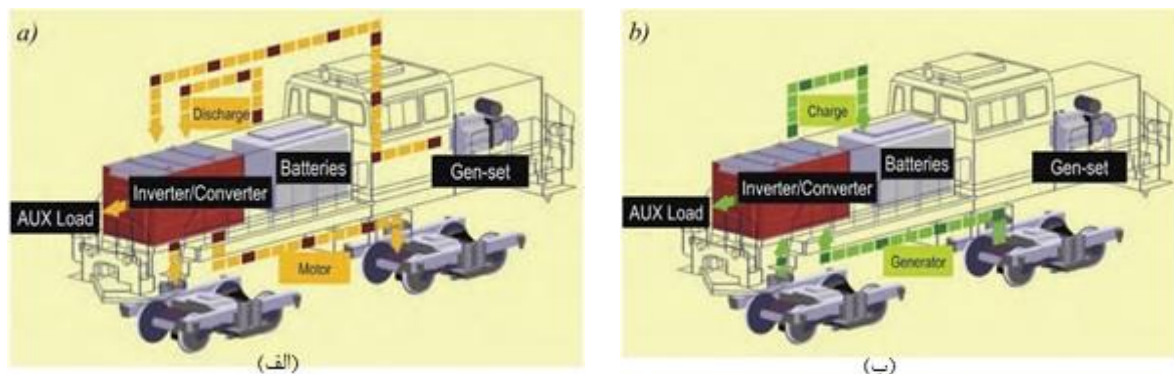
ساختار این نوع لوکوموتیو به صورت ماژولار است. بدان معنا که هر بخش به صورت ماژول بوده تا در صورت توسعه فناوری در آن بخش بتوان آن را به راحتی ارتقا داد. به عنوان نمونه با توجه به ماژولار بودن سیستم موتور احتراق داخلی می توان آن را به راحتی با فناوری های نوین نظیر پیل سوختی جایگزین کرد. شمای جایی اجزاء در این لوکوموتیو در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. همچنین دیاگرام بخش رانشی آن نیز در شکل ۹-۲ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۸-۲ شمای جایی اجزاء در لوکوموتیو هیبرید HD300 [۸]



شکل ۹-۲ دیاگرام بخش رانشی لوکوموتیو هیبریدی سری HD300 [۹]



شکل ۱۰-۲ شارش توان لوکوموتیو هیبریدی سری HD300 در دو وضعیت الف) رانشی و ب) ترمزی

سیستم پیشرانده مورد استفاده در HD300 از نوع هیبریدی سری است. مسیر شارش توان در دو وضعیت رانشی و ترمزی در شکل ۱۰-۲ الف و شکل ۱۰-۲ ب نشان داده شده است.

لوکوموتیوهای HD300 مجهز به باتری‌هایی با عملکرد و ظرفیت بالا از جنس لیتیوم یون -LIM30H- 8A تولید شده توسط GS Yuasa می‌باشند که در شکل ۱۱-۲ نمایی از آن نشان داده شده است. باتری‌های به کار رفته شده توانایی تأمین توان بالا به منظور راه اندازی لوکوموتیو را داشته و این امر در دماهای پایین (هوای سرد) نیز می‌تواند بدون کاهش طول عمر باتری‌ها محقق شود. همچنین در مجموعه باتری، تعدادی باتری رزرو قرار داده شده تا در صورت آسیب دیدن بخشی از باتری بتوان به راحتی و بدون اختلال در فعالیت لوکوموتیو آن‌ها را تعویض کرد [۸].



شکل ۲-۱۱ نمای ظاهری مجموعه باتری مورد استفاده در لوکوموتیو هیبریدی سری HD300
مشخصه‌های فنی این لوکوموتیو در جدول ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱ مشخصات فنی موتور الکتریکی مورد استفاده در لوکوموتیو هیبریدی سری HD300 [۹]

سیستم موتور اصلی		موتور سنکرون آهنربا دائم (PMSM)	
تعداد فازها		سه فاز	
تعداد قطب‌ها		شش قطب	
سیستم خنک‌کنندگی		کاملاً بسته و بدون فن خنک‌کننده	
مقادیر نامی	زمان	پیوسته	یک ساعت
	خروجی	۶۲ کیلووات	۸۰ کیلووات
	ولتاژ	۴۴۰ ولت	
	جریان	۹۰ آمپر	۱۱۷ آمپر
	دور بر دقیقه (rpm)	۵۵۰ Rpm	
	فرکانس	۲۷/۵ هرتز	
وزن		۱۲۴۶ کیلوگرم	
بیشترین سرعت ممکن (rpm)		۱۲۴۴ Rpm	

در این لوکوموتیو از موتورهای با راندمان بالای ۹۶٫۷٪ از نوع سنکرون آهنربا دائم PMSM استفاده شده است. مشخصات این موتور در جدول ۲-۱ نشان داده شده است. از مزایای این موتور می‌توان به

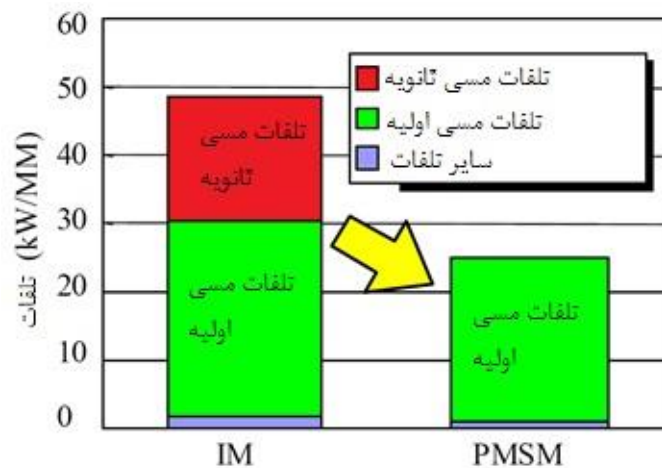
گشتاور بالا در سرعت‌های کم اشاره نمود. همچنین در این موتور که شکل ۱۲-۲ نشان داده شده، به دلیل سنکرون بودن سرعت روتور با میدان دوار جریانی بر روی روتور وجود نداشته و در نتیجه تلفات روتور نیز در این موتور وجود ندارد که می‌توان این موضوع را دلیل اصلی راندمان بهتر (حدود ۹٪) نسبت به موتور القایی مرسوم دانست. (شکل ۱۳-۲)

جدول ۲-۲ مشخصات فنی لوکوموتیوهای هیبرید موردنظر

لوکوموتیو	وزن (تن)	ساختار چرخ‌ها	سیستم هیبرید	کل توان خروجی	توان موتور دیزل	نوع باتری
سری HD300-نوشیبا	۶۰	Bo-Bo	سری	۵۰۰ Kw	۲۰۵ Kw	لیتیوم-یون
TEM9H هیبرید-سینارا	۹۰	Bo-Bo	نامشخص	۸۹۵ Kw	۶۳۹ Kw	لیتیوم-یون
GG20B-ریل پاور	۱۳۰	Bo-Bo	سری	۱۴۹۰ Kw	۲۱۶ Kw	لیتیوم-یون
هیبرید GE-Evolution	۲۰۷	Co-Co	سری	۳۲۸۰ Kw		سدیم متال-کلراید
BR203H-آلستوم	۸۰	Bo-Bo	سری	۵۵۰ Kw	۲۰۰ Kw	نیکل-کادمیوم
Rada 718	۶۴	Bo-Bo	سری	۵۱۰ Kw	۱۸۹ Kw	نیکل-کادمیوم
هیبرید Mk 48 Raba	۱۷/۶	Bo-Bo	سری	۳۶۴ Kw	۲۰۴ Kw	لیتیوم-آهن-فسفات



شکل ۱۲-۲ موتور الکتریکی مورد استفاده در لوکوموتیو هیبرید سری HD300 [۹]



شکل ۱۳-۲ مقایسه تلفات در موتور القایی و موتور PMSM

به دلیل استفاده از باتری در ساختار این نوع لوکوموتیو امکان فعالیت موتور احتراق داخلی در نقطه کار بهینه فراهم شده است. به طوری که در آن نسبت به لوکوموتیو دیزلی هم تراز میزان تولید گازهای آلاینده NO_x ۶۲٪ و میزان مصرف سوخت ۳۶٪ کاهش یافته است. همچنین در این نوع لوکوموتیو نویز صوتی به میزان ۲۲db کاهش می یابد [۹].

۲-۳-۲ لوکوموتیو هیبرید سینارا^۱ TEM9H محصول روسیه

شمای این لوکوموتیو در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است. این لوکوموتیو اولین لوکوموتیو هیبرید در روسیه است که بر روی پلتفرم لوکوموتیو دیزل TEM9 ساخته شد [۱۰]. این لوکوموتیو بر اساس "طرح لوکوموتیو لودینوفسکی" (LudTZ^۲) ساخته شد. لوکوموتیو از نوع مانوری با ساختار BO-BO است. سیستم رانشی لوکوموتیو از نوع موتور القایی با توان خروجی کل برابر با ۱۲۰۰hp می باشد. این لوکوموتیو به مجموعه باتری از جنس لیتیوم یون (لیتیوم فسفات آهن) تجهیز شده است. طبق اعلام تولیدکنندگان میزان مصرف سوخت در این نوع لوکوموتیو ۴۰٪ و میزان تولید گازهای آلاینده ۵۵٪ نسبت به انواع مشابه کاهش یافته است. لوکوموتیو TEM9H سینارا همچنان توانایی پیمایش ۴ ساعته را با یک بار شارژ دارد [۱۱].

¹ Sinara

²Ludnovsky locomotive plant



شکل ۲-۱۴ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید سینارا TEM9H محصول روسیه [۱۰]
مشخصات فنی این لوکوموتیو در جدول ۲-۲ نشان داده شده است.

۳-۳-۲ GG20B Green Goat محصول شرکت ریل پاور^۱ کانادا

شمای این لوکوموتیو در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. نمونه اولیه لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat در سال ۲۰۰۱ با نام GGS2000D تولید شده است. پس از آن نسخه‌های مختلف این لوکوموتیو با انجام تغییراتی نظیر تغییرات ظاهری، سیستم خنک‌کنندگی، سیستم آگزوز و انباره و غیره تولید شد. در نسخه‌های بعدی دیزل ژنراتور با توان ۱۳۰hp جایگزین دیزل ژنراتور نمونه اولیه با توان ۹۰hp شد. در نسخه به کار گرفته شده این لوکوموتیو در شرکت Canadian Pacific، از یک دیزل ژنراتور با توان ۶۷۰hp استفاده شده و در شکل ۲-۱۶ نمایی از آن نشان داده شده است.



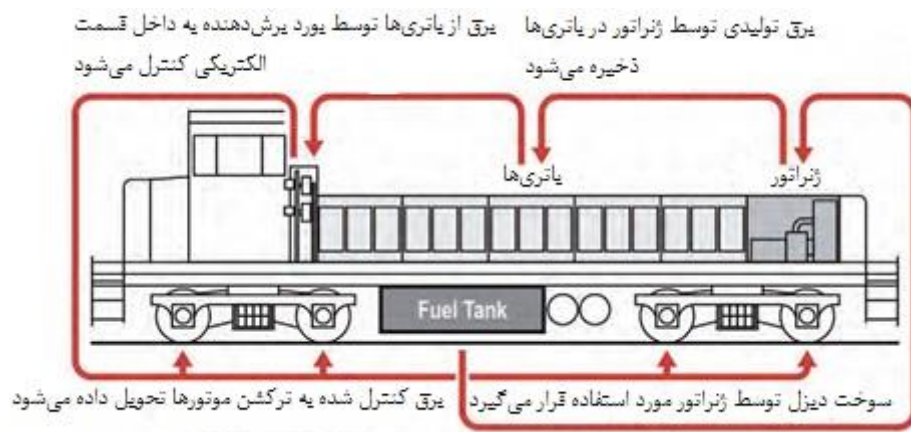
شکل ۲-۱۵ تصویر نمونه اولیه لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat [۱۲]

¹ Rail Power

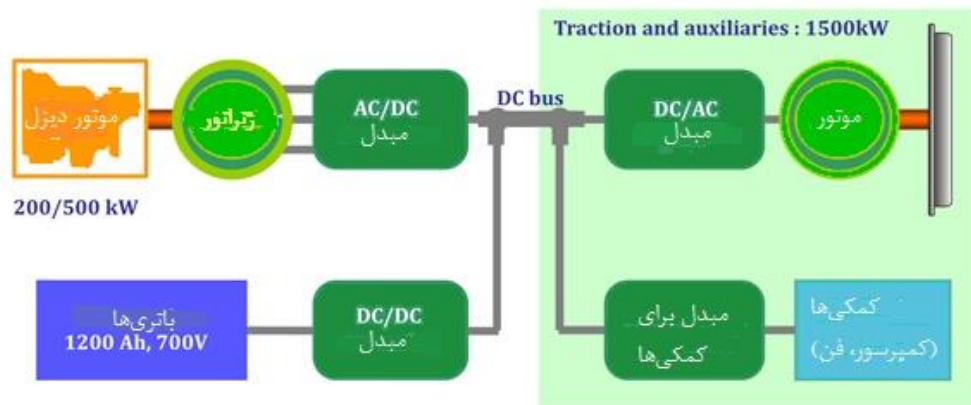


شکل ۱۶-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat بکار گرفته شده در شرکت Canadian Pacific [۱۲] شمایی از فناوری هیبرید به کاررفته در این لوکوموتیو در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است. در این لوکوموتیو از دیزل ژنراتور فقط به منظور شارژ باتری استفاده می شود که این امر خود امکان کاهش تلفات در زمان توقف لوکوموتیو را فراهم می کند با کاهش زمان توقف مقدار زیادی کاهش مصرف سوخت (۴۰٪ تا ۷۰٪) و همچنین کاهش آلودگی (۸۰٪ تا ۹۰٪) قابل حصول است. موتور احتراق داخلی در زمان توقف خاموش شده و سپس توسط باتری روشن می شود [۱۳].

لوکوموتیو Green Goat به یک موتور احتراق داخلی دارای توربو شارژر محصول شرکت کاترپیلار مجهز شده است. مشخصات فنی این لوکوموتیو نیز در جدول ۲-۲ اشاره شده است. همچنین دیاگرام سیستم پیشران این نوع لوکوموتیو در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۷-۲ شمایی فناوری هیبرید به کاررفته در لوکوموتیو مانوری هیبرید GG20B Green Goat [۱۴]



شکل ۲-۱۸ دیگرام سیستم پیشرانه لوکوموتیو مانوری هیبرید Green Goat [۱۳]

۲-۳-۴ لوکوموتیو هیبرید Evolution محصول شرکت GE^۱ کشور ایالات متحده

لوکوموتیو Evolution برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط شرکت جنرال الکتریک معرفی شد. این محصول با هدف کاهش مصرف سوخت و کاهش میزان آلاینده‌گی تولید شد [۱۵]. این لوکوموتیو دارای ساختار چرخ CO-CO است. همچنین در آن از یک موتور چهارزمانه استفاده شده است. در هنگام ترمزگیری نیز انرژی بازیافتی توسط باتری‌ها ذخیره شده و از باتری‌های سدیم متال کلراید نیز در این لوکوموتیو به عنوان ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. این باتری‌ها توانایی تأمین توان بالای مورد نیاز این لوکوموتیو (۲۰۰۰ hp) را دارا می‌باشند [۱۶]. توان این لوکوموتیو ۴۴۰۰hp بوده که باتری خود توانایی تأمین توانی برابر ۲۰۰۰ hp را دارا می‌باشد. در این لوکوموتیو با استفاده از سیستم هیبریداسیون در کارکرد باری، ۱۵٪ کاهش مصرف سوخت و ۵۰٪ کاهش آلاینده‌گی گزارش شده است [۱۷].

در شکل ۲-۱۹ ساختار این لوکوموتیو و در جدول ۲-۲ مشخصات آن بیان شده است.



شکل ۲-۱۹ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید Evolution محصول شرکت GE کشور ایالات متحده [۱۶]

¹ General Electric

۵-۳-۲ لوکوموتیو هیبرید BR203H محصول شرکت آلتوم^۱ آلمان

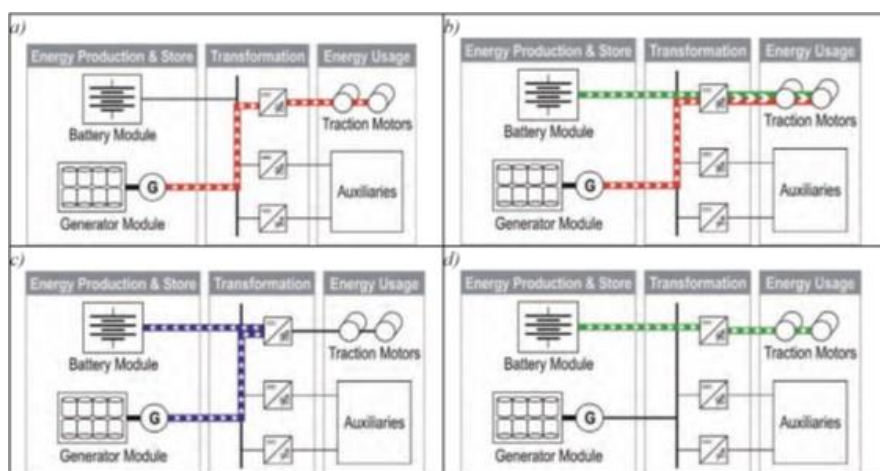
شرکت آلتوم در سال ۲۰۰۶ از نمونه اولیه لوکوموتیو هیبرید خود رونمایی کرد. در شکل ۲-۲۰ نمایشی از این لوکوموتیو نشان داده شده است. لوکوموتیو BR203H بر روی سیستم لوکوموتیو مانوری BR203 قرار گرفته است. نمونه اولیه به یک موتور ژنراتور با توان ۲۰۰ kW و مجموعه باتری با توان ۳۵۰ kW مجهز شده است.



شکل ۲-۲۰ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید BR203H محصول شرکت آلتوم آلمان [۱۸]

ساختار این لوکوموتیو از نوع سری بوده و در آن باتری و یا موتور/ژنراتور و یا هر دو آن‌ها با هم می‌توانند توان مورد نیاز رانشی موتور را تأمین کنند. وضعیت‌های مختلف عملکرد این نوع لوکوموتیو در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است. طبق گزارش‌ها با استفاده از این سیستم پیش‌رانه ۴۰٪ کاهش مصرف سوخت و ۵۰٪ کاهش انتشار گازهای آلاینده حاصل می‌شود. همچنین استفاده از این سیستم پیش‌رانه ۱۰db نسبت به انواع دیزلی هم‌تراز آلودگی صوتی کمتری دارد [۱۸].

مشخصات این لوکوموتیو نیز در جدول ۲-۲ ذکر شده است.



¹ Alstom

شکل ۲-۲۱ مدهای مختلف عملکردی لوکوموتیو مانوری هیبرید BR203H محصول شرکت آلتوم آلمان [۱۸]

۶-۳-۲ لوکوموتیو Rada 718 محصول کشور چکوسلاواکی

لوکوموتیو هیبرید مانوری Rada 718 توسط شرکت CKD Praha در سال ۱۹۸۶ تولید شده و در شکل ۲-۲۲ نمایی از این لوکوموتیو نشان داده شده است. در این لوکوموتیو از موتور دیزلی ۱۸۹kW استفاده شده است. با استفاده از یک مجموعه باتری نیکل کادمیوم با توان ۳۶۰ kW مابقی انرژی نیز تأمین شده و نیروی ترمزی نیز توسط مجموعه باتری قابل بازیافت بود. همچنین امکان شارژ باتری در زمان توقف لوکوموتیو و یا از طریق برق شبکه امکان پذیر بود. بر اساس نتایج بررسی ها این لوکوموتیو ۲۰٪ تا ۳۰٪ کاهش مصرف سوخت نسبت به انواع دیزلی مشابه را نشان می دهد [۱۹]. مشخصات این لوکوموتیو در جدول ۲-۲ شرح داده شده است.



شکل ۲-۲۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید Rada 718 محصول کشور چکوسلاواکی [۱۹]

۷-۳-۲ لوکوموتیو هیبرید Raba Mk 48 محصول کشور مجارستان

لوکوموتیو Raba Mk 48 با هدف کاهش آلودگی در مجارستان طراحی شده است. در این لوکوموتیو دیزل ژنراتور ساخت شرکت کامینز استفاده شده است. ساختار این لوکوموتیو به صورت سری بوده و می تواند به دو صورت الکتریکی خالص و هیبرید فعالیت نماید. مشخصات فنی این لوکوموتیو در جدول ۲-۲ بیان شده و در شکل ۲-۲۳ نمایی از آن نشان داده شده است [۲۰].



شکل ۲۳-۲ تصویر لوکوموتیو مانوری هیبرید Raba Mk 48 محصول کشور مجارستان [۲۱]

۴-۲ نتیجه‌گیری

در این بخش فعالیت‌های انجام‌گرفته داخلی و خارجی در زمینه توسعه لوکوموتیوهای هیبرید مانوری مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش اول به‌مرور فعالیت‌های داخلی و در بخش دوم به بررسی تجربیات و فعالیت شرکت‌های مختلف خارجی از نقاط مختلف جهان پرداخته شد.

در بخش اول این فصل از گزارش به بررسی تجربه ساخت لوکوموتیو هیبریدی که در سال ۱۳۷۹ در داخل کشور تولید و آزمایش شد پرداخته شد. شاید بتوان این لوکوموتیو را از اولین تجربیات جهانی لوکوموتیو هیبریدی دانست. در قسمت بعدی به مراحل تولید و ساخت این لوکوموتیو اشاره شد. در ادامه این بخش به مطالعه فعالیت‌های انجام‌گرفته در دنیا و بررسی تجارب شرکت‌های خارجی در زمینه توسعه لوکوموتیوهای هیبرید مانوری پرداخته شد.

فصل ۳ - بررسی الزامات فنی هیبریدسازی یک لوکوموتیو

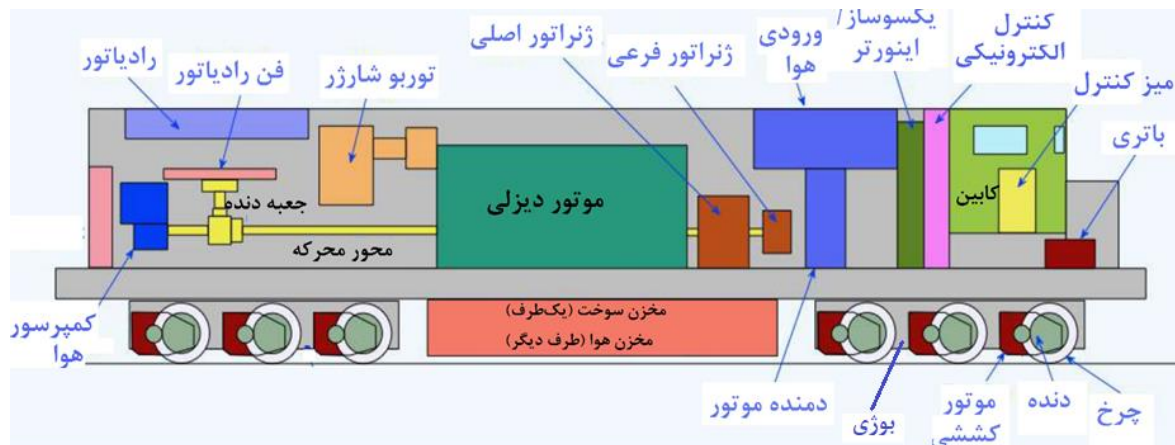
۱-۳ مقدمه

شرکت‌های راه آهن، لوکوموتیوهای مخصوصی را به نام لوکوموتیوهای مانوری جهت انجام ماموریت‌های خاص خود در نظر می‌گیرند. این نوع از لوکوموتیوها از نوع کششی بوده و می‌بایست در

سرعت پایین قادر به توانایی کشش بار بسیار زیادی باشند. لوکوموتیوهای مانوری مستلزم کنترل دقیق حرکات قطار بوده و بدین منظور می بایست یک کنترل دقیق و مناسب را در اختیار راننده لوکوموتیو قرار دهند. سیستم‌های پیشران دیزل-الکتریک و هیدرولیک-دیزل کششی با رنج توانی مختلف قادر به انجام ماموریت‌های لوکوموتیوهای مانوری هستند. لوکوموتیوهای مانوری دیزلی دارای نقطه ضعف هایی هستند به طوری که در حالت انجام فعالیت‌های طولانی موتور دیزلی با حداقل توان خروجی کار میکند که با نقطه کار بهینه خود بسیار فاصله دارد همچنین به منظور فراهم کردن انرژی جهت مصارف غیر کششی نظیر: تهویه هوا، روشنایی و همچنین اطمینان از حاضر به کار بودن لوکوموتیو به محض احتیاج (فشار هوای ترمزها، دمای موتور و...) موتور دیزلی روشن بوده و در پایین ترین بازده عملکردی خود فعالیت می کند به گونه ای که در یک بازه کاری نسبت زمان عدم حرکت لوکوموتیو بعضاً تا ۸۵ درصد زمان کل بهره برداری است. این حالت بیکاری موتور دیزلی باعث افزایش مصرف سوخت و ایجاد آلودگی‌های صوتی و زیست محیطی شده و همچنین باعث کاهش طول عمر خود موتور نیز خواهد شد. افزایش مصرف سوخت، افزایش نگرانی آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی باعث تغییر در ساختار و عملکرد لوکوموتیوهای مانوری شده است. افزایش مطالعه در زمینه محدودیت‌ها و مشکلات لوکوموتیوهای دیزلی کلاسیک باعث تحقیقات گسترده ای جهت یافتن راه حل مناسب در زمینه جایگزینی آن‌ها شده است. با توجه به میزان قابل توجهی از زمان بیکار بودن و توان مورد نیاز مصرفی موتورهای دیزلی فن آوری هیبریدی متشکل از نیرو محرکه کششی الکتریکی، باتری با قابلیت ذخیره سازی انرژی و یک دیزل ژنراتور می تواند به عنوان یک راهکار مناسب جهت کاهش میزان آلودگی و مصرف سوخت مورد مطالعه قرار گیرد.

۲-۳ المان‌های مورد نیاز در سیستم رانشی لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک

شکل ۱-۱ اجزاء اصلی نصب شده در سیستم رانشی یک لوکوموتیو دیزل-الکتریک را نشان می‌دهد. در ادامه این بخش به معرفی و بررسی کلی تک تک اجزاء پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۳ اجزاء اصلی سیستم رانشی لوکوموتیو دیزل-الکتریک

۱-۲-۳ موتور دیزلی^۱

موتور دیزلی به عنوان منبع اصلی توان در یک لوکوموتیو دیزل-الکتریک شناخته می شود. یک موتور دیزلی دربرگیرنده تعدادی سیلندر بوده که این سیلندرها می توانند به صورت خطی و یا V شکل در ساختار موتور قرار گیرند. حرکت موتور باعث چرخش محور محرکه با سرعتی تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه می شود. در لوکوموتیو دیزل-الکتریک سیستم انتقال نیرو به صورت الکتریکی است، بدان معنا که موتور دیزلی به عنوان منبع توان عمل کرده و یک ژنراتور را به حرکت درآورده تا نیرومحرکه الکتریکی موردنیاز برای حرکت موتورهای قرارگرفته بر روی چرخ ها تأمین شود.

۲-۲-۳ ژنراتور اصلی^۲

موتور دیزلی از طریق ژنراتور توان الکتریکی موردنیاز جهت حرکت چرخ ها را تأمین می کند. بسته به نوع ژنراتور، جریان خروجی می تواند مستقیم (DC) یا متناوب (AC) (که به آن ها آلترناتور نیز گفته می شود) باشد.

۳-۲-۳ ژنراتور فرعی یا کمکی^۳

در لوکوموتیوها، معمولاً از یک ژنراتور کمکی جهت تأمین انرژی الکتریکی بارهای غیر کششی، نظیر سیستم روشنایی، سیستم تهویه، سیستم های سرمایش-گرمایشی و غیره استفاده می شود.

¹ Diesel engine

² Main Alternator

³ Auxiliary Alternator

۴-۲-۳ دمنده موتور^۱

موتور دیزلی وظیفه تأمین توان موردنیاز دمنده موتورها را نیز بر عهده دارد. همان‌طور که از اسم آن مشخص است، یک دمنده موتور وظیفه تأمین هوای موردنیاز جهت خنک‌کردن موتورهای کششی بر روی چرخ‌ها را در شرایط کاری سنگین بر عهده دارد از طرفی هوای خروجی دمنده نیز جهت خنک‌کاری ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی طراحی‌ها مسیرهای جداگانه‌ای جهت عبور هوا و خنک‌کردن موتورها و ژنراتورها تعبیه شده است. جدای از نوع مسیر هوا، در سیستم خنک‌کاری مدرن تمهیداتی اندیشیده شده تا بتوان با اندازه‌گیری دمای موتورها، میزان شارش هوای موردنیاز را به‌منظور افزایش بازدهی تنظیم کرد.

۵-۲-۳ ورودی‌های هوا^۲

هوای موردنیاز جهت خنک‌کاری از فضای بیرون لوکوموتیو تأمین می‌شود. بنابراین می‌بایست درون ورودی‌های هوا فیلترهایی به منظور جلوگیری از ورود گرد و خاک و دیگر ناخالصی‌ها تعبیه شود. میزان شارش هوا توسط مقایسه دما در داخل و خارج از لوکوموتیو تنظیم می‌شود. سیستم مدیریت هوا می‌بایست به گونه‌ای طراحی شود تا قابلیت فعالیت در محدوده وسیعی از دما (از دمای ۴۰- درجه زمستان تا ۴۰+ در تابستان) را داشته باشد.

۶-۲-۳ یکسوساز/اینورتر^۳

جریان خروجی ژنراتور متناوب (AC) است که می‌توان از این خروجی هم در موتورهای کششی جریان متناوب (AC) یا جریان مستقیم (DC) استفاده کرد. سالهای سال از موتورهای DC به عنوان موتورهای کششی استفاده می‌شد. اما با توسعه موتورهای AC طی دهه‌های اخیر این نوع موتورها نیز به عنوان گزینه اصلی سیستم پیشران لوکوموتیوهای مدرن در نظر گرفته شدند. موتورهای AC علاوه بر ساختار ساده‌تر دارای قیمت کمتری نسبت به موتورهای DC هستند. همچنین هزینه تعمیرات و نگهداری این نوع موتورها به مراتب از نوع DC کمتر است. بنابراین جهت تغذیه موتورهای DC به یک یکسوساز و همچنین جهت تغذیه موتورهای AC با فرکانس و دامنه ولتاژ مطلوب به یک سیستم یکسوساز و اینورتر نیاز است [۲۲].

طراحی‌های مختلفی برای اینورتر در لوکوموتیوها وجود دارد به طوری که در برخی لوکوموتیوها از یک اینورتر به عنوان تحریک تمامی موتورهای کششی استفاده می‌شود و در برخی ساختار دیگر از اینورترهای مجزا جهت تحریک موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود. هر دو روش مزایای منحصر به فرد

¹ Motor Blower

² Air Intakes

³ Rectifier/ inverter

خود را دارا است. در سیستم با یک اینورتر محورها به صورت موازی به هم متصل بوده و این اطمینان داده می‌شود تا کنترل لغزش چرخ به طور مساوی در بین محورها به حداکثر می‌رسد. روش دیگر کنترل یک اینورتر به ازای هر محور است که علیرغم پیچیدگی روش کنترل آن به بهترین توان کششی منجر می‌شود. به طور مثال اگر کنترل کششی محوری دچار خطا شود، کنترل محورهای دیگر در اختیار بوده تا بتوان از تحریک کششی موتورهای دیگر استفاده شود [۲۲].

۷-۲-۳ سیستم کنترل الکترونیکی^۱

در یک لوکوموتیو مدرن تقریباً تمامی اجزا از طریق یک سیستم الکترونیکی کنترل می‌شوند. سیستم کنترلی به منظور دسترسی راحت در کابین قرار می‌گیرد. معمولاً بخش مربوط به کنترل شامل سیستم‌های مدیریت و نگهداری می‌باشند که می‌تواند اطلاعات مختلف اجزاء را از طریق کامپیوتر و یا به صورت سخت افزاری از آن استخراج کرد.

۸-۲-۳ میز کنترل^۲

رابط اصلی انسان و لوکوموتیو است که به عنوان میز کنترل یا ایستگاه کنترل شناخته می‌شود. که معمولاً با زاویه ای در سمت چپ موقعیت رانندگی قرار می‌گیرد.

۹-۲-۳ باتری^۳

همانند خودروها، به منظور راه‌اندازی دیزل ژنراتور و سیستم روشنایی و کنترل کننده‌ها از یک مجموعه باتری ولتاژ پایین استفاده می‌شود. همچنین در مواقعی که دیزل ژنراتور خاموش است، می‌توان از باتری‌ها در صورت وضعیت شارژ (SOC^۴) مناسب استفاده کرد که این امر کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش آلودگی زیستی را دربر دارد. باتری‌ها که خود یک نوع از ذخیره‌سازهای انرژی محسوب شده دارای ساختار و انواع مختلفی هستند [۲۳]:

• سرب-اسید^۵

باتری‌های سرب-اسید ارزان، ایمن و قابل اعتماد بوده و همچنین می‌توان آن‌ها را در توان‌های بالا به جهت راه‌اندازی استفاده کرد. با این حال، مشخصات انرژی پایین، عملکرد نامناسب در هوای سرد، سنگین بودن آن‌ها در مقایسه با موارد مشابه و همچنین عمر تقویمی و سیکلی کوتاه مانع استفاده از آنها می‌شود.

¹ Electronic controls

² Control Stand

³ Battery

⁴ State of charge

⁵ Lead-Acid

• لیتیوم-یون^۱

امروزه باتری‌های لیتیوم-یون تقریباً در همه وسایل قابل حمل الکترونیکی استفاده می‌شوند. این نوع از باتری‌ها به علت بازدهی بالای انرژی، عملکرد مناسب در دمای بالا، نرخ پایین تخلیه داخلی باتری (مقاومت درونی کوچک) و همچنین چگالی و انرژی مخصوص بالا به سایر سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی برتری داشته و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشتر خودروهای هیبریدی قابل اتصال به شبکه^۲ و خودروهای الکتریکی^۳ امروزی از باتری‌های لیتیوم-یون استفاده می‌کنند.

• نیکل متال هیدرید^۴

باتری‌های نیکل متال-هیدرید در کامپیوترها و تجهیزات پزشکی استفاده می‌شوند و دارای مشخصات انرژی خوبی هستند. این نوع باتری دارای طول عمر به مراتب بهتری نسبت به نوع سرب-اسید بوده و قابلیت اطمینان بالاتر و نسبت به نوسانات مقاوم‌تر است. در سال‌های گذشته این نوع از باتری‌ها به طور گسترده در خودروهای هیبریدی بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گرفتند اما موضوع اصلی در مورد این نوع از باتری‌ها قیمت بالای آن‌ها، نرخ بالای تخلیه خودی، تولید گرما در دماهای بالا و نیاز به کنترل ائتلاف هیدروژن است [۲۴].

• ابرخازن‌ها:۵

اگرچه ابرخازن‌ها جزو خانواده باتری‌ها نیستند ولی خود یک نوع ذخیره‌ساز انرژی محسوب می‌شوند. ابرخازن‌ها دارای چرخه عمر بسیار بیشتری نسبت به باتری‌ها هستند و می‌توانند در هنگام شتاب‌گیری و شیب‌پیمایی توان بیشتری برای خودرو فراهم کنند و از آن‌ها می‌توان در سیستم بازیابی انرژی ترمزی استفاده کرد و انرژی را ذخیره نمود.

۱۰-۲-۳ بوژی^۶

بوژی به سیستم حرکتی (ناقله) واگن یا لوکوموتیو گفته می‌شود و متشکل از قاب (تیرهای طولی و عرضی)، مجموعه فنربندی (تعلیق)، مجموعه چرخ و محور، مجموعه ترمز و ادوات مربوطه می‌باشد) شکل ۲-۳). بوژی ضمن توزیع یکنواخت وزن واگن روی خط باعث سهولت در گردش واگن هنگام عبور

¹ Lithium-Ion

² plug-in hybrid electric vehicle

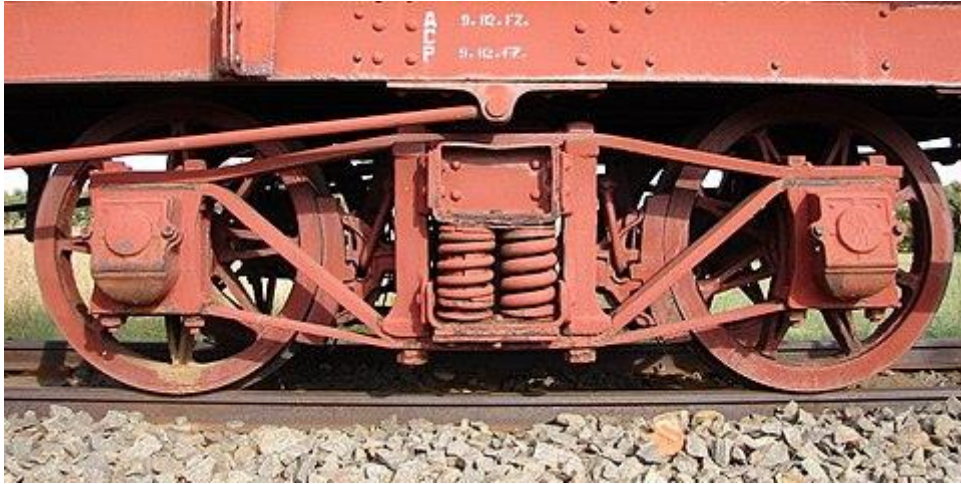
³ Electric vehicle

⁴ Nickel-Metal Hydride

⁵ Ultracapacitors

⁶ Bogie

از قوس، ایمنی سیر، سهولت در مبادله واگن بین راه آهن های با عرض خط مختلف و افزایش ظرفیت بارگیری واگن در بار محوری ثابت می شود.



شکل ۲-۳ تصویر بوژی در یک لوکوموتیو

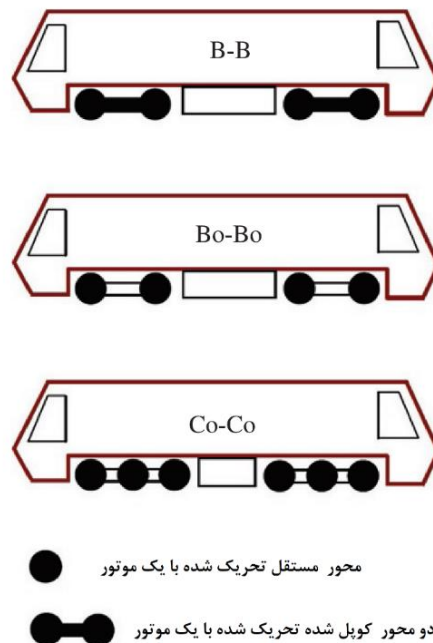
در لوکوموتیو ها بوژی نقش های اساسی دیگری نیز دارد و آنها عبارتند از: توزیع وزن نسبتا سنگین لوکوموتیو بر روی ریل، کشش لوکوموتیو و واگنهای متصل به آن و تامین چسپندگی لازم برای لوکوموتیو.

بر اساس تعداد محورها، ساختار، بدنه، طراحی و سیستم تعلیق، بوژی ها به دسته های مختلفی تقسیم بندی می شوند که انواع رایج آن به شرح زیر می باشند (شکل ۳-۳):

آرایش B-B: در این آرایش در هر کدام از دو بوژی لوکوموتیو دو محور وجود دارد که با همدیگر کوپل شده و توسط یک موتور به حرکت درمی آیند.

آرایش BO-BO: در این آرایش در هر بوژی دو محور مجزا وجود دارد که هر کدام از محورها توسط یک موتور بصورت مستقل به حرکت درمی آید. این ساختار مناسب لوکوموتیوهای سایز متوسط می باشد.

آرایش CO-CO: در این آرایش در هر بوژی سه محور مجزا وجود دارد که هر کدام از محورها توسط یک موتور بصورت مستقل به حرکت درمی آید. این ساختار مناسب لوکوموتیوهای باری است.



شکل ۳-۳ انواع آرایش بوژی در یک لوکوموتیو

۱۱-۲-۳ موتور کششی (تراکشن)^۱

از آنجایی که در یک لوکوموتیو دیزل-الکتریکی از یک سیستم انتقال الکتریکی استفاده می‌شود، به منظور تامین توان رانشی از موتورهای کششی بر روی محورها استفاده می‌شود. توان این موتورها بعضاً به ۱۰۰۰hp می‌رسد. در انتهای این بخش به بررسی مفصل موتورهای الکتریکی مورد استفاده در سیستم رانشی لوکوموتیو پرداخته خواهد شد.

۱۲-۲-۳ دنده^۲

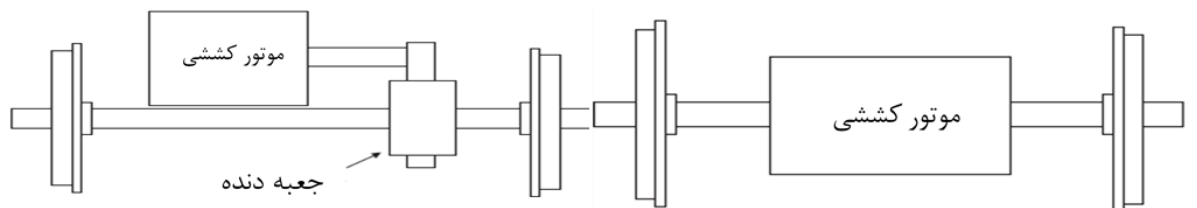
در سیستم انتقال سرعت موتور الکتریکی از طریق یک جعبه دنده کاهش پیدا می‌کند. که البته این کاهش سرعت باعث افزایش گشتاور روی چرخ‌ها خواهد شد.

در یک لوکوموتیو می‌توان موتورهای کششی را همانند شکل ۲ توسط جعبه دنده و یا بدون جعبه دنده

1 Traction motor

2 Gear & Pinion (الف)

(ب)



شکل ۳-۴ نحوه اتصال موتور به بوژی (الف) توسط جعبه دنده (ب) بدون جعبه دنده

با پیشرفت علم و انجام تحقیقات بیشتر در زمینه اتصال موتورها، اتصال بدون واسطه جعبه دنده طرفدار بیشتری در میان طراحان لوکوموتیوهای هیبریدی پیدا کرده است که علت را می توان در مزایای آن یافت. به طور کلی مزایای عمده این روش را می توان به طور خلاصه بصورت زیر بیان کرد: [۲۲]

حذف جعبه دنده موجب سادگی سیستم انتقال مکانیکی می شود که این امر موجب کاهش ارتعاشات و سروصدای تولیدی می شود.

از آن جایی که جعبه دنده یک قطعه مکانیکی است، حذف آن موجب افزایش بازدهی (۹۵٪ الی ۹۷٪) کل سیستم می شود.

قطعه دوار کمتر در سیستم به معنای افزایش طول عمر سیستم است.

جعبه دنده نیاز به روغن کاری منظم دارد که حذف آن موجب کاهش الزامات تعمیر و نگهداری می شود.

بنا به مشخصات لوکوموتیو، اگر چه گاهی اوقات حجم موتورها در حالت بدون جعبه دنده بزرگتر می شود، اما به طور کلی در این روش استفاده از فضا مطلوب تر است.

به عبارتی دیگر حذف جعبه دنده با وجود مزایای فراوان فاقد عیب نیست که عمده ترین ایراد گرفته شده به این طراحی را می توان به صورت زیر بیان نمود:

در شرایط یکسان در حالت اتصال بدون جعبه دنده، سیستم محرکه می بایست نیروی کششی بیشتر و در نتیجه گشتاور بزرگتر ایجاد کند که این امر ایجاب می کند که بعضاً از موتوری با حجم فعال بزرگتر استفاده شود.

مخزن سوخت^۱ ۳-۲-۱۳

یک لوکوموتیو سوخت مورد نیاز متناسب با سفر یا مأموریت خود را در مخزن های به نام مخزن

¹Fuel Tank 1

سوخت حمل می کند. بطور معمول مخزن سوخت در زیر بدنه لوکوموتیو قرار گرفته است. بسته به توان دیزل ژنراتور، این مخزن سوخت به طور معمول بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ گالن ظرفیت دارد. در لوکوموتیو علاوه بر مخزن سوخت، مخزن های حمل آب (حدود ۳۰۰ گالن) و روغن (۲۵۰ گالن) جهت خنک کاری موتور دیزلی تعبیه شده است.

۳-۲-۱ مخزن هوا^۱

در این مخزن، هوای فشرده شده توسط کمپرسور جهت سیستم ترمزگیری و دیگر سیستم ها نگهداری می شود. معمولاً مخزن هوا با توجه به نوع ساخت در کنار مخزن سوخت و در کف و یا در دماغه لوکوموتیو تعبیه می شود.

۳-۲-۲ کمپرسور هوا^۲

به منظور تامین هوای فشرده مورد نیاز سیستم ترمزگیری به یک کمپرسور هوا نیاز است. توان مورد نیاز کمپرسور معمولاً از طریق دیزل و بصورت مکانیکی تامین می شود. معمولاً کمپرسورها در قسمت دماغه و یا فضای زیر لوکوموتیو قرار دارند.

۳-۲-۳ محور محرکه^۳

خروجی اصلی موتور دیزلی از یک طرف به محور ژنراتور و از طرف دیگر به فن (دمنده) رادیاتور و کمپرسور متصل است. رادیاتور و فن خنک کننده آن معمولاً در سقف لوکوموتیو تعبیه شده اند. نیرو دیزل ژنراتور از طریق یک گیربکس (به منظور تغییر جهت نیرو به بالا) به فن ها منتقل می شود.

۳-۲-۴ رادیاتور و فن رادیاتور^۴

عملکرد رادیاتور در لوکوموتیو همانند عملکرد آن در خودرو است. در این سیستم، آب توزیع شده در اطراف موتور دیزلی باعث خنک شدن آن شده و پس از آن با عبور آب از رادیاتور و توسط فن ها دوباره خنک می شود.

۳-۲-۵ سیستم توربو-شارژر^۵

میزان توان خروجی از سیلندر دیزل ژنراتور با میزان سوخت آن متناسب است. از طرفی میزان سوخت احتراق شده با میزان هوای آن نیز متناسب است. بنابراین با افزایش هوای درون سیلندر می توان میزان سوخت محترقه و همچنین توان خروجی را افزایش داد. سیستم توربو شارژر میزان هوای درون هر

¹ Air reservoir

² Air compressor

³ Drive shaft

⁴ Radiator& Radiator fan

⁵ Turbo charger

سیلندر در فرایند احتراق را افزایش می‌دهد. توان مورد نیاز توربوشارژر از طرق گاز خروجی دیزل ژنراتور تامین می‌شود. استفاده از توربو شارژ تا ۵۰٪ توان خروجی موتور را افزایش می‌دهد.

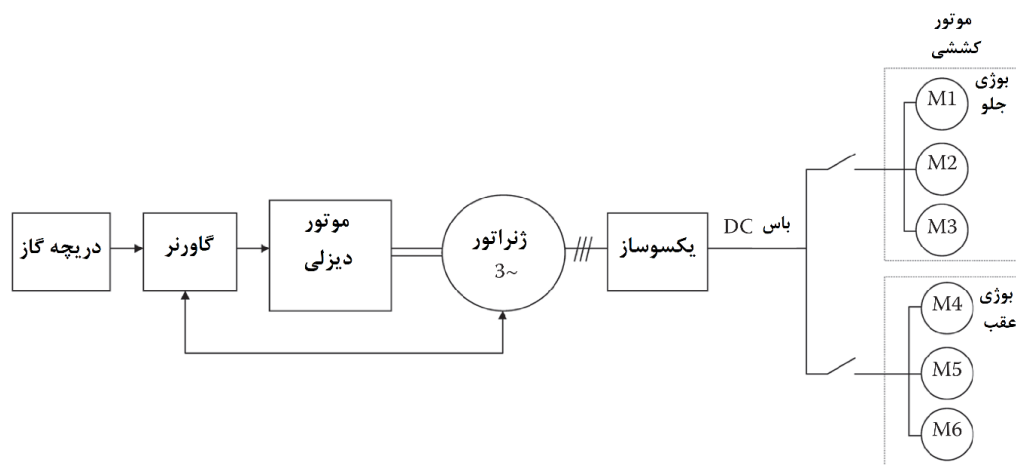
مهمترین مزیت این سیستم این است که با استفاده از گاز خروجی اگزوز دیزل و بدون اینکه سوخت بیشتری مصرف شود قدرت بیشتری دریافت می‌شود. از طرفی این سیستم هزینه تعمیر و نگهداری خاص خود را دارد که به همین علت در لوکوموتیوهای کوچک با قدرت پایین از سیستم صرف نظر شده و بدون آن طراحی می‌گردند. در جدول ۱-۳ مشخصات توانی و هزینه اجزاء اصلی بخش رانشی لوکوموتیو مانوری (شامل موتور دیزلی، ژنراتور، موتور الکتریکی) مورد استفاده در شرکت راه آهن جمهوری اسلامی نشان داده شده است.

۳-۳ انواع موتورهای کششی

موتورهای کششی بر اساس تغذیه به دو نوع جریان مستقیم و جریان متناوب تقسیم‌بندی می‌شوند [۳].

۳-۳-۱ موتورهای جریان مستقیم (DC)

موتورهای جریان مستقیم نوع سری قدیمی‌ترین نوع موتورهای کششی هستند. این نوع موتورها حدود ۴۰٪ از سهم موتورهای کششی لوکوموتیوها را به خود اختصاص داده‌اند [۱]. این نوع از موتورها گشتاوری با پاسخی سریع را برای حرکت لوکوموتیو فراهم می‌کنند. همچنین کنترل سرعت و گشتاور در آنها راحت است. ساختار مبدل الکترونیک قدرت سیستم محرکه آن به مراتب ساده‌تر از انواع AC است. ساختمان پیچیده، قیمت بالا و همچنین هزینه بالای نگهداری از معایب اصلی این نوع موتورها محسوب می‌شود. در شکل ۵-۳ توپولوژی مرسوم اتصال موتور DC به دیزل ژنراتور نشان داده شده است.



شکل ۵-۳ توپولوژی مرسوم اتصال موتور DC به دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو

۲-۳-۳ موتورهای جریان متناوب (AC)

با پیشرفت فناوری و توجیه اقتصادی در زمینه استفاده از مبدل‌ها، موتورهای کششی جریان متناوب توانستند پیشرفت چشمگیری داشته باشند، تا جایی که میزان چسبندگی^۱ بالاتر، قابلیت اطمینان بیشتر و تعمیر و نگهداری کمتر موجب محبوبیت بیشتر و استفاده روز افزون از این نوع موتورها در لوکوموتیوها شد. [۲۵]

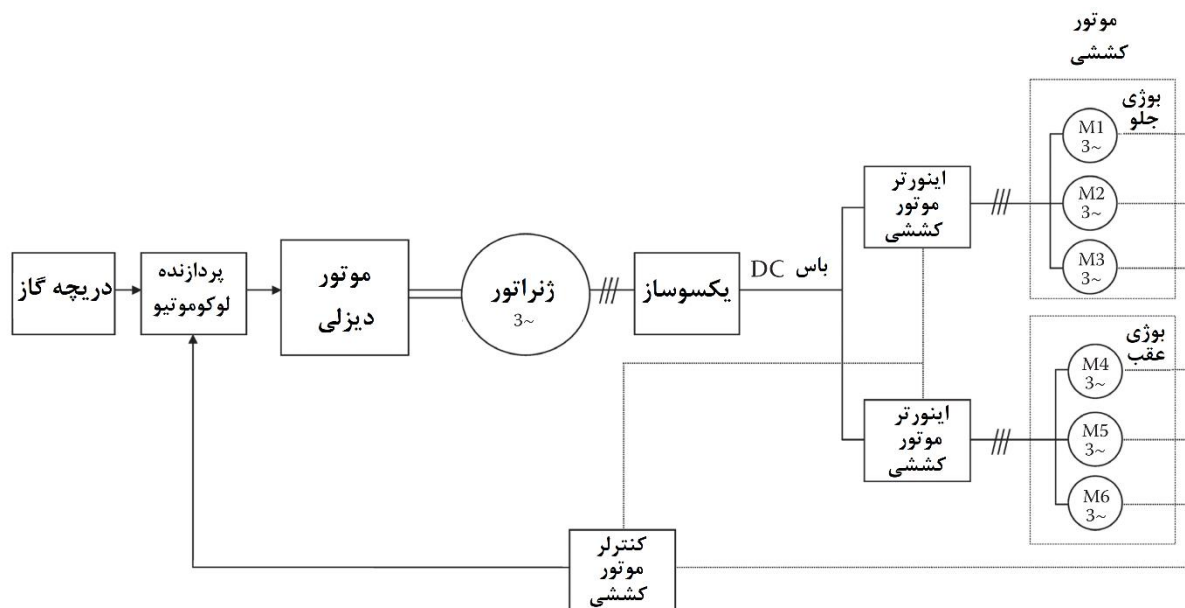
امروزه در موتورهای الکتریکی AC سهم عمده‌ای از موتورهای کششی لوکوموتیوها را به خود اختصاص داده‌اند. در موتورهای AC سرعت و گشتاور موتور از طریق کنترل پهنای پالس ولتاژ اینورتر متصل به آن کنترل می‌شود. در هر بوژی، موتورهای قرار گرفته بر روی هر محور یا می‌توانند توسط یک اینورتر مرکزی بصورت مشترک کنترل شوند و یا هر موتور بصورت مستقل توسط اینورتر مجزا کنترل شود. این دو ساختار در

شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ نشان داده شده است.

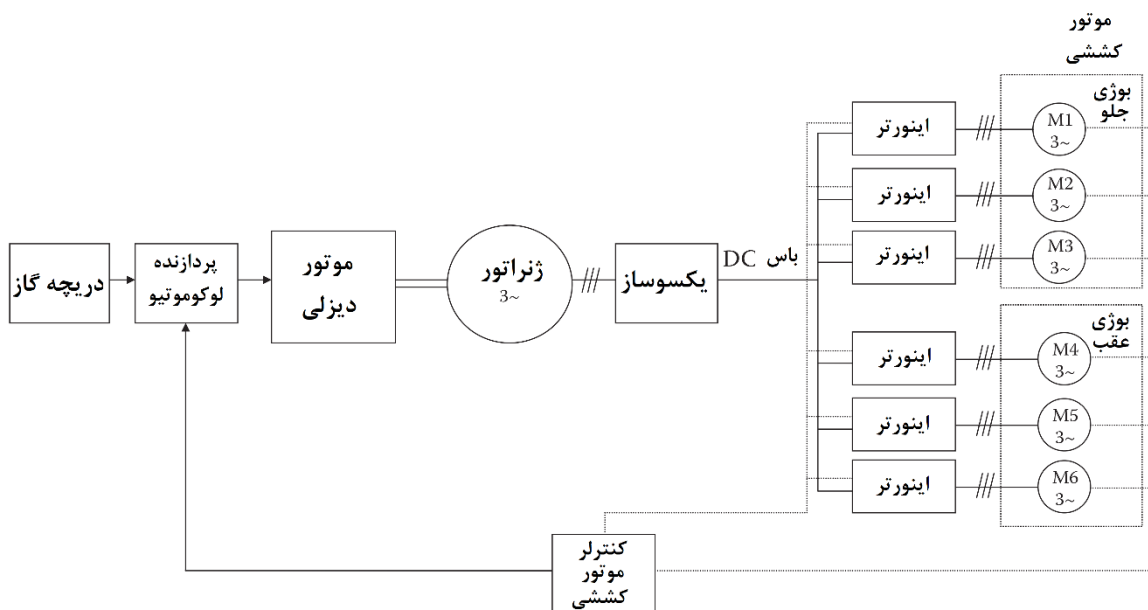
¹ Adhesion

جدول ۳-۱ مشخصات توانی و هزینه اجزاء اصلی بخش رانشی لوکوموتیوهای مانوری مورد استفاده در شرکت راه آهن جمهوری اسلامی

نوع لوکوموتیو	سازنده	نوع دیزل	توان (bHP)	نوع ژنراتور	قیمت ژنراتور (یورو)	تعداد موتور کششی	نوع موتور کششی	توان (bHP)	توان (kW)	قیمت موتور ترکشن (یورو)
G-12	and General Motor Electro-Motive Division (USA)	۱۲ سیلندر V شکل خورجینی مدل C567	۱۴۲۵	مدل DC D-12	۲۱۰۰۰	۴	DC مدل D-47B	۲۵۶	۲۶۵	۱۸۸۰۰
	General Motors Diesel (Canada)									
	Clyde Engineering (Australia)									
G-8	and General Motors Electro-Motive Division (USA)	۸ سیلندر مدل VC576 تک بلووری	۸۷۵	مدل DC D-15	۱۳۰۰۰	۴	DC مدل D-37	۲۱۹	۱۶۳	۱۱۶۰۰
G-16	Electro-Motive-Diesel General Motors Diesel Clyde Engineering MACOSA	۱۶ سیلندر مدل 567C	۱۸۰۰	مدل DC D-12-L	۲۶۵۰۰	۶	DC مدل D-47	۳۰۰	۲۲۳	۱۵۸۰۰
G-22	<u>Electro-Motive Division</u>	دیزل ۱۲ سیلندر V شکل خورجینی مدل 645E	۱۵۰۰- ۱۶۵۰ hp	مدل DC D-25-P	۲۳۵۰۰	۴	DC مدل D-77	۴۰۰	۲۹۸	۲۱۲۰۰
G-18	GM-EMD (Electro-Motive Diesel)	دیزل ۸ سیلندر مدل 645E	۱۱۰۰ hp	مدل DC D-25	۱۶۲۰۰	۴	DC مدل D-75	۲۷۵	۲۰۵	۱۴۶۰۰



شکل ۳-۶ نمونه‌ای از اتصال موتور AC به دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو با استفاده از اینورتر مرکزی در بوژی



شکل ۳-۷ نمونه‌ای از اتصال موتور AC به دیزل ژنراتور در یک لوکوموتیو با استفاده از اینورترهای مجزا

یکی از مزایای استفاده از موتورهای AC در مقایسه با موتورهای DC، ضریب چسبندگی بالاتر در

لوکوموتیوهای است که در آن از موتورهای AC استفاده می‌شود. در حقیقت ضریب چسبندگی چرخ و ریل، پارامتر بسیار تعیین کننده‌ای در کارکرد لوکوموتیو است و بیان کننده قابلیت لوکوموتیو برای تبدیل نیروی تولیدی به وسیله دیزل ژنراتور به نیروی موثر کششی است. این بدان معنا است که هر چه ضریب چسبندگی (یا در حقیقت چسبندگی) بین چرخ و ریل بیشتر باشد مقدار بیشتری از نیروی تولید شده توسط دیزل ژنراتور می‌تواند به نیروی رانشی تبدیل شود.

بر اساس تعریف، حداکثر نیروی کششی یک لوکوموتیو مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود: [۲۶]

وزن بر روی چرخ‌ها * ضریب چسبندگی چرخ و ریل = حداکثر نیروی کششی
چرخ‌ها

رابطه بالا بیان گر این موضوع است اگر نیروی موتورهای الکتریکی بیش از مقدار حداکثر نیروی کششی چرخ‌ها محاسبه شده در بالا باشد، چرخ‌ها شروع به لغزش می‌کنند.

ضریب چسبندگی نیز خود به پارامتر مهم دیگر وابسته است. یکی میزان اصطکاک بین چرخ و ریل که به کیفیت مسیر حرکت لوکوموتیو بستگی دارد و دیگری متغیر چسبندگی که به نوع سیستم رانشی، سیستم کنترل، کابین و شرایط چرخ‌ها بستگی دارد. بنابراین داریم :

متغیر چسبندگی لوکوموتیو * ضریب اصطکاک بین چرخ و ریل = ضریب
چسبندگی

ضریب اصطکاک پارامتری است که بیان گر اصطکاک بین چرخ‌ها است. ضریب اصطکاک بسته به شرایط ریل و چرخ می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. در شرایط آزمایشگاهی می‌تواند بالاتر از ۰/۷۸ باشد، اما به طور معمول و در شرایطی که ریل نسبتاً تمیز و خشک باشد، ضریب اصطکاک بین چرخ‌ها و ریل برای همه لوکوموتیوها تقریباً یکسان و بین ۰/۳۵ تا ۰/۵ است. در شرایط بد آب و هوایی مانند یخ زدگی و لیز شدن سطح ریل ممکن است این ضریب به ۰/۰۵ هم برسد. به عنوان مثال یک لوکوموتیو ۱۰۰ تنی با شرایط ایده آل (با فرض اینکه نیروی کافی توسط موتور تولید شود) می‌تواند یک نیروی کششی 350KN داشته باشد و در بدترین شرایط این نیرو به 50KN کاهش یابد. [۲۷]

متغیر چسبندگی لوکوموتیو نشان دهنده توانایی لوکوموتیو برای تبدیل اصطکاک موجود بین چرخ و ریل به نیروی کششی در چرخ‌ها است. می‌توان گفت این متغیر با معیارهای متفاوتی نظیر: سیستم رانشی الکتریکی (نوع موتور الکتریکی)، سیستم کنترل، کابین و شرایط چرخ‌ها در ارتباط است. این متغیر در لوکوموتیوهای قدیمی با موتور DC حدود ۰/۴۵ بود و در لوکوموتیوهای مدرن با موتور AC به حدود ۰/۹ افزایش پیدا کرده است بنابراین لوکوموتیوهای جدیدتر حدوداً دو برابر متغیر چسبندگی و

در نتیجه ضریب چسبندگی انواع قدیمی را دارا بوده و منجر به آن شده است که موتورهای کششی جریان مستقیم به جز در مواردی نادر جای خود را به موتورهای کششی جریان متناوب داده اند [۲۸].

سه دلیل ضریب چسبندگی بیشتر موتورهای کششی جریان متناوب که از مزایای این نوع موتور می باشد را توجیه می کند [۲۸]:

زمانی که لغزش اتفاق بیفتد موتورهای جریان مستقیم تمایل به افزایش سرعت دارند. با افزایش لغزش چرخ، ضریب اصطکاک نیز به سرعت به 0.1 یا کمتر کاهش می یابد و از آنجا که تمام موتورها به هم وصل می شوند، باید بار کل لوکوموتیو کاهش یابد. با این حال سیستم AC با روشی بسیار متفاوت عمل می کند. کنترل کننده فرکانس متغیر یک میدان چرخشی را ایجاد می کند که این میدان در حدود 1% سریعتر از موتور می چرخد. از آنجاییکه سرعت روتور نمی تواند بیش از سرعت میدان باشد لغزش چرخ حداقل (کمتر از 1%) بوده و کنترل کننده فرکانس متغیر فوراً بار بر روی محور را کاهش می دهد.

سیستم کنترل جریان مستقیم ساده و کارآمد است اما از آنجایی که توان محصول گشتاور و سرعت است این روش قادر به تولید گشتاور ثابت موتور نیست. بنابراین نیروی کششی بسته به سرعت به طور قابل توجهی برای تنظیمات هر دریچه گاز متفاوت بوده و در نتیجه بدست آوردن حداکثر چسبندگی غیرممکن است.

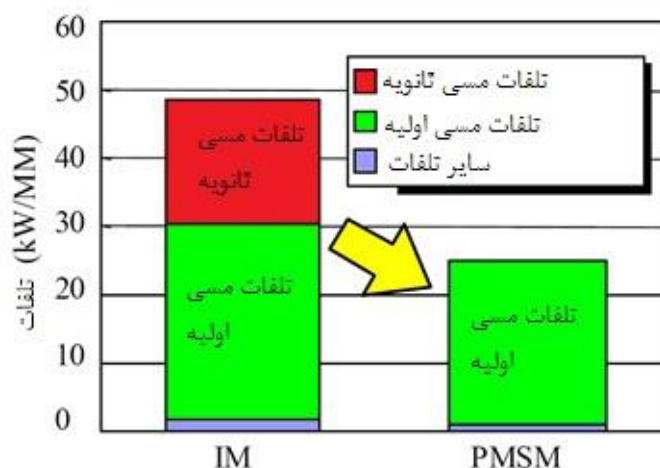
کنترل کننده فرکانس متغیر تاحد خاص گشتاور موتور را کنترل می کند و این امر باعث می شود که نیروی کششی ثابتی با ضریب چسبندگی بالا در دسترس ثابت باشد. کنترل لغزش چرخ با سرعت بالا هر گونه لغزش چرخ را خنثی می کند و در نتیجه گشتاور به سطح مطلوب و مورد انتظار می رسد.

جبران انتقال وزن سومین دلیل چسبندگی بهتر موتور کششی جریان متناوب است. هنگامی که یک لوکوموتیو در حال بارگیری است وزن تمایل دارد از محور جلو به محور عقب هر واگن منتقل شود. در هنگام حرکت وزن در محور جلویی ممکن است 20% کاهش یابد. از آنجایی که نیروی کششی متناسب با وزن می باشد و موتورهای جریان مستقیم از یک منبع تغذیه می شوند، نیروی کششی توسط محوری که بار سبکتری دارد تعیین شده و وزن معادل لوکوموتیو حدود 20% کاهش می یابد اما در حالت جریان متناوب، کنترل کننده فرکانس متغیر قادر به جبران انتقال وزن است. زمانی که محور جلویی سبک می شود کنترل کننده نیرو در آن محور کاهش می دهد و نیروی بیشتری را با حداقل لغزش چرخ ها بر روی محور عقب اعمال می کند.

با در نظر گرفتن کنترل لغزش و جبران انتقال وزن، موتورهای کششی جریان متناوب ضریب چسبندگی 37% تا 39% در مقابل ضریب چسبندگی 18% تا 20% موتورهای کششی جریان مستقیم دارند. به طور کلی یک لوکوموتیو با موتور کششی جریان متناوب نیروی کششی معادل یک لوکوموتیو

جریان مستقیم با وزن دو برابر سنگینتر از خود یا نیروی کششی دو برابر بیشتر از هم وزن خود را دارد [۷].

موتورهای کششی جریان متناوب خود به دو نوع القایی و موتور سنکرون تقسیم‌بندی می‌شوند. موتور سنکرون آهنربای دائمی^۱ یک نوع موتور سنکرون است که می‌تواند گشتاوری بالا در سرعت پایین را جهت کاربرد کششی حمل و نقل ریلی تامین کنند. لغزش متفاوت در چرخ‌های لوکوموتیو موتور را مجبور به کار در فرکانس‌های متفاوت می‌کند که با به کارگیری موتور سنکرون آهنربای دائمی برای کنترل هریک از موتورها می‌بایست از یک اینورتر جداگانه استفاده شود که در نتیجه هزینه عملیاتی کردن سیستم طراحی شده افزایش می‌یابد اما در موتورهای القایی با رسیدن به نسبت لغزش متفاوت به طور طبیعی و بدون هیچ مشکلی این امر حل می‌شود و در طراحی نیاز به افزایش اینورترها نیست. به همین علت موتورهای القایی رایج تر بوده و در کاربردهای حمل و نقل ریلی بیشتر استفاده می‌شوند. از طرفی در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، به دلیل سنکرون بودن سرعت روتور با میدان دوار جریانی بر روی روتور وجود نداشته و در نتیجه تلفات روتور نیز در این موتور وجود ندارد که می‌توان این موضوع را دلیل اصلی راندمان بهتر (حدود ۹٪) نسبت به موتور القایی مرسوم دانست (شکل ۱۳-۲) [۲۹].



شکل ۸-۳ مقایسه تلفات در موتور القایی و موتور PMSM [۲۹]

به طور کلی این دو موتور هریک دارای معایب و مزایا می‌باشند. در جدول ۲-۳ این دو نوع موتور الکتریکی با یکدیگر مقایسه شده و مزایا و معایب هرکدام جداگانه ذکر شده است. [۳۰]

جدول ۲-۳ مزایا و معایب موتور سنکرون آهنربای دائمی و موتور القایی در کاربردهای حمل نقل ریلی

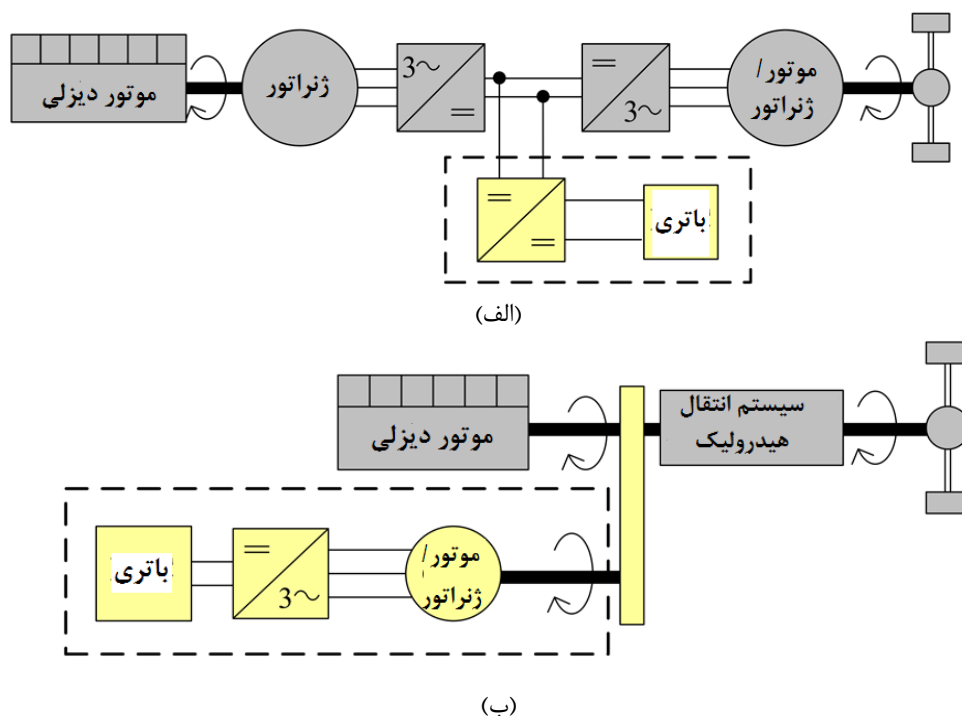
نوع موتور	موتور سنکرون آهنربای دائم	موتور القایی
-----------	---------------------------	--------------

¹ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

مزایا	✓ مناسب جهت استفاده در حالت بدون جعبه دنده ✓ بازدهی بهتر (تلفات کمتر) ✓ دمای عملکردی پایین تر ✓ سیستم خنک کننده ساده	✓ تحمل اضافه بار ✓ هزینه کمتر
معایب	✗ هزینه بالاتر ✗ خطر از بین رفتن خاصیت مغناطیسی آهن رباها بر اثر افزایش جریان یا افزایش دما ✗ نیاز هر موتور به اینورتر جداگانه ✗ ناحیه تضعیف شار محدود	✗ تلفات بیشتر در روتور ✗ سیستم خنک کننده پیچیده تر ✗ تعمیر و نگهداری جعبه دنده مربوطه

۳-۴ پیکره بندی لوکوموتیوهای هیبرید

پیکره بندی یک خودرو هیبریدی توسط چگونگی اتصال اجزا به یکدیگر و همچنین نحوه شارش توان در سیستم تعریف و طراحی می شود. به طور کلی این ساختار در لوکوموتیوهای هیبریدی به دو نوع سری و موازی همانند شکل ۳-۹ تقسیم بندی می شوند. [۳۱]



شکل ۳-۹ پیکره بندی لوکوموتیو هیبرید (الف) هایبرید سری (ب) هایبرید موازی

۳-۴-۱ هیبرید سری^۱

در این ساختار، همانطور که در شکل ۹-۳-الف نشان داده شده است، دو منبع انرژی دیزل-ژنراتور و باتری موتور الکتریکی کششی را تغذیه می‌کنند. در این ساختار موتور احتراقی و ژنراتور هیچگونه اتصال مکانیکی با موتور الکتریکی نداشته و موتور-ژنراتور توسط کنترل کننده در صورت نیاز روشن و یا خاموش می‌شود. بدلیل تشابه زیاد این ساختار با ساختار لوکوموتیو دیزل الکتریک، این پیکره‌بندی، پیکره‌بندی اصلی جهت طراحی لوکوموتیوهای هیبریدی مانوری است. [۳۲]. این موضوع به خوبی در بررسی موردی لوکوموتیوهای هیبریدی داخلی و خارجی گزارش دوم مشاهده شد.

۳-۴-۲ هیبرید موازی^۲

در این ساختار همانند ساختار سری، دو منبع انرژی نیز وجود دارد، اما با این تفاوت که علاوه بر اینکه این دو منبع با یکدیگر اتصال مکانیکی داشته هریک از آنها نیز به‌طور جداگانه به موتور الکتریکی کششی اتصال مکانیکی دارند و فعالیت می‌کنند. این ساختار به دلیل پیچیدگی و هزینه طراحی بالا در طراحی لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریک استفاده نشده و فقط در ساختارهای پایه دیزل-هیدرولیک مورد توجه قرار گرفته است [۳۳].

با توجه به این که در این پروژه ساختار پایه لوکوموتیو دیزل-الکتریک است، بنابراین پیکره‌بندی نوع هیبرید سری به عنوان پیکره‌بندی لوکوموتیو هیبرید مدنظر خواهد گرفت.^۳

۳-۵ سیستم کنترلی مورد نیاز

۳-۵-۱ استراتژی کنترلی

استراتژی کنترلی مجموعه‌ای از قوانین کنترلی است که در کنترل کننده وسیله نقلیه از پیش طراحی شده و دستور کار هر کدام از اجزاء را تعیین می‌کند. کنترل کننده دستورات عملکرد خود را از اپراتور و کلیه قطعات مورد نظر لوکوموتیو دریافت می‌کند و سپس مطابق با حالت‌های کنترلی تعریف شده تصمیم‌گیری می‌کند. بدین‌منظور بدیهی است عملکرد لوکوموتیو عمدتاً به کیفیت کنترل متکی است که

^۱Series Hybrid

^۲ Parallel Hybrid

^۳ شایان ذکر است در صورتی که خواسته شود یک خودرو هیبرید از پایه طراحی شود مسلماً هزینه خودرو هیبرید سری بیشتر است. ولی موضوع اینجا کاملاً متفاوت است و لوکوموتیو دیزلی (همانطور که بطور مشروح توضیح داده شد و در شکل‌ها کاملاً مشخص است) دارای ساختاری مشابه سیستم خودرو سری است یعنی دیزل ژنراتور، یکسوساز، اینورتر و موتور الکتریکی همانند ساختار هیبرید سری در آن قرار دارد و با استفاده یک مجموعه باتری به یک خودرو هیبرید سری تبدیل می‌شود. ولی در صورتی که خواسته شود ساختار موجود را به هیبرید موازی تغییر دهیم باید تمام اجزا تغییر کرده و از همه مهمتر اتصال مکانیکی موتور الکتریکی و دیزل تغییر کند.

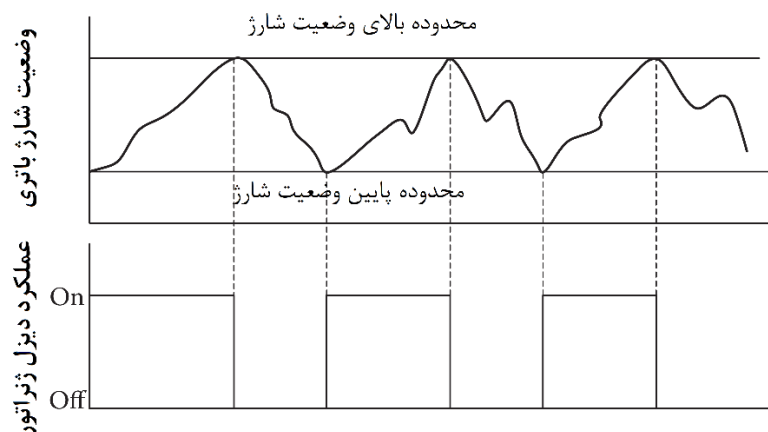
در آن استراتژی کنترل نقش اساسی دارد. [۳۴]

در واقع تعداد زیادی استراتژی کنترلی را می توان بر اساس نوع نیاز و مأموریت، جهت خودروهای برقی سری در نظر گرفت [۳۵] [۳۶] [۳۷]. از این بین دو استراتژی کنترلی پرکاربرد مطرح شده و در ادامه استراتژی مورد نظر مناسب برای لوکوموتیو هیبریدی مانوری به طور کامل شرح داده می شود.

۳-۵-۲ استراتژی کنترلی ترموستات^۱

استراتژی ترموستات یا روشن / خاموش، یک روش کنترلی قدیمی و شناخته شده است که در طراحی های کنترل کننده های هیبرید سری به کار گرفت می شود. بر اساس این استراتژی موتور احتراقی مطابق با وضعیت شارژ باتری^۲ روشن یا خاموش می شود. در این استراتژی، در ابتدا دو وضعیت حداکثر مقدار شارژ و دشارژ به گونه ای انتخاب می شوند که باتری در این محدوده بیشترین بازده و عمر خود را داشته باشد (شکل ۱۰-۳). [۳۵]

زمانی که سیستم ذخیره ساز انرژی^۳ به محدوده بالایی از پیش تعیین شده خود (حداکثر شارژ) نزدیک می شود موتور دیزلی خاموش شده و سیستم ذخیره ساز انرژی توان مورد نیاز موتورهای کششی را تامین می کند. از طرف دیگر، هنگامی که وضعیت شارژ سیستم ذخیره ساز انرژی به محدوده پایین خود برسد، موتور دیزلی - ژنراتور روشن و در نقطه کار بهینه^۴ خود شروع به فعالیت می کند و علاوه بر تامین انرژی مورد نیاز موتور الکتریکی، سیستم ذخیره ساز انرژی را شارژ می کند. [۳۶]



شکل ۱۰-۳ شرح عملکرد استراتژی کنترلی ترموستات

¹ Thermostat Control Strategy (TSC)

² State Of charge (SOC)

³ Energy Storage System (ESS)

⁴ Optimal Operating Point (OPP)

نحوه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی با توجه به وضعیت شارژ باتری در جدول ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳ عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی در استراتژی ترموستات

وضعیت موتور/ ژنراتور	وضعیت‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی	حالت قبلی موتور/ژنراتور
روشن	$SOC_{Upper} \geq SOC_{Bat}$	روشن
خاموش	$SOC_{Upper} < SOC_{Bat}$	
روشن	$SOC_{Lower} \geq SOC_{Bat}$ یا $P_{Demand} \geq P_{max.Bat}$	خاموش
خاموش	$SOC_{Lower} < SOC_{Bat}$ و $P_{Demand} < P_{max.Bat}$	

در این جدول SOC_{Upper} و SOC_{Lower} محدوده‌های بالایی و پایینی وضعیت شارژ باتری، SOC_{Bat} وضعیت شارژ باتری در لحظه مورد بررسی، P_{Demand} توان کششی مورد نیاز جهت حرکت لوکوموتیو $P_{max.Bat}$ بیشترین مقداری توان تزریقی به سیستم توسط ذخیره‌ساز انرژی هستند.

استراتژی ترموستات طراحی ساده‌ای دارد، اما در این روش کنترلی به شدت از باتری استفاده می‌شود به گونه‌ای که تعداد دفعات شارژ و دشارژ باتری در آن زیاد است. که باعث کاهش عمر باتری خواهد شد [۱۵]. از طرفی در این استراتژی کنترلی در زمان رسیدن وضعیت شارژ به مقدار حداقل خود دیزل ژنراتور می‌بایست هم توان مورد نیاز موتور الکتریکی و هم انرژی مورد نیاز شارژ باتری را تامین کند. بنابراین امکان کاهش سائز دیزل ژنراتور (که یکی از مزایای هیبریداسیون) است نخواهد بود. ازاینرو استراتژی کنترل ترموستات علیرغم سادگی برای لوکوموتیوهای هیبرید سری کاربردی نیست [۳۱].

۳-۵-۳ استراتژی کنترلی دنبال کننده توان^۱

در این استراتژی موتور-ژنراتور به عنوان منبع اول تولید توان شناخته شده و سعی می‌شود که همواره در محدوده بیشترین بازدهی فعالیت کند. در اینجا باتری زمانی که سیستم به توان بیشتری نیاز داشته باشد و یا موتور دیزلی از محدوده بازدهی بهینه خود خارج می‌شود، وارد مدار می‌شود [۳۷].

برخلاف استراتژی ترموستات که موتور دیزلی-ژنراتور فقط در دو وضعیت روشن و خاموش عمل می‌کرد، در این روش، کنترل کننده به گونه‌ای طراحی می‌شود که موتور دیزلی-ژنراتور بسته به وضعیت

¹ Power-follower control strategy (PCS)

شارژ باتری توان متغییری را برای لوکوموتیو فراهم آورد. بنابراین در استراتژی کنترلی دنبال کننده توان، به جز در مواردی که به توان بالایی نیاز نباشد و وضعیت شارژ باتری بیشتر از محدوده پایین آن باشد موتور دیزلی در نقطه کار بهینه خود، توان تولید می کند. در این روش استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی و دامنه تغییرات وضعیت شارژ آن کاهش یافته که این امر موجب افزایش عمر و بازده باتری می شود [۳۸].

به طور کلی عملکرد این استراتژی کنترلی را می توان به صورت جدول ۴-۳ تشریح کرد:

جدول ۴-۳ نحوه عملکرد استراتژی دنبال کننده توان

حالت های عملیاتی	وضعیت موتور دیزلی	سیستم ذخیره ساز انرژی
لوکوموتیو در پایین ترین محدوده سرعت خود کار میکند	خاموش	روشن
توان مورد نیاز بزرگتر از توان تولیدی موتور دیزلی باشد	روشن	روشن
کم شدن بیش از حد توان درخواستی از سمت بار	خاموش (خارج شدن از نقطه بهینه موتور)	روشن
رسیدن وضعیت شارژ باتری به پایین ترین محدوده تخلیه	روشن	خاموش (در حال شارژ)

با توجه به جدول ۴-۳ می توان گفت موتور دیزلی به جز در مواردی که از نقطه کار بهینه خود خارج می شود در باقی شرایط توان تولید می کند.

۴-۵-۳ استراتژی کنترلی مورد استفاده در لوکوموتیو مانوری هیبریدی HD300 محصول

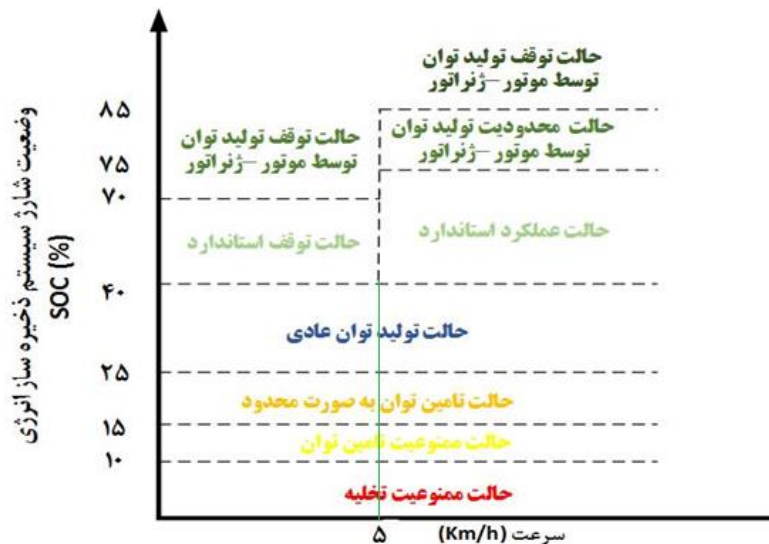
شرکت توشیبا ژاپن [۲۹]

مشخصات این لوکوموتیو در جدول ۲-۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می شود، در لوکوموتیو HD300، از موتور احتراقی-ژنراتور با توان خروجی کم استفاده شده است. بنابراین استراتژی کنترلی آن بیشتر بر اساس استفاده از ظرفیت سیستم ذخیره ساز انرژی طراحی شده است. از این رو حالت های مختلفی با توجه به وضعیت شارژ (SOC) سیستم ذخیره ساز انرژی و سرعت حرکت لوکوموتیو برای طراحی کنترل کننده همانند شکل ۱۱-۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۳ مشخصات فنی لوکوموتیو هیبرید HD300

لوکوموتیو	وزن (تن)	ساختار چرخ ها	سیستم هیبرید	کل توان خروجی	توان موتور دیزل	نوع باتری
سری HD300-توشیبا	۶۰	Bo-Bo	سری	۵۰۰ Kw	۲۰۵ Kw	لیتیوم-یون

همانطور که در شکل ۱۱-۳ مشخص است، در این استراتژی کنترلی به منظور افزایش طول عمر منبع انرژی محدودهای برای شارژ و دشارژ آن در نظر گرفته شده است. در اینجا این محدوده ۱۰ الی ۸۵ درصد ظرفیت نامی باتری است به گونه‌ای که ۱۰٪ را تخلیه کامل و ۸۵٪ را شارژ شدن کامل در نظر گرفته است و نحوه فعالیت اجزاء پیش‌ران را با توجه به این محدوده تعیین کرده است. با در نظر گرفتن مطالب گفته شده تامین توان کل سیستم در هر وضعیت را به می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

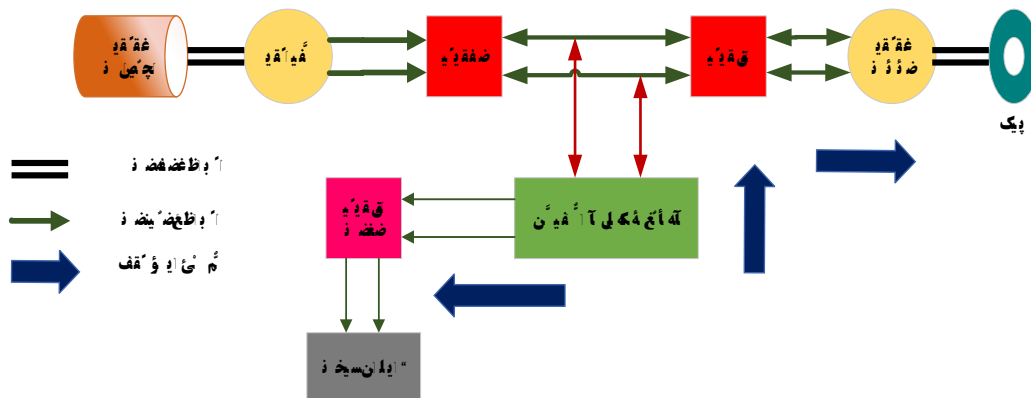


شکل ۱۱-۳ شمای استراتژی کنترلی در لوکوموتیو هیبرید HD300

❖ حالت توقف تولید توان توسط موتور احتراقی-ژنراتور

طبق استراتژی کنترلی شکل در وضعیت شارژ بالا دیزل ژنراتور خاموش شده و توان رانشی لوکوموتیو و همچنین توان بارهای جانبی توسط باتری تامین می‌شود. در سرعت‌های پایین زیر ۵ km/h محدوده بالایی وضعیت شارژ برابر ۷۰٪ و در سرعت‌های بیش از ۵ km/h محدوده بالایی برابر ۸۵٪ وضعیت شارژ در نظر گرفته شده است. که علت این امر نیاز به انرژی زیاد جهت تامین بارهای کششی مأموریت مورد نظر و مصارف جانبی (خنک کاری، روشنایی و...) در محدوده سرعت بالا گزارش شده است [۱۸]. اما در مقابل در سرعت کمتر از ۵ کیلومتر به علت نیاز به انرژی کم جهت تامین توان بارهای کششی محدوده ۷۰٪ انتخاب شده است [۱۸].

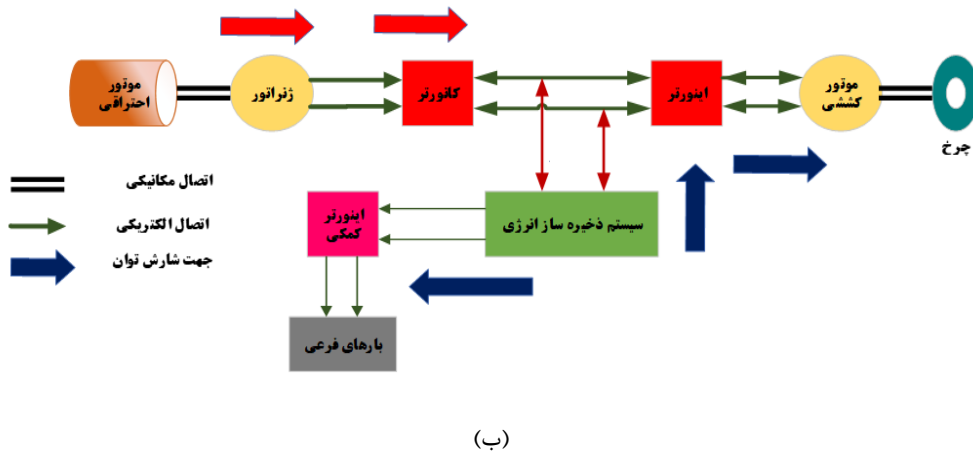
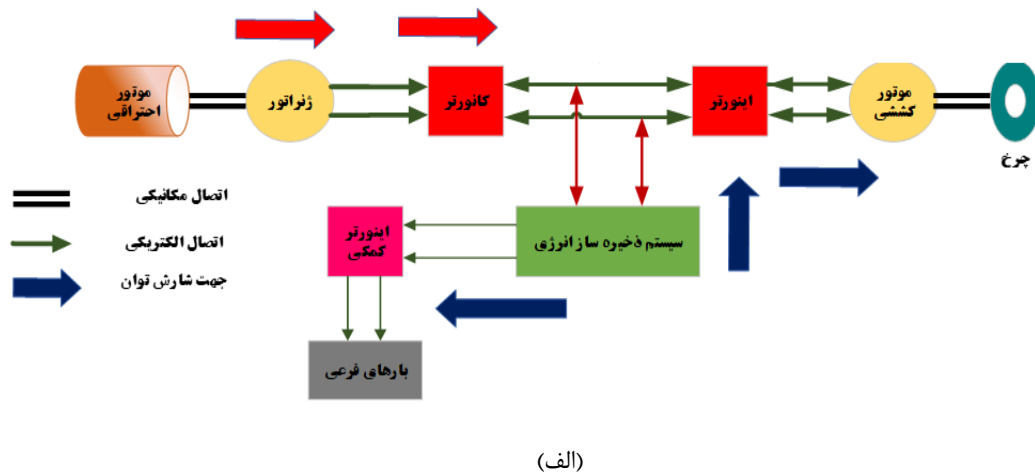
شکل ۱۲-۳ وضعیت تامین توان در حالت توقف تولید توان توسط موتور دیزلی-ژنراتور را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲-۳ حالت توقف تولید توان توسط موتور احتراقی-ژنراتور

❖ حالت محدودیت تولید توان توسط موتور-ژنراتور

این حالت عملکردی در سرعت‌های بیش از 5 km/h و محدوده وضعیت شارژ مناسب بین ۷۵٪ تا ۸۵٪ اتفاق می‌افتد. در این وضعیت عملکردی سیستم ذخیره ساز انرژی به سیستم توان تزریق می‌کند و و موتور احتراقی-ژنراتور حالت عملکردی قبل از ورود به این مرحله را حفظ می‌کند (شکل ۱۳-۳). بدین منظور که اگر قبل از ورود به این حالت مشغول تولید توان بوده در این مرحله نیز توان تولید کرده (شکل ۱۳-۳-الف) و اگر قبل از ورود به این حالت خاموش بوده در این مرحله نیز خاموش می‌شود (شکل ۱۳-۳-ب).



شکل ۱۳-۳ حالت محدودیت تولید توان توسط موتور دیزلی-ژنراتور (الف) تزریق توان به سیستم توسط سیستم ذخیره ساز انرژی در حالت خاموش بودن موتور-ژنراتور و (ب) تزریق توان به سیستم توسط سیستم ذخیره ساز انرژی و موتور دیزلی-ژنراتور

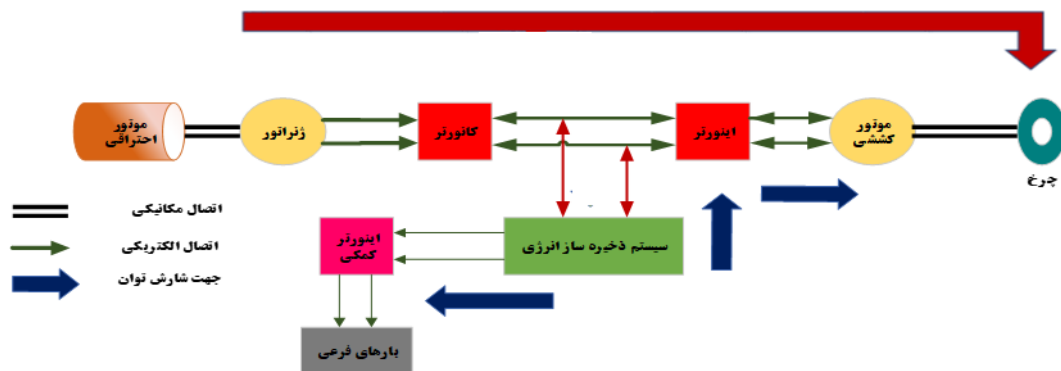
لازم به ذکر است که سیستم ذخیره ساز انرژی در هر دو حالت توان مورد نیاز مصارف جانبی مورد نظر را بدون هیچ مشکلی تامین می کند و هیچ اختلالی در فرآیند کنترلی سیستم به وجود نمی آید.

❖ حالت عملکرد استاندارد

در این مرحله لوکوموتیو مشغول انجام ماموریت خواسته شده خود می باشد و تا زمانی توان درخواستی از سمت موتورهای القایی کششی بیش از توان سیستم ذخیره ساز انرژی نباشد سیستم به کار خود ادامه می دهد اما در صورتی که توان مورد نیاز در چرخ ها از توان سیستم ذخیره ساز بیشتر باشد، ژنراتور روشن و مشغول انجام فعالیت شده و موازنه توان را در سیستم به وجود می آورد تا لوکوموتیو ماموریت خود را بدون مشکل انجام دهد.

شکل ۱۴-۳ نحوه شارژ توان در سیستم و برقراری تعادل توان را در حالتی که سیستم ذخیره ساز انرژی نتواند به تنهایی انرژی لازم برای بار کششی را فراهم کند در حالت عملکرد استاندارد نشان می-دهد.

در این حالت همانند حالت‌های قبلی سیستم ذخیره ساز انرژی وظیفه تامین انرژی بارهای جانبی را دارد.



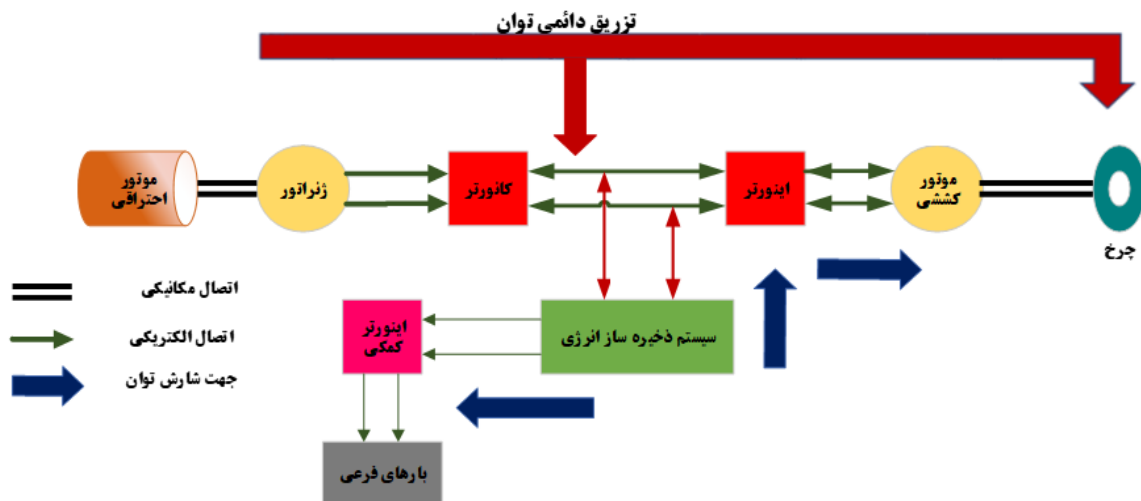
شکل ۱۴-۳ حالت عملکرد استاندارد

❖ حالت توقف استاندارد

در این هیچ گونه تغییری در رفتار موتور احتراقی-ژنراتور رخ نمی‌دهد و سیستم کنترلی مطابق با وضعیت مرحله قبل آن را کنترل می‌کند. به گونه‌ای که اگر در وضعیت قبل دیزل ژنراتور روشن بوده در این مرحله نیز روشن خواهد ماند و اگر خاموش بوده در همان حالت قبلی یعنی خاموش باقی می‌ماند.

❖ حالت تولید توان عادی

در این مرحله به علت کاهش انرژی سیستم ذخیره ساز انرژی و پایین بودن وضعیت شارژ آن، موتور احتراقی-ژنراتور همیشه در حال فعالیت بوده و به سیستم توان تزریق می‌کند و می‌تواند سیستم ذخیره ساز انرژی را نیز شارژ کند. اما دانستن این نکته ضروری است که سطح سیستم ذخیره ساز انرژی با وجود پایین بودن وضعیت شارژ هنوز از سطح تخلیه کامل فاصله داشته و می‌تواند به موتورهای کششی توان تزریق کند تا از عملکرد موتور احتراقی-ژنراتور در نقطه بهینه اطمینان کامل حاصل شود و همچنین مصارف جانبی نیز توسط سیستم ذخیره ساز انرژی تغذیه شده و به فعالیت خود ادامه دهد. این مرحله از روش کنترل در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۵-۳ حالت تولید توان عادی

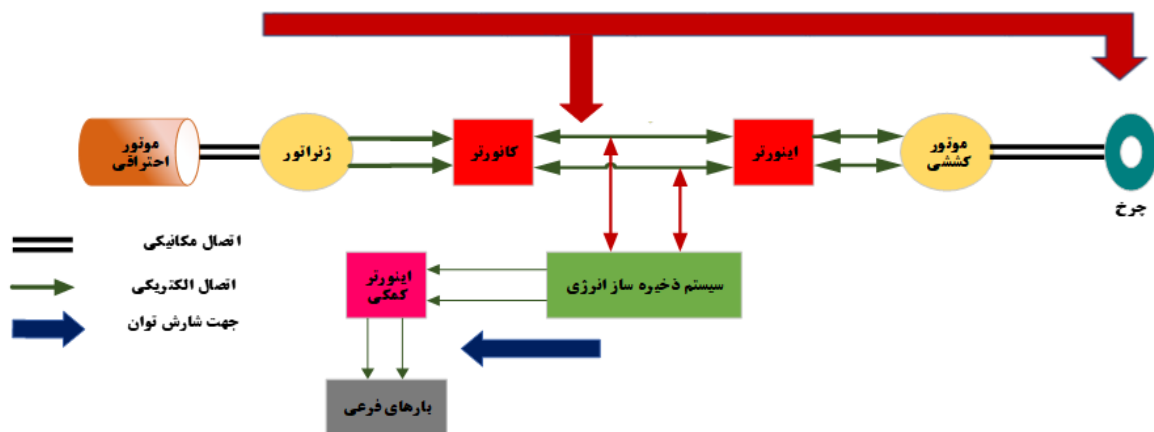
در نگاه اول ممکن است نحوه شارش توان در شکل ۱۴-۳ و شکل ۱۵-۳ یکسان به نظر برسند اما تفاوت این دو حالت در آنجایی است که در شکل ۱۴-۳ مربوط به حالت عملکرد استاندارد بوده و موتور احتراقی-ژنراتور در حالت عادی خاموش است و زمانی مشغول به فعالیت می شود که توان لازم برای انجام ماموریت در آن لحظه از ماکزیمم توان سیستم ذخیره ساز انرژی بیشتر باشد. اما شکل ۱۵-۳ مربوط به وضعیت تولید توان عادی بوده و وضعیت شارژ پایین بوده (۲۵٪ تا ۴۰٪) و موتور-احتراقی همواره روشن است و در نقطه کار بهینه خود به سیستم توان تزریق می کند.

❖ حالت تامین توان به صورت محدود

در این حالت وضعیت شارژ سیستم ذخیره ساز انرژی کمتر از محدوده حالت تولید توان عادی یعنی بین ۱۵٪ تا ۲۵٪ است و به طور محدودی می تواند به موتور کششی القایی توان تزریق کند. بنابراین موتور احتراقی-ژنراتور همیشه روشن است. به طور کلی می توان گفت در این وضعیت موتور احتراقی-ژنراتور دارای نقش بیشتری در تزریق توان به مجموعه است.

❖ حالت ممنوعیت تامین توان

در این وضعیت سیستم ذخیره ساز انرژی دیگر هیچ گونه انرژی الکتریکی به موتور کششی نمی دهد و عملکرد خود را متوقف می کند و موتور احتراقی-ژنراتور وظیفه تامین انرژی را به طور کامل بر عهده خواهد داشت. با این وجود مطابق شکل ۲۱-۳ سیستم ذخیره ساز انرژی می تواند به مصارف جانبی توان تزریق کند.



شکل ۱۶-۳ حالت ممنوعیت تامین توان

❖ حالت ممنوعیت تخلیه

در این حالت با توجه وضعیت شارژ سیستم ذخیره ساز انرژی به پایین ترین مقدار خود می‌رسد به طوری که موتور احتراقی-ژنراتور به طور دائم مشغول به فعالیت است و سیستم ذخیره ساز انرژی در این وضعیت هیچ گونه فعالیتی نداشته و توسط ترمز بازایی و یا موتور احتراقی-ژنراتور شارژ می‌شود. در این حالت مصارف جانبی مستقیم توسط موتور احتراقی-ژنراتور تغذیه می‌شود.

جدول ۶-۳ تمامی مراحل ۸ گانه استراتژی کنترلی مدیریت انرژی لوکوموتیو هیبرید مانوری HD300 را بیان می‌کند [۲۹]. همانطور که مشاهده می‌شود کنترل کننده در هر مرحله با توجه به سطح انرژی سیستم ذخیره ساز، توان درخواستی و حالت‌های تعریف شده فرمان‌های لازم را صادر می‌کند. طبق اعلام مرجع [۲۹]، با استفاده از این استراتژی کنترلی تا حدود ۳۶٪ از مصرف سوخت لوکوموتیو کاهش یافت.

همانطور که در این بخش مشاهده شد، در استراتژی کنترلی مورد استفاده در لوکوموتیو HD300 هدف بر آن بود که همواره موتور دیزلی در نکته بهینه کاری خود فعالیت کند تا بتواند بیشترین بازدهی را داشته باشد که مزیت اصلی این استراتژی کنترلی محسوب می‌شود. اما می‌توان درباره این استراتژی کنترلی به چند نکته اشاره کرد: اول اینکه همانند استراتژی کنترلی ترموستات در اینجا نیز در بخشی از نواحی کاری نظیر محدوده توقف تولید توان توسط موتور احتراقی-ژنراتور تمامی توان خروجی و مورد نیاز موتور کششی توسط باتری تأمین شود بنابراین نیاز است تا در ساختار این نوع لوکوموتیو از باتری‌های توان بالا استفاده شود که هزینه سیستم ذخیره ساز را افزایش می‌دهد. همچنین در این استراتژی کنترلی محدوده عملکردی وضعیت شارژ باتری در طی یک سیکل حرکتی بالا است (از ۱۰٪ تا

بیش از ۸۵٪) که همانطور که در بخش‌های آتی توضیح داده می‌شود عمق دشارژ بالای باتری باعث کاهش عمر چرخه‌ای آن می‌شود.

جدول ۳-۶ وضعیت‌های عملکردی ۸ گانه استراتژی کنترل مدیریت انرژی در لوکوموتیو HD300

نام حالت	تولید موتور احتراقی	گرم کردن موتور احتراقی	توان دهی سیستم ذخیره ساز انرژی به موتور گششی	بازیابی ترمزی	مصارف جانبی
توقف تولید توان	همیشه خاموش	---	امکان توان دهی	امکان شارژ سیستم ذخیره ساز انرژی وجود دارد	در حالت تامین
محدودیت تولید توان	بدون تغییر وضعیت	---			
عملکرد استاندارد	کافی نبودن ماکزیمم توان سیستم ذخیره ساز انرژی	نیاز نیست			
	توقف استاندارد	بدون تغییر وضعیت			
تولید توان عادی	همیشه در حال فعالیت	نیاز است			
تامین توان به صورت محدود			عدم امکان توان دهی		
ممنوعیت تامین توان			توقف		
ممنوعیت تخلیه					

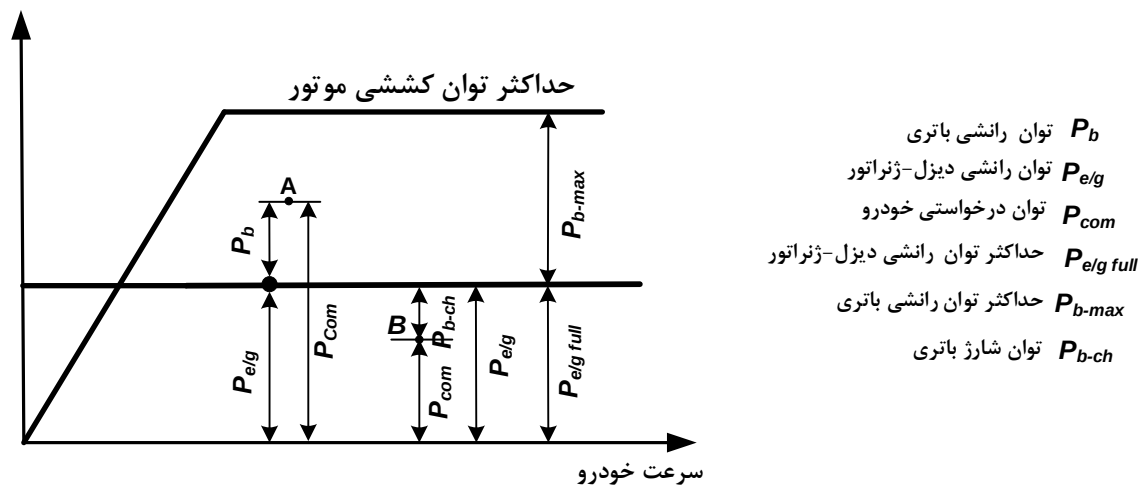
۳-۵-۵ استراتژی کنترلی بیشینه وضعیت شارژ^۱ باتری

در این استراتژی کنترلی هدف بر آن است تا وضعیت شارژ باتری همواره در بیشینه مقدار خود نگه‌داشته شود تا خودرو بتواند همواره عملکردهای درخواستی را پاسخگو باشد [۲۴].

عملکرد این استراتژی کنترلی در شکل ۱۷-۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، دیزل-ژنراتور به همراه باتری، توان حداکثری مورد نیاز را تامین می‌کنند. همچنین اگر توان درخواستی بیش از توان قابل تامین توسط دیزل-ژنراتور باشد، همانطور که در نقطه کار A در شکل نشان داده است، باتری باقی توان مورد نیاز را تامین خواهد کرد. حال اگر توان درخواستی کمتر از حداکثر توان قابل تامین توسط دیزل-ژنراتور باشد (نقطه کار B)، در صورتی که وضعیت شارژ باتری کمتر از میزان حداکثر خود باشد، دیزل ژنراتور با توانی بیشتر فعالیت کرده و علاوه بر تامین توان درخواستی، توان مورد نیاز شارژ باتری را نیز تامین خواهد کرد. در نقطه کار B اگر وضعیت شارژ باتری در وضعیت

¹ Maximum state of charge

حداکثری باشد، دیزل-ژنراتور فقط همان توان درخواستی را تامین خواهد کرد.



شکل ۱۷-۳ شرح عملکردی استراتژی کنترلی پیشینه وضعیت شارژ باتری

در استراتژی کنترلی فوق به دلیل اینکه باتری همواره به عنوان یک منبع انرژی کمکی در کنار دیزل-ژنراتور قرار دارد، می توان بسته به سیکل رانشی خودرو سائز دیزل-ژنراتور را کاهش داد. که این خود یکی از مزایای این استراتژی کنترلی محسوب می شود. پس مشاهده می شود از حیث اقتصادی استراتژی کنترلی پیشینه وضعیت شارژ باتری بدلیل امکان کاهش سائز دیزل ژنراتور، مناسب تر از استراتژی کنترلی ترموستات است. همچنین استراتژی کنترلی پیشینه وضعیت شارژ، با نگر داشتن وضعیت شارژ باتری در وضع مطلوب امکان دسترسی به ظرفیت بالاتر باتری را برای لوکوموتیو فراهم می آورد.

۳-۵-۶ استراتژی کنترلی پیشنهادی

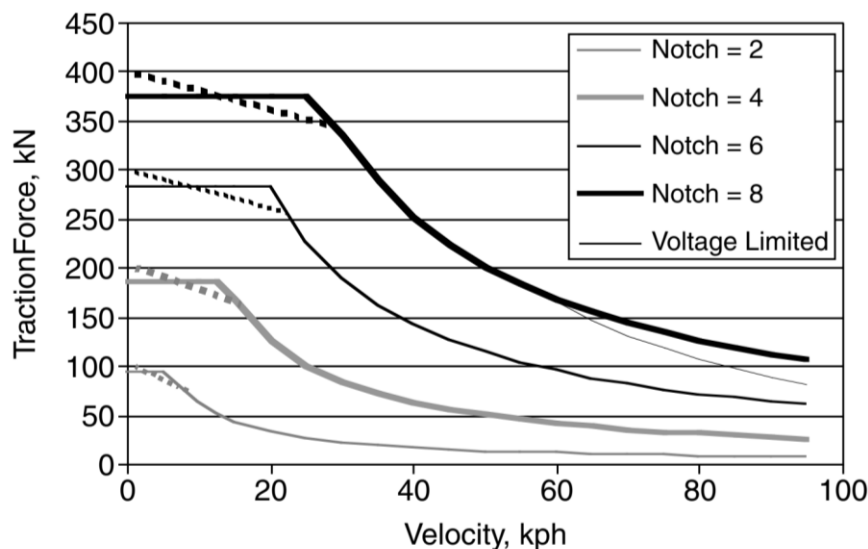
در یک لوکوموتیو دیزل الکتریک، می توان میزان توان و ولتاژ خروجی دیزل-ژنراتور را در سطوح مختلف محدود کرد. بدین وسیله می توان میزان توان ورودی موتور و در نتیجه سرعت لوکوموتیو را کنترل کرد. این کار را می توان با تغییر ناچ^۱ (که در ایران بیشتر به آن دنده گفته می شود) انجام داد. در حقیقت در هر ناچ (دنده) میزان بیشنه باز شدن دریچه گاز^۲ و جریان دیزل-ژنراتور جهت تامین توان و نیروی کششی موتورهای الکتریکی محدود می شود. بنابراین بر اساس توان درخواستی، شماره دنده متغیر است. در شکل ۱۸-۳ میزان توان کششی در دنده های مختلف در یک لوکوموتیو نمونه نشان داده شده است [۳۹]. همانطور که در شکل مشاهده می شود در دنده پایین با توجه به محدود بودن ولتاژ و در

¹ notch

² Throttle notch

نتیجه جریان خروجی ژنراتور نیرو کششی موتور الکتریکی محدود بوده و کم است. در دنده‌های بالاتر میزان پاشش سوخت دیزل ژنراتور بیشتر شده و ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور بیشتر است. بنابراین نیروی کششی موتور الکتریکی همانطور که در شکل نشان داده شده است بیشتر است.

معمولاً در لوکوموتیوها ۸ دنده مختلف با تواندهی متفاوت وجود دارد [۱]. در هر کدام از دنده‌ها سیستم کنترلی دیزل ژنراتور به گونه‌ای عمل می‌کند که موتور دیزلی در ناحیه بهینه عملکردی خود فعالیت کند. علاوه بر ۸ دنده فعال لوکوموتیو که میزان توان کششی خروجی را تعیین می‌کنند، یک دنده خنثی ۲ وجود دارد. لوکوموتیو در حالت سکون در دنده خنثی قرار گرفته و توان محدود تولید شده در این دنده صرف مصارف داخلی لوکوموتیو، همچون گرم نگهداشتن آب و روغن، مصارف کابین، تجهیزات کنترلی، شارژ باتری و تامین فشار هوای ترمز و دیگر مصارف غیر کششی می‌شود.



شکل ۱۸-۳ میزان توان کششی در دنده‌های مختلف در یک لوکوموتیو نمونه

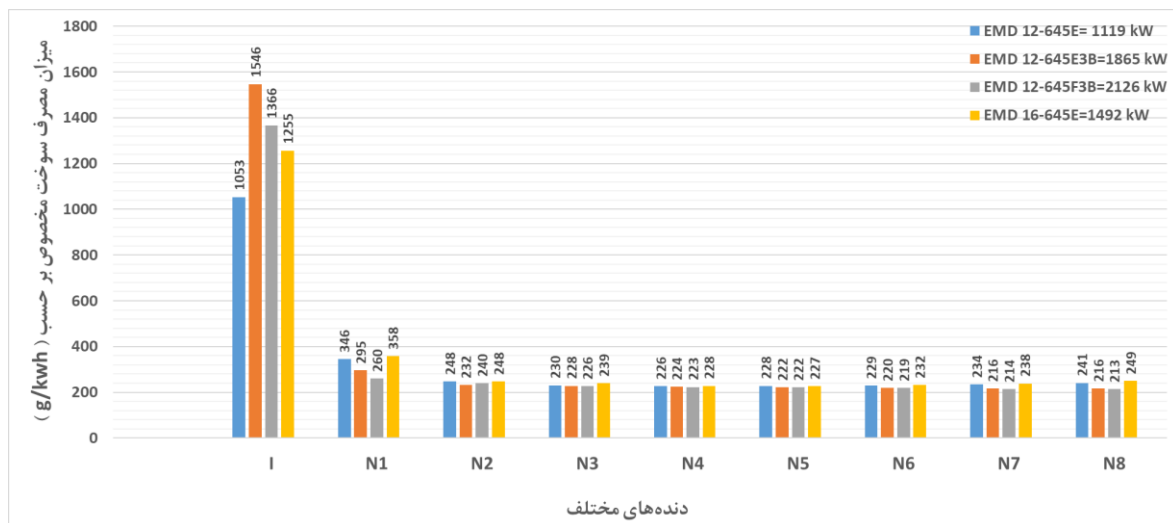
در هر دنده میزان مصرف سوخت مخصوص ۳ برحسب گرم به ازای کیلووات ساعت تعریف می‌شود که می‌توان با استفاده از این مقدار، میزان مصرف سوخت را در هر سیکل حرکتی لوکوموتیو محاسبه کرد.

در شکل ۱۹-۳ و شکل ۲۰-۳ نمودار مصرف سوخت مخصوص چند نوع دیزل-ژنراتور مختص لوکوموتیوهای مانوری شرکت جنرال موتورز با توان‌های نامی مختلف به ازای دنده‌های مختلف نشان داده شده است [۴۰].

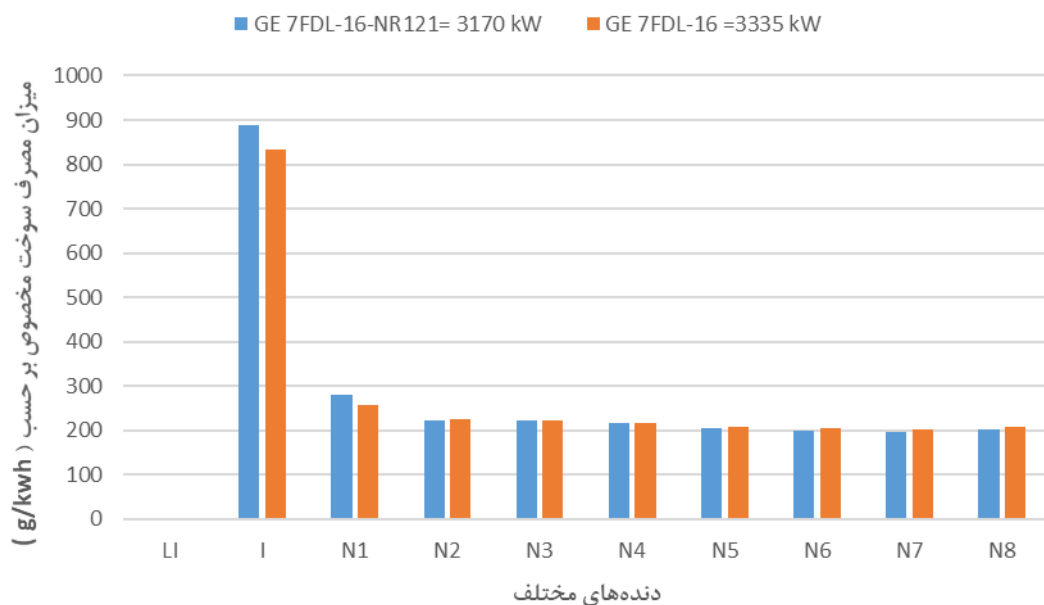
^۱ شایان ذکر است اگر چه در برخی لوکوموتیوهای مدرن تعداد دنده تغییر کرده، ولی کماکان به دلایل عملکردی تعداد ۸ دنده به عنوان ساختار رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

^۲ Idle

^۳ specific fuel consumption



شکل ۱۹-۳ مصرف سوخت مخصوص چند نوع دیزل-ژنراتور مختص لوکوموتیوهای مانوری شرکت جنرال موتورز با توان‌های نامی مختلف به ازای دنده‌های مختلف



شکل ۲۰-۳ مصرف سوخت مخصوص دو نوع دیزل-ژنراتور مختص لوکوموتیوهای مانوری شرکت جنرال الکتریک به ازای دنده‌های مختلف

همانطور که به خوبی در شکل ۱۹-۳ و شکل ۲۰-۳ مشاهده می‌شود، میزان مصرف سوخت مخصوص در دنده خنثی چندین برابر مصرف سوخت مخصوص در دیگر دنده‌ها است. بنابراین اینگونه به نظر

می‌رسد که در صورت هیبرید کردن لوکوموتیو و با استفاده از استراتژی کنترلی مناسب اگر بتوان دیزل - ژنراتور را در حالت سکون لوکوموتیو (دنده خنثی) خاموش کرد مقدار قابل توجهی سوخت صرفه جویی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار مصرف سوخت مخصوص در دیگر دنده‌ها نزدیک به یکدیگر است.

با توجه به نیاز تامین توان کششی بالا جهت حرکت لوکوموتیو مانوری (بخصوص در دنده‌های بالا) و در نتیجه نیاز به انرژی زیاد در صورت استفاده از باتری به عنوان منبع کمکی تأمین کننده انرژی، استراتژی کنترلی پیشینه وضعیت شارژ باتری به عنوان پایه استراتژی کنترلی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این استراتژی با نگه داشتن میزان ذخیره انرژی باتری در وضعیت پیشینه، باتری این توانایی را خواهد داشت که در صورت نیاز به همراهی دیزل - ژنراتور همواره توانایی تامین توان مورد نیاز را داشته باشد. همچنین با استفاده از این استراتژی کنترلی می‌توان سایز دیزل - ژنراتور را نسبت به حالت غیر هیبریدی کاهش داد.

در شکل ۲۱-۳ فلوچارت استراتژی کنترلی پیشنهادی به صورت مرحله به مرحله نشان داده شده است.

در ادامه به شرح مرحله به مرحله استراتژی کنترلی مربوطه براساس شکل ۲۱-۳ پرداخته می‌شود : (شماره تمامی مراحل نیز در شکل ۲۱-۳ نشان داده شده است)

در اولین مرحله از استراتژی کنترلی با استفاده از سیگنال‌های دریافتی از دنده فعال لوکوموتیو ، وضعیت حرکت لوکوموتیو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر لوکوموتیو در حال توقف باشد (دنده خنثی فعال باشد) به منظور کاهش مصرف سوخت، دیزل - ژنراتور خاموش می‌شود .

اگر لوکوموتیو در حالت حرکت و یا فرمان دنده بغیر از دنده خنثی باشد، در این مرحله بررسی می‌شود که فرمان توان، کششی (بزرگ تر از صفر) و یا ترمزی (کوچکتر از صفر) است که به راحتی می‌توان با بررسی سیگنال خروجی ترمز این موضوع را بررسی کرد.

اگر فرمان توان، ترمزی باشد، وضعیت شارژ باتری با مقدار بهینه وضعیت شارژ استراتژی کنترلی (پیشینه وضعیت شارژ باتری) مقایسه می‌شود.

اگر وضعیت شارژ باتری^۱ کمتر از مقدار بهینه باشد، یعنی باتری توانایی جذب انرژی ترمزی را داشته

¹State of charge

باشد، انرژی ترمزی توسط باتری جذب می‌شود.

اگر وضعیت شارژ باتری بیشتر از مقدار بهینه باشد، به گونه‌ای که باتری توانایی جذب انرژی ترمزی را نداشته باشد، از ترمز مکانیکی لوکوموتیو استفاده می‌شود.

اگر سیگنال توان از نوع کششی باشد، در این مرحله میزان توان درخواستی با حداکثر مقدار توان دیزل-ژنراتور مقایسه می‌شود.

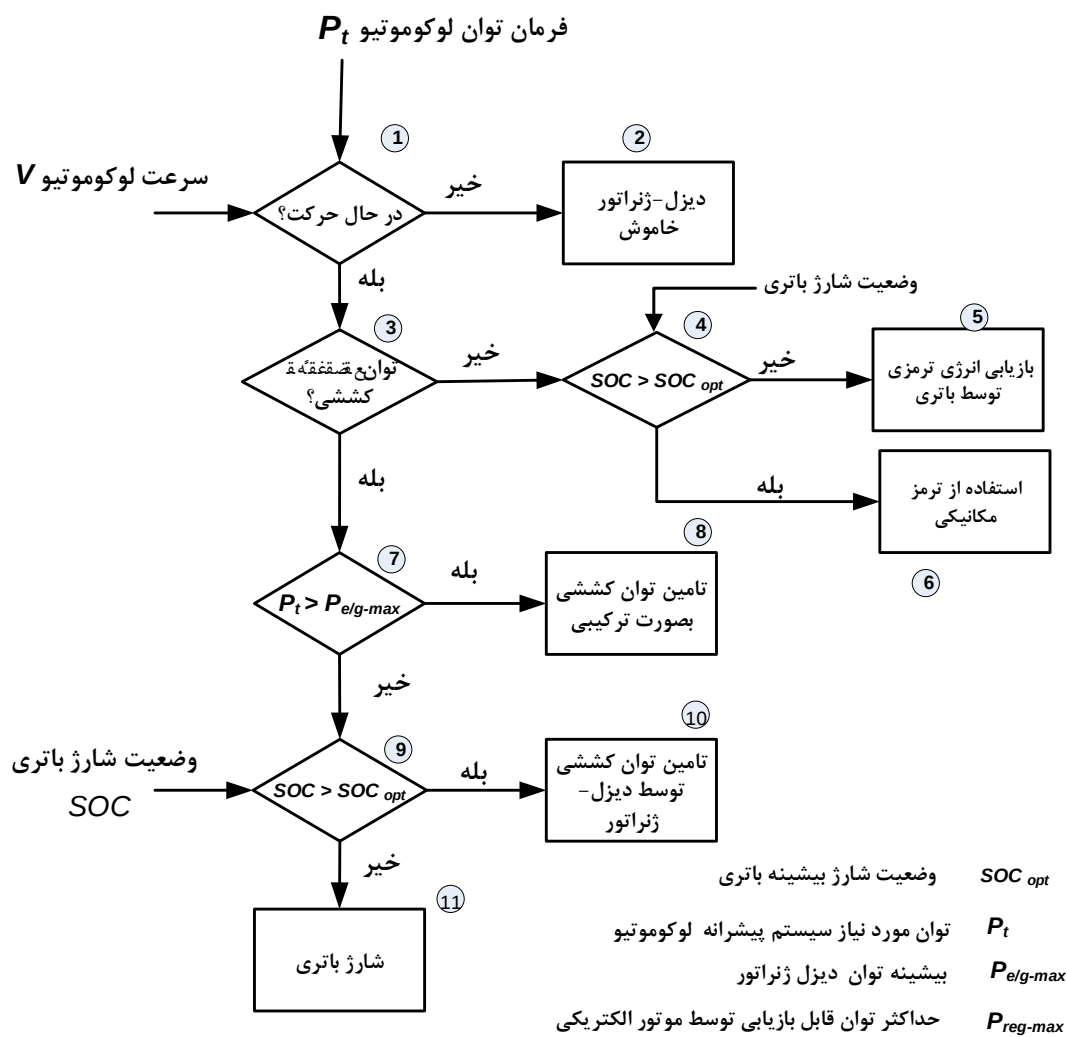
اگر توان درخواستی بیش از حداکثر مقدار توان دیزل-ژنراتور باشد، دیزل-ژنراتور حداکثر توان خود را تولید کرده و باقی توان درخواستی توسط باتری تأمین می‌شود.

اگر توان درخواستی کمتر از حداکثر مقدار توان دیزل-ژنراتور باشد. در اینجا (مرحله نهم) میزان وضعیت شارژ باتری با مقدار مطلوب که همان مقدار شارژ ماکزیمم مدنظر است مقایسه می‌شود.

اگر وضعیت شارژ باتری در حد مطلوب باشد، دیزل-ژنراتور توان مورد نیاز را به تنهایی تأمین می‌کند.

اگر وضعیت شارژ کمتر از حد مطلوب باشد، دیزل-ژنراتور در یک دنده بالاتر قرار گرفته و علاوه بر تأمین توان درخواستی لوکوموتیو توانی اضافی جهت شارژ باتری را تولید می‌کند. با این مرحله از استراتژی کنترلی همواره وضعیت شارژ باتری در ناحیه مطلوب قرار گرفته و مجموعه باتری همواره توانایی همراهی دیزل-ژنراتور در تأمین توان درخواستی را خواهد داشت.

در ادامه از این استراتژی کنترلی جهت طراحی و کنترل لوکوموتیو هیبریدی استفاده می‌شود.



شکل ۲۱-۳ فلوجارت استراتژی کنترلی پیشنهادی

۳-۶ سایر لزومات

در استفاده از قابلیت بازیای انرژی ترمزی در کاربرد لوکوموتیو مانوری محدودیت های زیر وجود دارد: اول اینکه با توجه به توقف و حرکت محدود لوکوموتیوهای مانوری در یک سیکل حرکتی تعداد دفعات ترمزگیری کم است همچنین با توجه به سرعت پایین حرکت، انرژی ترمزی در لوکوموتیوهای مانوری به مراتب کمتر از دیگر انواع لوکوموتیو که با سرعت بالاتری حرکت می کنند است. بنابراین انرژی ترمزی در این نوع لوکوموتیو پایین است. از اینرو در این پروژه (در مباحث طراحی و کنترل) موضوع بازیابی ترمزی در نظر گرفته نشده است.

۳-۷ جمع بندی

در فصل سوم، ابتدا به بررسی فنی المان های مورد نیاز در سیستم رانشی لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک پرداخته شد. در این بخش اجزاء مختلف نظیر موتور دیزلی، ژنراتور، دمنده و فن ها، یکسوساز و باتری، سیستم بوژی و انواع موتور کششی معرفی و مورد بررسی قرار گرفت. سپس به بررسی دو ساختار سری و موازی مناسب برای لوکوموتیو مانوری هیبریدی پرداخته شد. همانطور که در این گزارش بیان شد، ساختار سری مناسب لوکوموتیوهای دیزل الکتریک هستند. در ادامه استراتژی های کنترلی ترموستات، دنبال کننده توان، پیشینه وضعیت شارژ و استراتژی کنترلی مختص لوکوموتیو مانوری هیبریدی HD300 محصول شرکت توشیبا معرفی و بررسی گردید و در بخش انتهایی این فصل استراتژی کنترلی استفاده شده در این گزارش معرفی و با جزئیات مورد مطالعه قرار گرفت.

فصل ۴ - طراحی کلی یک نمونه اولیه هیبرید

۴-۱ طراحی سیستم رانشی یک لوکوموتیو هیبرید نمونه باتوجه به عملکرد درخواستی

در این قسمت به طراحی اجزاء یک لوکوموتیو دیزل-الکتریک هیبرید پرداخته می‌شود.

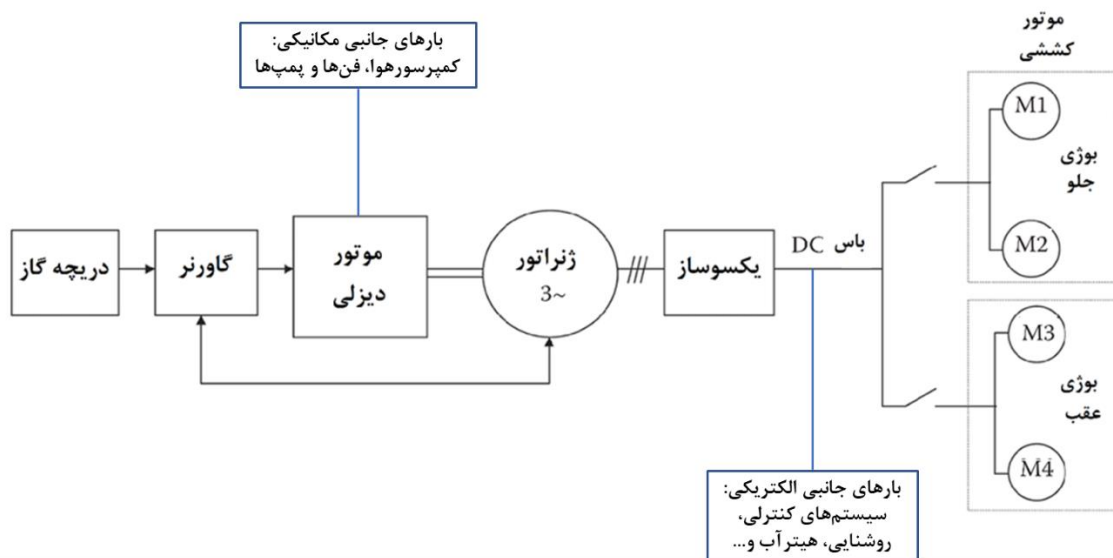
۴-۱-۱ مقدمه و فرضیات طراحی

با توجه به استفاده گسترده لوکوموتیو G12 در کاربرد مانوری، عمر بالای فعالیت آنها در چرخه حمل و نقل ریلی و به تبع آن تمایل به تعمیرات اساسی آنها (گزارش فصل اول) و همچنین تمایل شرکت راه آهن به هیبرید سازی این نوع لوکوموتیو، این نوع لوکوموتیو به عنوان ساختار پایه جهت هیبریداسیون انتخاب شد.

ساختار بخش تولید توان در این لوکوموتیو همانند شکل ۵-۴ است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، آرایش بوژی لوکوموتیو G12 از نوع BO-BO است و موتورهای الکتریکی آن از نوع جریان مستقیم هستند. دیگر مشخصه‌های کلی لوکوموتیو در جدول ۲-۳ نشان داده شده است. (اطلاعات از شرکت راه آهن استعلام شده است)

همانطور که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، در این لوکوموتیو بخشی از بارهای غیر کششی نظیر: کمپرسور هوا، فن خنک کننده رادیاتور و پمپ سوخت رسانی بطور مکانیکی مستقیم توان خود را از میل لنگ موتور دیزلی دریافت می‌کنند. همچنین برخی بارهای غیر کششی نظیر: سیستم‌های کنترلی، هیترها، برخی فن‌ها و ... بصورت الکتریکی از خروجی دیزل-ژنراتور تغذیه می‌شوند.

دیزل ژنراتور مورد استفاده در لوکوموتیو دارای ۸ دنده اصلی و یک دنده خنثی است. میزان توان خروجی در هر دنده در جدول ۲-۴ نشان داده است. (اطلاعات از شرکت راه آهن استعلام شده است)



شکل ۴-۱ دیگرام بخش تولید توان در لوکوموتیو G12

جدول ۴-۱ مشخصات لوکوموتیو G12

توان نامی دیزل ژنراتور	1359 hp (1013.8 kw)
توان نامی موتور الکتریکی	470 hp (350.62 kw)
آرایش بوژی	BO-BO
وزن لوکوموتیو	72.74-77.14 ton
شعاع چرخ	1.016
نسبت چرخ‌دنده	15/62
حداکثر وزن بار	۱۶۳۰ تن برای فراز ۴ در هزار

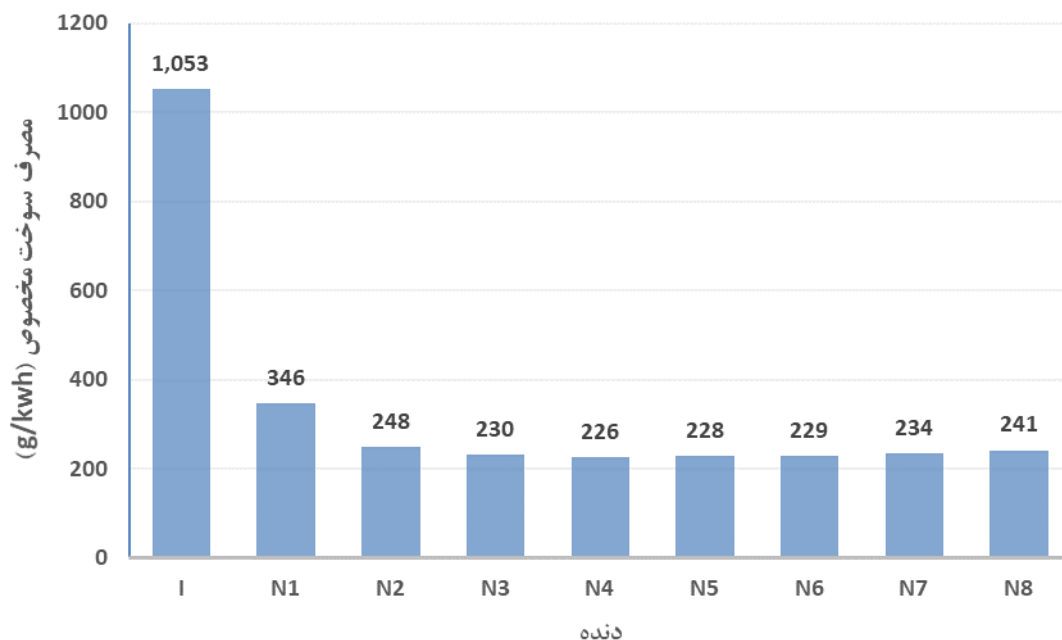
جدول ۴-۲ مقدار توان دیزل ژنراتور در هر دنده

توان (kW)	دنده
۲۲/۳۸	دنده خنثی
۵۹/۶۸	دنده ۱
۱۶۴/۱۲	دنده ۲
۲۱۶/۳۴	دنده ۳
۳۶۵/۵۴	دنده ۴
۴۷۷/۴۴	دنده ۵
۶۳۴/۱	دنده ۶
۷۸۳/۳	دنده ۷
۹۳۲/۵	دنده ۸

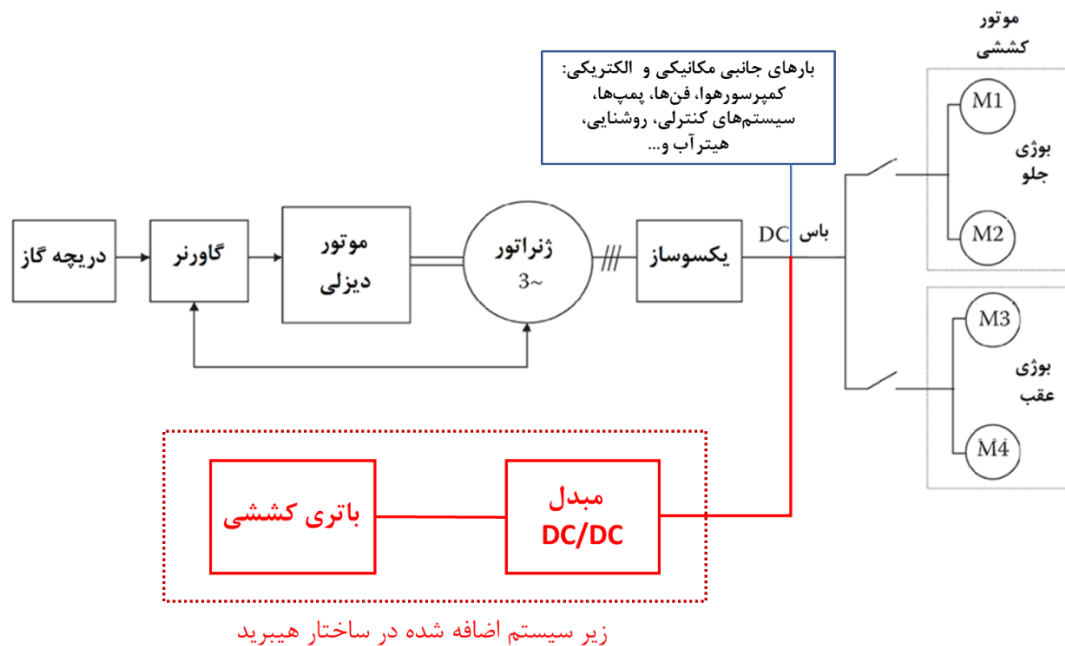
میزان مصرف سوخت در هر دنده بر اساس اطلاعات دیزل ژنراتور EMD 12-645E به ازای دنده‌های مختلف در شکل ۴-۲ نشان داده شده است [۴۰].

ساختار بخش تولید توان لوکوموتیو بعد از هیبریداسیون در شکل ۴-۳ نشان داده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزودن باتری به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی به سیستم تولید توان و اتصال آن به باس DC از طریق یک مبدل DC به DC می‌توان ساختار لوکوموتیو دیزل الکتریک (شکل ۴-۱) را به یک لوکوموتیو هیبریدی از نوع سری تبدیل کرد.

همچنین همانطور که در شکل ۴-۳ مشخص است در صورت هیبریداسیون تمامی بارهای غیر کششی به صورت الکتریکی مورد بهره‌برداری قرار گیرند. یعنی از پمپ‌ها و کمپرسورها و دیگر سیستم‌های الکتریکی بجای نوع مکانیکی استفاده شود.



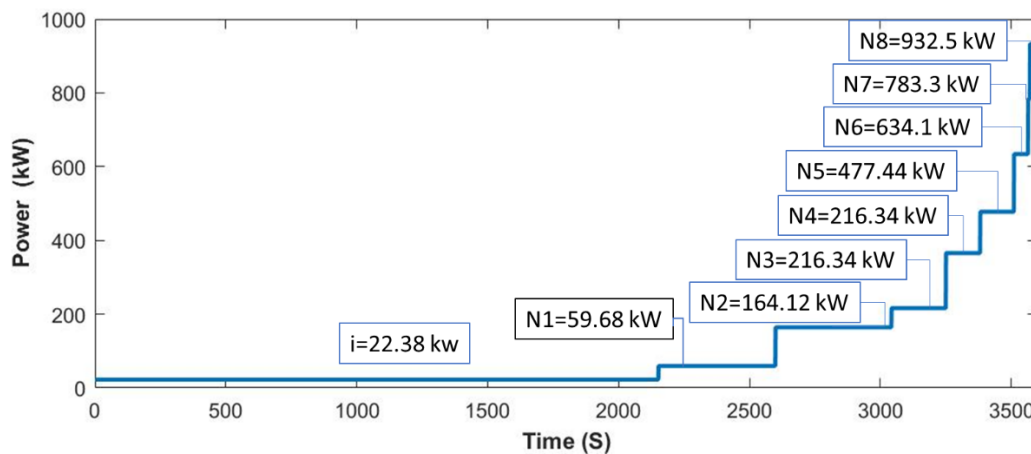
شکل ۴-۲ میزان مصرف سوخت در هر دنده دیزل ژنراتور



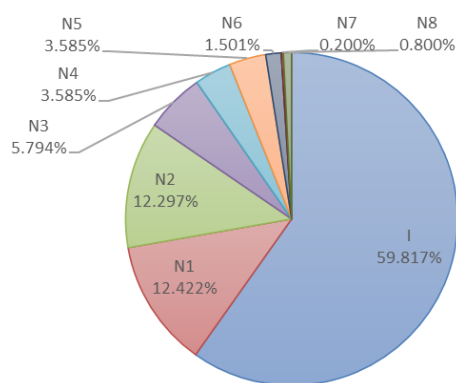
شکل ۳-۴ ساختار بخش تولید توان لوکوموتیو بعد از هیبریداسیون

در یک لوکوموتیو هیبرید، به منظور تعیین سائز اجزاء، اطلاعات مربوط به سیکل حرکتی (رانشی) لازم و ضروری است. بنابراین با هدف استعلام سیکل رانشی مکاتباتی با شرکت راه آهن صورت گرفت و سیکل رانشی شکل ۴-۴ با استفاده از اطلاعات دریافتی در طی یک ساعت از شبانه روز ترسیم شد. همچنین در شکل ۴-۵ مدت زمان و میزان درصد فعالیت در هر دنده نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود و انتظار نیز می رفت، در بخش اعظمی از سیکل رانشی (حدود ۶۰٪) لوکوموتیو ساکن بوده و در دنده خنثی فعالیت می کند.

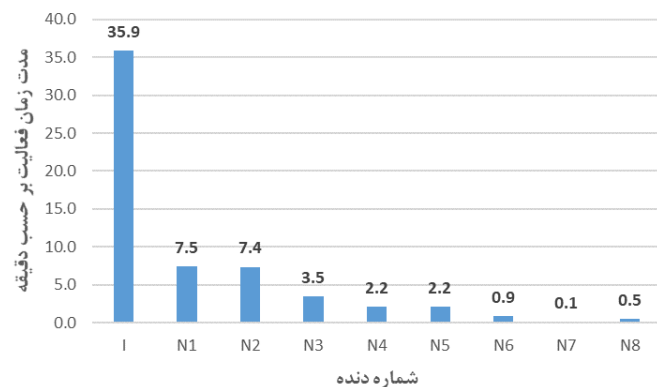
پس از ارائه مقدمات و بررسی مفروضات طراحی، در ادامه به طراحی و تعیین سائز تجهیزات پیشرا نه پرداخته می شود.



شکل ۴-۴ سیکل رانشی لوکوموتیو مانوری تحت بررسی



(ب)



(الف)

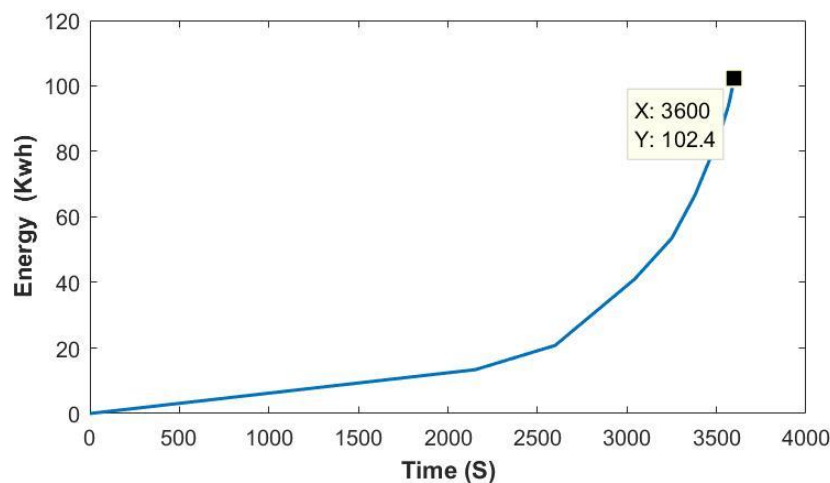
شکل ۴-۵ (الف) مدت زمان و (ب) درصد زمانی فعالیت لوکوموتیو در دنده‌های مختلف در سیکل رانشی

۲-۱-۴ محاسبه ساینز دیزل ژنراتور

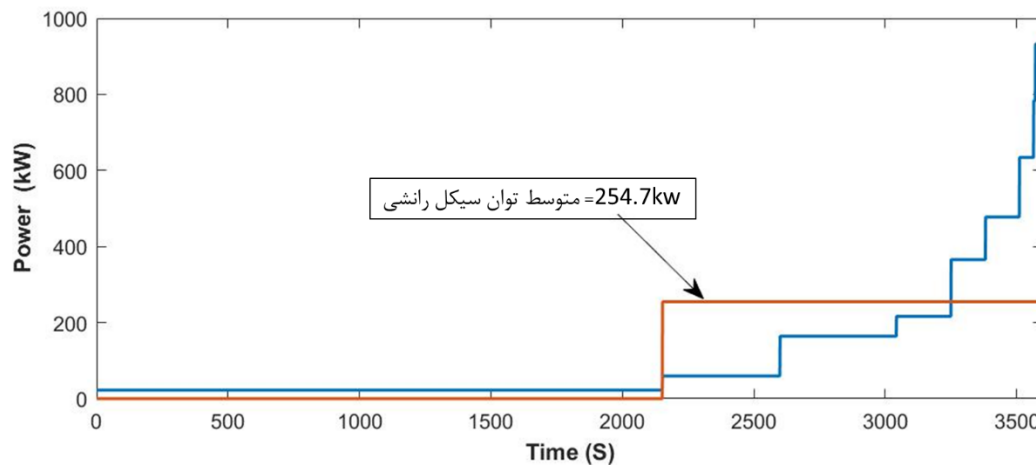
بطور کلی در یک خودرو سری و بطور خاص در اینجا لوکوموتیو سری، بدلیل اینکه هیچ منبع خارجی انرژی وجود ندارد، دیزل ژنراتور می‌بایست انرژی مورد نیاز بارهای کششی و غیر کششی و همچنین انرژی مورد نیاز باتری (در هنگام شارژ) را فراهم کند. از طرفی براساس استراتژی کنترلی مورد استفاده که در بخش ۳-۵-۶ مطرح شد، در مواقع توقف لوکوموتیو دیزل ژنراتور خاموش می‌شود. بنابراین دیزل ژنراتور می‌بایست این میزان انرژی را در بازه زمانی حرکت خود یعنی زمانی که در دنده غیر صفر قرار دارد تامین کند. پس می‌توان حداقل ساینز دیزل ژنراتور را بصورت زیر محاسبه کرد:

(۳) (مدت زمان فعالیت لوکوموتیو در دنده غیر صفر) / (مقدار انرژی مورد نیاز در یک سیکل رانشی) = حداقل ساینز دیزل ژنراتور

در شکل ۴-۶ مقدار انرژی خروجی دیزل ژنراتور (بصورت انباشته) در طول سیکل رانشی (شکل ۴-۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در طول یک سیکل رانشی دیزل ژنراتور انرژی حدود ۱۰۲/۴ kWh تولید می‌کند. همچنین طبق شکل ۴-۵ مدت زمان فعالیت لوکوموتیو در دنده غیر صفر برابر (۶۰-۳۵/۹) ۲۴/۱ دقیقه خواهد بود. بنابراین با استفاده از رابطه (۳) میزان توان دیزل ژنراتور برابر ۲۵۴/۷ kW محاسبه خواهد شد (شکل ۴-۷). با در نظر گرفتن حاشیه ۲۵٪ برای ساینز دیزل-ژنراتور میزان توان مورد نیاز دیزل ژنراتور برابر با (۱/۲۰ × ۲۵۴/۷ kW) ۳۰۵ kW خواهد بود. پس از بررسی و استعلامات انجام گرفته از شرکت راه آهن مشخص شد که در حال حاضر شرکت ایدم تبریز [۴۱] در حال گرفتن سفارش و تولید موتورهای ۳۱۵ kW برای کاربرد ریلی است. پس در این بخش دیزل ژنراتور ۳۱۵ kW به عنوان ساینز مورد نظر انتخاب گردید. و در ادامه محاسبات توان خروجی برابر ۳۰۰kW در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴-۶ انرژی تامین شده از دیزل ژنراتور در طول سیکل رانشی



شکل ۴-۷ متوسط توان در سیکل رانشی

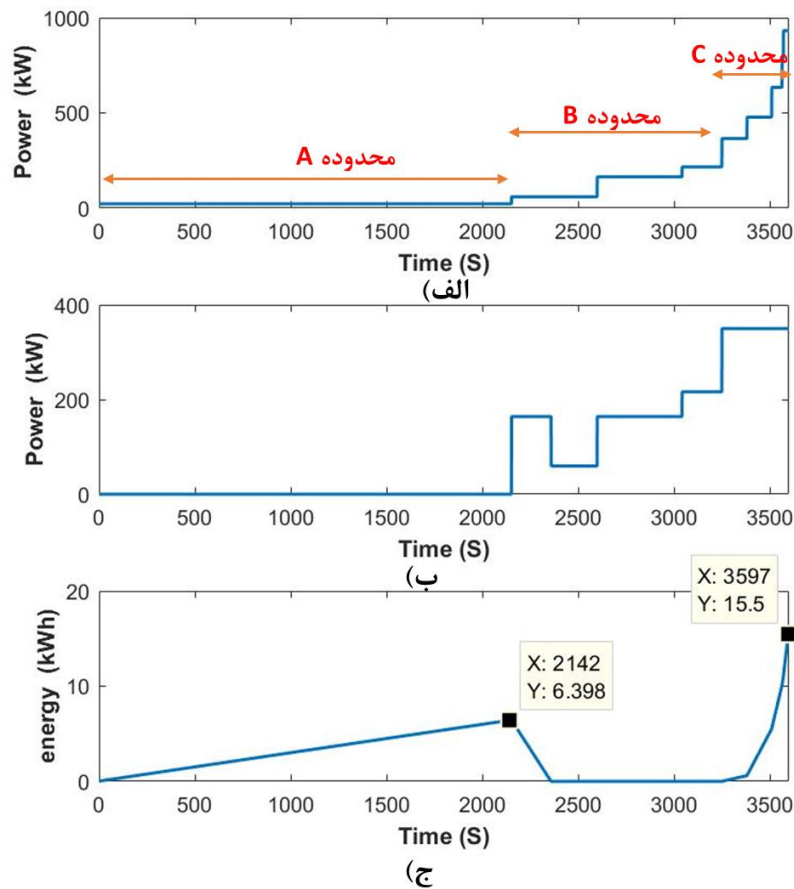
۴-۱-۳ تعیین ظرفیت باتری

به منظور محاسبه ظرفیت باتری می‌بایست به سیکل رانشی و استراتژی کنترلی مربوطه رجوع کرد. با فرض در نظر گرفتن توان ۳۰۰ kW برای دیزل ژنراتور (محاسبه شده در قسمت قبل) و استراتژی کنترلی ارائه شده، عملکرد دیزل ژنراتور و باتری در محدوده‌های کاری مختلف بصورت زیر است:

محدوده A: لوکوموتیو در حال توقف (دنده صفر)

در شکل ۴-۸ سیکل کاری لوکوموتیو، توان تامین شده توسط دیزل ژنراتور، سطح انرژی باتری نشان داده شده است.

همانطور که در بیان استراتژی کنترلی مطرح شد، در حالت توقف دیزل ژنراتور خاموش شده و در این محدوده عملکردی انرژی مورد نیاز بارهای غیر کششی توسط باتری تامین می‌شود. در شکل ۴-۸-۴ ج به خوبی مشاهده می‌شود که در این محدوده عملکردی حدود ۶/۴ kWh انرژی توسط باتری تامین می‌شود.



شکل ۴-۸ عملکرد اجزا لوکوموتیو در یک سیکل کاری (الف) سیکل کاری لوکوموتیو، (ب) توان تامین شده توسط دیزل ژنراتور و (ج) سطح انرژی باتری

- محدوده B: لوکوموتیو در حال حرکت و توان بار کمتر از حداکثر توان دیزل ژنراتور (350 kW)

در این محدوده دیزل ژنراتور توان مورد نیاز سیکل رانشی را تامین می کند و در صورتی که انرژی باتری کمتر از مقدار بیشینه باشد، دیزل ژنراتور توانی بیش از توان سیکل رانشی تولید می کند تا علاوه بر تامین توان مورد نیاز سیکل رانشی، انرژی مورد نیاز باتری را نیز تامین کند. در شکل به خوبی مشاهده می شود که انرژی باتری در این محدوده تامین شده است.

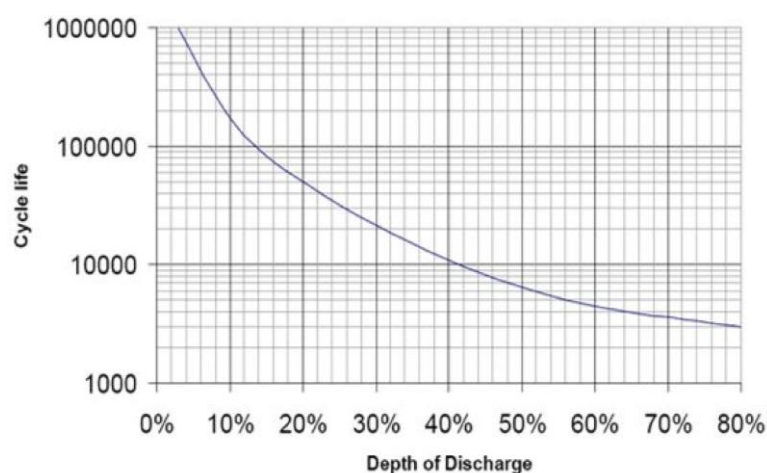
- محدوده C: لوکوموتیو در حال حرکت و توان بار بیشتر حداکثر توان دیزل ژنراتور (300 kW)

در این محدوده دیزل ژنراتور با حداکثر توان خود فعالیت می کند و مابقی توان توسط باتری تامین می شود. همانطور که در شکل ۴-۸-ج مشاهده می شود در سیکل رانشی مورد نظر در این محدوده مجموعه باتری به اندازه 15.5 kWh انرژی مورد نیاز بار را تامین می کند. اگر این بصورت تکرار فرض شود باتری می بایست $6/4 \text{ kWh}$ انرژی دیگر در محدوده A سیکل بعدی تامین کند. بنابراین ظرفیت مورد

بهره‌وری از باتری برابر $21/9 \text{ kwh} = 6/4 \text{ kwh} + 15/5 \text{ kwh}$ خواهد بود.

موضوع دیگری که در تعیین ظرفیت باتری حائز اهمیت است، عمر باتری است. عمر باتری به دو طریق در نظر گرفته می‌شود. اولین روش معرفی عمر باتری، عمر تقویمی است که برحسب سال در نظر گرفته می‌شود. روش دوم محاسبه عمر باتری، برحسب میزان سیکل کاری باتری در طول عمر آن است که به آن عمر دوره‌ای^۱ گفته می‌شود. درحقیقت عمر دوره‌ای باتری به پارامترهای مختلفی نظیر دمای عملکردی و نرخ دشارژ بستگی دارد، ولی پارامتر بسیار تاثیر گذار بر عمر دوره‌ای باتری، میزان عمق دشارژ باتری و میزان انرژی دریافت شده از باتری در هر سیکل کاری است. در شکل ۹-۴ ارتباط تعداد سیکل عمر باتری و میزان درصد انرژی مورد استفاده از باتری بر حسب درصد در هر سیکل شارژ و دشارژ باتری برای یک باتری لیتیوم یون نشان داده شده است [۴۲]. به عنوان مثال همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، اگر از ۸۰٪ ظرفیت باتری در هر سیکل دشارژ استفاده شود میزان عمر باتری برابر ۳۰۰۰ سیکل است. حال اگر از ۲۰٪ ظرفیت باتری استفاده شود عمر باتری برابر ۴۰۰۰۰ سیکل خواهد بود.

در لوکوموتیوهای مانوری هیبریدی چرخه شارژ و دشارژ باتری بالا است. بنابراین به منظور افزایش طول عمر باتری، ظرفیت آن می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شود که میزان عمق دشارژ آن کم باشد. از اینرو در این پروژه با توجه به این نکته که موضوع طول عمر بیشتر باتری و نیاز به تعمیرات کمتر در اولویت‌های اصلی قرار دارد، میزان عمق دشارژ ۲۰٪ فرض شده است [۲۴].^۲



شکل ۹-۴- منحنی تعداد سیکل عمر باتری و میزان درصد انرژی مورد استفاده از باتری در یک باتری لیتیوم یون [۴۲]

بنابراین با فرض در نظر گرفتن بازدهی باتری برابر ۹۰٪ و همچنین در نظر گرفتن محدوده ۲۰٪.

^۱ Cycle life

^۲ در خودروهای هیبریدی برقی بطور مرسوم از ۲۰ تا ۴۰ درصد وضعیت شارژ به عنوان محدوده عملکرد باتری در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. M.

Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.

عملکرد باتری، میزان ظرفیت نصب شده باتری برابر خواهد بود با:

$$(4) \quad \text{بازدهی باتری} \div \text{محدوده عمق دشارژ} = \text{انرژی مورد نیاز در هر سیکل} = \text{ظرفیت نصب شده باتری}$$

$$121.6 \text{ kWh} = 21.9 \text{ kWh} \div 0.2 \div 0.9$$

بنابراین ظرفیت نصب شده باتری برابر 130 kWh در نظر گرفته خواهد شد.

میزان توان دهی باتری نیز برابر با اختلاف حداکثر توان سیکل رانشی و حداکثر توان دیزل ژنراتور است که در اینجا برابر با $932.5 \text{ kW} - 300 \text{ kW} = 632.5 \text{ kW}$ است. بنابراین توان باتری برابر 650 kW خواهد بود.

ظرفیت توانی مبدل DC/DC نیز برابر با 650 kW خواهد بود. محاسبات انرژی الکتریکی و مصرف سوخت برای نمونه طراحی شده با استفاده از مشخصه سیکل رانشی (شکل ۴-۴) و همچنین اطلاعات مربوط به میزان مصرف سوخت در هر دنده (شکل ۴-۲) می توان میزان مصرف سوخت لوکوموتیو در سیکل رانشی را محاسبه کرد. پس از انجام محاسبات میزان مصرف سوخت لوکوموتیو در یک سیکل رانشی برابر ۳۵۷۲۸ گرم خواهد بود. با فرض فعالیت ۲۴ ساعته روزانه و ۳۳۵ روز سالانه (یک ماه در سال برای تعمیر و نگهداری) و همچنین با در نظر گرفتن ۸۳۲ گرم جرم یک لیتر گازوئیل مقدار مصرف روزانه و سالانه یک لوکوموتیو دیزل الکتریک با مشخصات و سیکل رانشی بیان شده به شرح زیر است.

$$24 \times 832 = \text{میزان مصرف سوخت در یک سیکل رانشی} = \text{مصرف روزانه سوخت لوکوموتیو دیزل الکتریک}$$

$$\text{لیتر} 1030 = 24 \times 832 \div 35728 = \text{مقدار مصرف روزانه سوخت لوکوموتیو دیزل الکتریک}$$

$$\text{لیتر} 345,050 = 335 \times \text{مقدار مصرف روزانه سوخت} = \text{مقدار مصرف سالانه سوخت لوکوموتیو دیزل الکتریک}$$

به همین طریق و بر اساس مشخصه عملکردی هیبریدی شکل میزان مصرف سوخت لوکوموتیو هیبریدی برابر ۲۳۷۲۶ گرم محاسبه شد. بنابراین میزان مصرف سوخت روزانه و شبانه لوکوموتیو هیبریدی برابر است با:

$$\text{لیتر} 684 = 24 \times 832 \div 23726 = \text{مقدار مصرف روزانه سوخت لوکوموتیو هیبریدی}$$

لیتر $229,140 = 335 \times 684$ = مقدار مصرف سالانه سوخت لوکوموتیو هیبریدی

با توجه به مقادیر محاسبه شده مصرف سوخت در دو نوع دیزل الکتریک و هیبریدی مشاهده شد که در صورت هیبریداسیون میزان مصرف سوخت حدود ۳۳/۶٪ کاهش خواهد داشت.

در جدول ۳-۴ اطلاعات محاسبه شده مصرف سوخت بصورت جمع بندی ارائه شده است.

جدول ۳-۴ اطلاعات محاسبه شده مصرف سوخت

۴۳ لیتر	میزان مصرف سوخت لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی در هر سیکل
۲۸/۵ لیتر	میزان مصرف سوخت لوکوموتیو هیبریدی در هر سیکل
۱۰۳۰ لیتر	میزان مصرف سوخت روزانه لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی
۶۸۴ لیتر	میزان مصرف سوخت روزانه لوکوموتیو هیبریدی
۳۴۵,۰۵۰ لیتر	میزان مصرف سوخت سالانه لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی
۲۲۹,۱۴۰ لیتر	میزان مصرف سوخت سالانه لوکوموتیو هیبریدی
۳۳/۶٪	درصد کاهش مصرف سوخت لوکوموتیو هیبریدی نسبت به لوکوموتیو دیزلی
۱۱۵,۹۱۰ لیتر	میزان صرفه جویی سوخت سالیانه لوکوموتیو هیبریدی

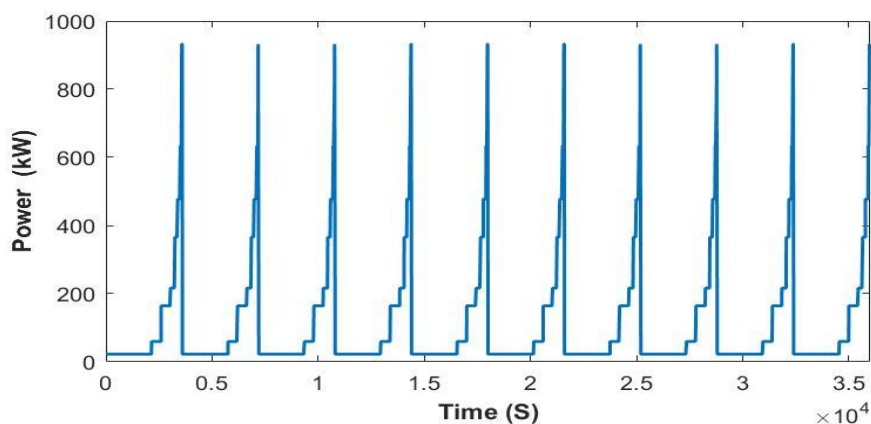
۴-۲ مقایسه عملکردی نمونه طراحی شده با نمونه پایه

در ادامه به بررسی و مقایسه عملکردی نمونه طراحی در قسمت قبل با نمونه پایه پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که شبیه سازی‌های لوکوموتیو هیبریدی بر اساس کدهای نوشته شده در محیط نرم افزار متلب و بر اساس استراتژی کنترلی مطرح شده در شکل ۲۱-۳ انجام گرفته است. در شکل ۱۰-۴ و شکل ۱۱-۴ عملکرد لوکوموتیو دیزلی پایه و هیبریدی در ۱۰ سیکل رانشی متوالی مورد بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب این تعداد بالای سیکل رانشی بررسی صحت عملکردی استراتژی کنترلی در چند سیکل رانشی و در مدت زمان طولانی برای لوکوموتیو هیبریدی طراحی شده است.

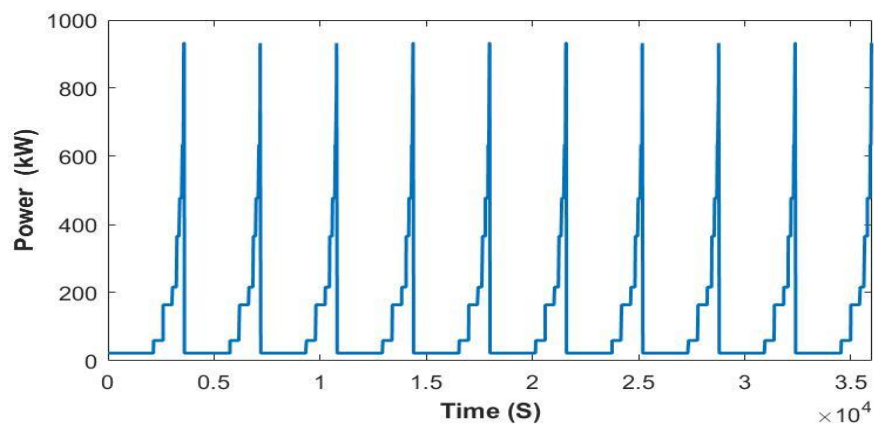
در شکل ۱۰-۴ عملکرد لوکوموتیو دیزلی پایه در ۱۰ سیکل نشان داده است. در اینجا توان مورد نیاز سیکل رانشی و توان خروجی دیزل ژنراتور نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰-۴ مشاهده می‌شود و کاملاً مشخص است، به دلیل اینکه تنها تامین کننده توان لوکوموتیو دیزل ژنراتور است توان مورد نیاز سیکل رانشی شکل ۱۰-۴-الف برابر همان توان خروجی دیزل ژنراتور (شکل ۱۰-۴-ب) است.

در شکل ۴-۱۱ نتایج شبیه‌سازی لوکوموتیو هیبریدی نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۱-الف توان درخواستی در سیکل رانشی و در شکل ۴-۱۱-ب عملکرد موتور دیزل در طول سیکل رانشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود عملکرد دیزل ژنراتور به گونه‌ای است که در طول مدت سیکل حرکتی انرژی مورد نیاز را تأمین می‌کند. همچنین در شکل ۴-۱۱-ج به خوبی مشاهده می‌شود با اتخاذ استراتژی کنترلی مناسب و تعیین سائز دقیق باتری همواره وضعیت شارژ باتری در ناحیه مطلوب یعنی ۲۰٪ ظرفیت کل باتری که موردنظر بود نگه داشته شده است. در اینجا وضعیت شارژ بیشینه برابر ۹۰٪ در نظر گرفته شده است.

در مجموع مشاهده می‌شود که علیرغم کاهش سائز دیزل-ژنراتور به حدود یک سوم حالت دیزل الکتریک، با استفاده از باتری به عنوان منبع کمکی و همچنین اتخاذ استراتژی کنترلی مناسب، عملکردی همانند لوکوموتیو دیزل الکتریک حاصل می‌گردد.

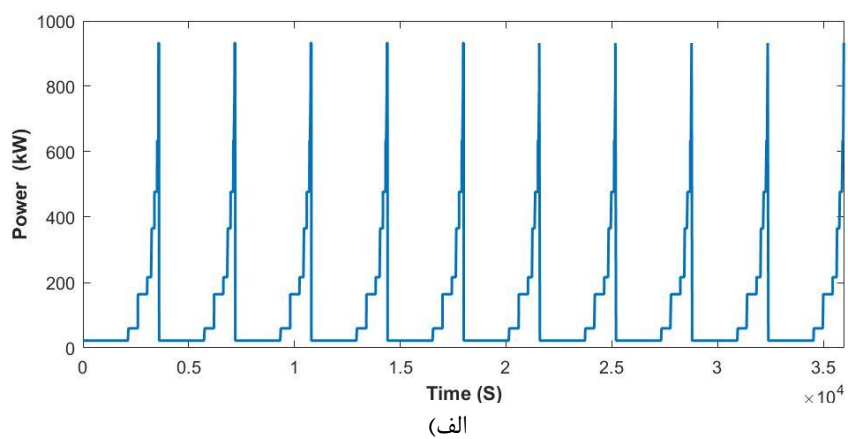


(الف)

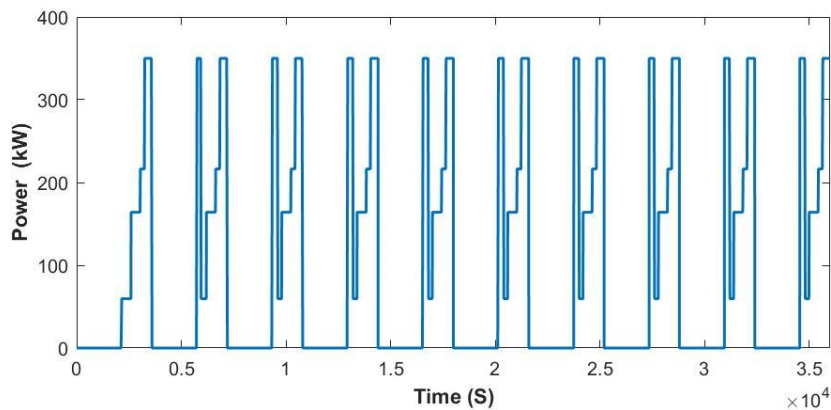


(ب)

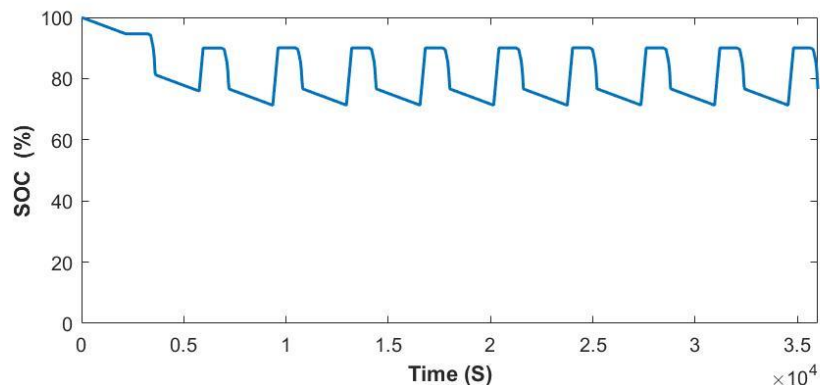
شکل ۱۰-۴- بررسی عملکرد لوکوموتیو دیزلی پایه، الف) سیکل رانشی ب) توان خروجی دیزل ژنراتور



الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۱۱- بررسی عملکرد لوکوموتیو هیبریدی طراحی شده، الف) سیکل رانشی ب) توان خروجی دیزل ژنراتور و ج) وضعیت شارژ باتری

۴-۳ مقایسه اقتصادی نمونه طراحی شده با نمونه پایه

در جدول ۴-۴ به مقایسه هزینه سیستم تولید توان دو نوع لوکوموتیو دیزل-الکتریک و معادل هیبریدی آن پرداخته شده است.

در لوکوموتیو دیزل الکتریک هزینه سیستم پیشران شامل موتور دیزلی و ژنراتور است. در لوکوموتیو هیبریدی، هزینه سیستم تولید توان شامل مواردی نظیر: موتور دیزلی، ژنراتور، باتری، مبدل DC/DC و دیگر هزینه‌های هیبریداسیون می‌باشد.

به منظور استخراج هزینه بیشتر موارد جدول ۴-۴ از اطلاعات کارشناسان شرکت راه‌آهن استفاده شد.

جدول ۴-۴ بررسی هزینه سیستم تولید توان دو نوع لوکوموتیو دیزل-الکتریک و معادل هیبریدی آن

نوع تجهیز	توان (یا انرژی) مورد نیاز تجهیز	قیمت واحد	قیمت کل
المانهای مورد نیاز در سیستم تولید توان لوکوموتیو دیزل ژنراتور			
۱	موتور دیزلی ساخت داخل	۱۰۰۰Kw	۲۳۰ هزار یورو
۲	ژنراتور ساخت داخل	۱۰۰۰Kw	۲۰ هزار یورو*
		مجموع هزینه‌ها	۲۵۰,۰۰۰ یورو
المانهای مورد نیاز در سیستم تولید توان لوکوموتیو هیبریدی			
۱	موتور دیزلی ساخت داخل	۳۱۵Kw	۱۸,۴۶۰ یورو
۲	ژنراتور ساخت داخل	۳۵۰Kw	۷,۰۰۰ یورو
۳	مبدل DC/DC	۶۵۰Kw	۱۵,۳۸۴ یورو
۴	باتری	۱۳۰ Kwh	۲۴,۸۰۰ یورو
۵	دیگر تجهیزات (مونیتورینگ، کنترلی، کمپرسور برقی، ...)	----	۲۰,۰۰۰ یورو
		مجموع هزینه‌ها	۸۵,۶۴۴ یورو

همانطور که در جدول ۴-۴ مشاهده می‌شود، هزینه هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری حدود ۸۵,۶۴۴ یورو برآورد می‌شود که کمتر از یک سوم از هزینه سیستم تولید توان در یک لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی (با هزینه ۲۵۰,۰۰۰ یورو) است. علت اصلی این موضوع هزینه بالای دیزل ژنراتور با توان بالا علیرغم تولید در داخل است. از مزایای هیبریداسیون، علاوه بر کاهش هزینه اولیه سیستم تولید توان می‌بایست به کاهش مصرف سوخت اشاره کرد که در گزارش‌های آتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۴ جمع‌بندی

در این فصل بر اساس مطالب ارائه شده در فصول قبلی و فرضیات مطرح شده به طراحی یک نمونه لوکوموتیو هیبریدی دیزل الکتریک پرداخته شد. در ابتدای این فصل از گزارش بر اساس فرضیات موجود، محدودیت‌ها و همچنین استراتژی کنترلی ارائه شده به طراحی تک تک اجزاء بخش تولید توان در لوکوموتیو هیبریدی مورد طراحی پرداخته شد. در بخش اول سازه موتور دیزلی و ژنراتور بر اساس مقدار متوسط توان درخواستی سیکل رانشی محاسبه شده و سپس ظرفیت مطلوب باتری محاسبه شد. در ادامه بعد از طراحی لوکوموتیو هیبریدی به مطالعه عملکردی و اقتصادی آن بر اساس میزان کاهش مصرف سوخت و هزینه تولید پرداخته خواهد شد. در این بخش مشاهده شد که هزینه اولیه خرید

تجهیزات سیستم تولید توان در یک لوکوموتیو مانوری هیبریدی شامل موتور دیزلی، ژنراتور، باتری و مبدل dc به dc به مراتب کمتر از سیستم تولید توان در یک لوکوموتیو دیزل الکتریک مرسوم شامل موتور دیزلی و ژنراتور است.

فصل ۵ - برآورد هزینه اکتساب دانش فنی

۱-۵ مقدمه

یکی از روش‌های علمی جهت ارزشیابی و قیمت‌گذاری دانش فنی روش هزینه مبنا^۱، است [۴۳]. در این روش برای ارزشیابی دانش فنی، هزینه‌ها و مواد مصرف شده برای ایجاد و توسعه دانش فنی محاسبه و برآورد می‌شود. در این گزارش نیز از این روش برای تخمین و برآورد تولید اجزاء مورد نیاز جهت هیبریداسیون استفاده شده است.

خوشبختانه پس از بررسی تیم پروژه مشخص شد تمامی المان‌های مورد نیاز جهت هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری شامل دیزل، ژنراتور، باتری و مبدل dc به dc یا به صورت تجاری در داخل کشور در حال تولید است (همانند دیزل و ژنراتور) و یا اجزاء اصلی و دانش فنی آن در داخل کشور جهت تولید محصول موجود است (مانند سلول‌های باتری و مبدل dc به dc). بنابراین تخمین و برآورد هزینه تولید این المان‌ها چه به صورت تک نمونه و یا بصورت تولید انبوه با دقت مناسبی قابل انجام است.

شاید بتوان گفت که از نظر وجود دانش فنی در کشور دانش فنی اجزاء مورد نیاز لوکوموتیو هیبریدی نسبت به دیگر انواع خودروهای برقی و هیبریدی وضعیت مطلوب‌تری دارد که این موضوع در تجاری‌سازی و ایجاد چرخه مطمئن تامین قطعات که یکی از دغدغه‌های مسئولین شرکت راه‌آهن بوده و هست بسیار کارگشا خواهد باشد.

در این گزارش و در بخش اول به بررسی و برآورد اقتصادی اجزاء مورد استفاده در لوکوموتیو مانوری هیبریدی پرداخته شده است. در بخش دوم و سوم نیز نتایج استخراج شده جهت برآورد هزینه تولید یک نمونه از محصول و همچنین تولید انبوه (بیش از ۲۰ لوکوموتیو) مورد مطالعه قرار گرفته است. شایان ذکر است که در هر بخش سعی شده تا جهت استخراج اطلاعات دقیق‌تر، از نظر کارشناسان خبره در آن حوزه استفاده شود.

۲-۵ برآورد اقتصادی اجزاء مورد استفاده در لوکوموتیو مانوری هیبریدی

برآورد هزینه هیبریدسازی لوکوموتیو شامل هزینه تغییر دیزل ژنراتور و اضافه شدن باتری و مبدل به مجموعه می‌باشد. همانطور که در بالا نیز اشاره شد، در حوزه موتور دیزلی و ژنراتور ادوات مورد نیاز بصورت داخلی بومی سازی شده است. پس از مشاوره با کارشناسان شرکت راه‌آهن دو شرکت دیزل سنگین ایران و شرکت ایدم تبریز به عنوان دو تامین کننده دیزل ژنراتور شرکت راه‌آهن معرفی شدند. شرکت دیزل سنگین به عنوان تامین کننده دیزل‌های توان بالا (حدود یک مگا وات) و شرکت ایدم به عنوان تامین کننده دیزل‌های سبک با شرکت راه‌آهن همکاری می‌کنند که البته محصولات این شرکت با توجه به توان کم موتور دیزلی در لوکوموتیو هیبریدی بیشتر مورد نظر این پروژه است. در بخش اول

¹ - Cost-Based Method

گزارش به معرفی محصولات این دو شرکت و همچنین با توجه به استفاده از محصول تولیدی شرکت ایدم در طراحی انجام گرفته در فصل قبل به مطالعه قیمت این محصول پرداخته می‌شود. در بخش بعد به معرفی شرکت ماه نیرو که از تولیدکنندگان ژنراتور در داخل کشور و تامین کننده ژنراتور برای شرکت راه آهن است پرداخته شده و محصول مورد استفاده در طراحی نمونه اولیه لوکوموتیو مانوری از لحاظ مشخصات فنی و هزینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش بعد به برآورد اقتصادی مجموعه باتری پرداخته می‌شود. در این بخش در ابتدا با مقایسه انواع باتری، علل انتخاب باتری لیتیوم فسفات آهن به عنوان باتری منتخب به طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین طراحی و برآورد قیمت مجموعه باتری با استفاده از مازول‌های وارداتی و همچنین سلول‌های تولید داخلی در این بخش انجام گرفته است. در انتها با استفاده از مشاوره یکی از اساتید خبره در حوزه الکترونیک قدرت به تخمین هزینه تولید نمونه اولیه و تولید انبوه مبدل dc به dc پرداخته شده است.

۵-۲-۱ موتور دیزلی

اهمیت موتورهای دیزلی با توجه به توسعه روزافزون نیاز بخش‌های مختلف به تأمین توان بیشتر و توانایی این نوع از موتورهای احتراق داخلی در رفع این نیاز، بر کسی پوشیده نیست. در این میان، موتورهای دیزل سنگین بر اساس ماهیت عملکردی و کاربردهای خاص خود، از اهمیتی دوچندان برخوردار هستند؛ به گونه‌ای که دستیابی به دانش طراحی و ساخت موتورهای دیزل سنگین، گامی بلند در جهت حرکت به سمت صنعتی شدن هر کشور محسوب می‌شود. بر همین اساس، دستیابی به این دانش و بومی شدن این فرایند، امکان توسعه‌ی کشور را در عرصه راه آهن فراهم می‌کند. بدین منظور شرکت‌های تولیدکننده دیزل سنگین که امکان همکاری با شرکت راه آهن را داشته و در صنعت حمل و نقل ریلی کشور نیز مشغول به فعالیت می‌باشند شناسایی گردید که عبارتند از:

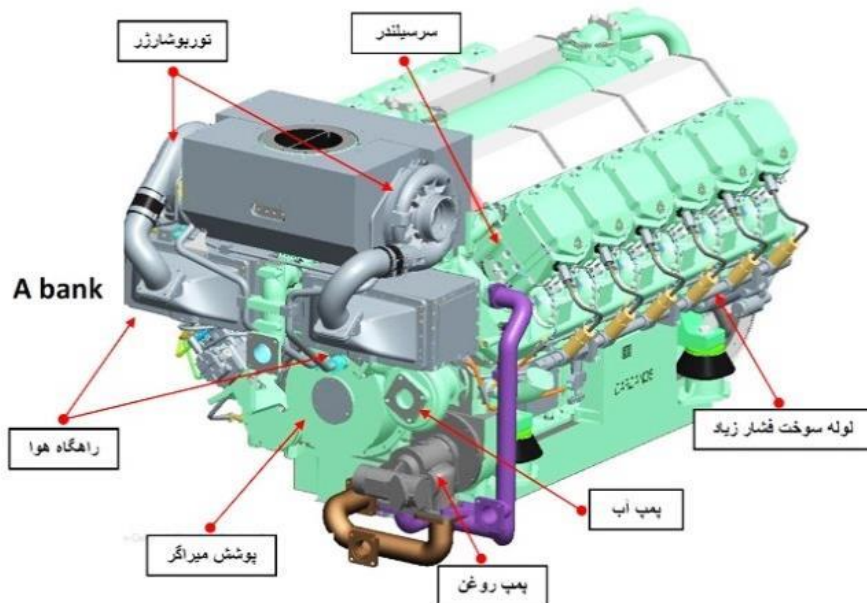
الف) شرکت دسا (دیزل سنگین ایران)

ب) شرکت ایدم

۵-۲-۱-۱ دیزل ملی شرکت دسا [۴۴]

از سال ۱۳۸۳ کار پژوهش بر روی طراحی و تولید موتور دیزلی سنگین ملی آغاز شد. شرکت صنعتی و تولیدی دیزل سنگین ایران (دسا) پس از طراحی موفق موتور دیزل سنگین ملی، موتور مربوطه را بر روی کشنده مانوری هیتاچی شرکت راه آهن بهره‌برداری نمود در شرایط فعلی این موتور قادر به برآورده نمودن نیاز توانی ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ کیلووات در سرعت‌های موتور ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ دور بر دقیقه است. در شکل

۵-۱ و جدول ۵-۱ به ترتیب ساختار و مشخصات فنی موتور دیزل ملی نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱: طرح موتور ملی G87 شرکت دسا [۲]

جدول ۵-۱: مشخصات فنی موتور ملی شرکت دسا [۲]

دیزلی	نوع موتور
۱۲ خورجینی	تعداد و آرایش سیلندرها
۱۸۰۰/۱۵۰۰	سرعت دورانی موتور (دور بر دقیقه)
۱۱۰۰/۱۰۰۰	توان موتور (کیلووات)
۲۰۷۰	بیشینه سرعت دورانی (دور بر دقیقه)
۱۲۰۰	بیشینه توان موتور (کیلووات)
۳۸۰۰	وزن خشک موتور (کیلوگرم)
۴۳۵۰	وزن تر موتور (کیلوگرم)
۱۴۲۰*۱۳۰۰*۲۵۷۲	طول و عرض و ارتفاع موتور (میلیمتر)
گازوئیل کم گوگرد	نوع سوخت مصرفی
24VDC	ولتاژ مورد نیاز
0.25	ذرات ریز تولیدی (g/kWh)

۷	اکسیدهای ازت تولیدی (g/kWh)
---	-----------------------------

۵-۲-۱-۲ موتور دیزل شرکت ایدم [۴۵]

ایدم یکی از برترین تولید کنندگان موتورهای دیزل سبک، نیمه سنگین و سنگین در خاورمیانه است که در سال ۱۳۴۸ شمسی با سرمایه گذاری مشترک ایران و آلمان و تحت لیسانس شرکت دایملر بنز آلمان تأسیس و در سال ۱۳۵۰ به بهره برداری رسیده است.

اولین محصولات آن در انواع موتورهای سری ۳۰۰ بر روی مینی بوس، اتوبوس و کامیون های تولیدی شرکت ایران خودرو و خاور نصب و مورد استفاده قرار گرفت در ادامه و گسترش و ارتقاء محصولات تولیدی هم اکنون مدل های جدید را با ارتقاء سطح آلاینده گی یورو ۲ و یورو ۳ و یورو ۴ تولید می نماید.

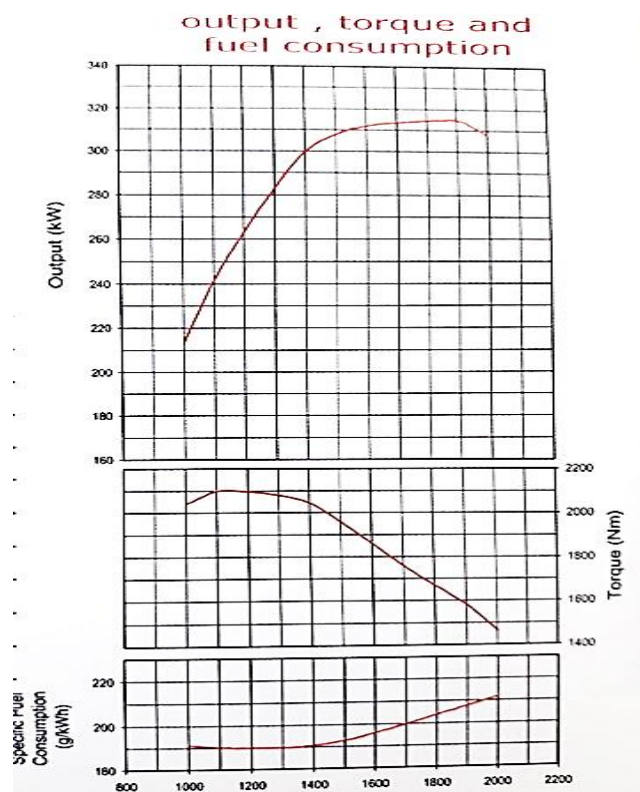
دیزل منتخب: در فصل قبل محاسبات لازم جهت تعیین مشخصات دیزل جایگزین در لوکوموتیو دیزل الکتریک هیبرید، انجام شد و توان دیزل جایگزین در حدود ۳۱۰ کیلووات محاسبه گردید. پس از بررسی شرکت های سازنده و واردکننده دیزل در کشور، ظرفیت تامین دیزل در شرکت ایدم شناسایی شد. در بین محصولات تولید شده در شرکت ایدم، دیزل سری ۴۵۷ با حداکثر توان ۳۱۵ کیلووات به عنوان دیزل جایگزین در لوکوموتیو هیبرید انتخاب می شود. در جدول ۵-۲ مشخصات فنی و در شکل ۵-۲ منحنی توان و گشتاور و مصرف سوخت دیزل ارائه شده است. همچنین در جدول ۵-۳ قیمت هر واحد از این محصول جهت استفاده در مطالعات از شرکت مربوطه استعلام گردید. شایان ذکر است با توجه به تجاری شدن این محصول، طبق نظر کارشناس فروش شرکت، هزینه یک نمونه و تعداد بالای آن در تولید انبوه یکسان می باشد.

در جدول ۵-۳ و دیگر جداول مرتبط با هزینه میزان قیمت دلار ۲۰,۰۰۰ تومان و یورو ۲۶,۰۰۰ تومان معادل ۱/۳ برابر دلار در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۲: مشخصات فنی دیزل ۴۵۷ شرکت ایدم

تعداد سیلندر	۶
قطر سیلندر (میلی متر)	128/155
حجم موتور	11.97
نسبت تراکم	17.75:1

۳۱۵	حداکثر قدرت خروجی (کیلووات)
۱۹۰۰	سرعت (دور بر دقیقه)
22.05	فشار متوسط موثر (بار)
۲۱۰۰	حداکثر گشتاور (نیوتن بر متر)
۱۰۴۵	وزن موتور خشک (کیلوگرم)
3.32	نسبت وزن بر قدرت (کیلوگرم بر کیلووات)
۱۱۲۴*۹۶۳*۱۴۴۳	طول و عرض و ارتفاع (میلی متر)
ECU	کنترل موتور
۲	سوپاپ هوا
۲	سوپاپ دود
EURO 3 USA EPA 94	استاندارد



شکل ۲-۵: منحنی توان و گشتاور خروجی و مصرف سوخت در دیزل ۴۵۷

جدول ۳-۵: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه دیزل ۴۵۷ با توان ۳۱۵ کیلو وات

نوع تجهیز	هزینه نمونه اولیه	هزینه تولید انبوه (بیش از ۲۰ عدد)
دیزل سری سری ۴۵۷ شرکت ایدم	۱۸۴۶۰ یورو (حدود ۴۸۰ میلیون)	۱۸۴۶۰ یورو (حدود ۴۸۰ میلیون)

۲-۲-۵ ژنراتور

ماه نیرو تنها و اولین تولید کننده ژنراتور های صنعتی در ایران از سال ۱۳۶۰ تحت لایسنس شرکت آلمانی (AVK) است که تولید ژنراتور های سه فاز سنکرون از رنج ۳۰ الی ۵۳۰ کیلو ولت آمپر را آغاز نموده و محصولات آن علاوه بر صنعت برق در حمل و نقل ریلی کشور نیز مورد استفاده قرار می گیرند که از جمله آن لوکوموتیوهای مسافربری شرکت رجا است. بر اساس طراحی انجام گرفته در فصل چهارم و مشخصات استخراج شده، از بین محصولات شرکت ماه نیرو، ژنراتور مدل DSG52 M2-4 جهت جایگزینی در لوکوموتیو مانوری انتخاب می گردد. مشخصات فنی ژنراتور مربوطه در جدول ۴-۵ ارائه شده است [۴۶]. همچنین در جدول ۵-۵ قیمت هر واحد از این محصول جهت استفاده در مطالعات از شرکت مربوطه استعلام گردید. شایان ذکر است در اینجا نیز همانند موتور دیزلی، با توجه به تجاری شدن این محصول، طبق نظر کارشناس فروش شرکت، هزینه یک نمونه و تعداد بالای آن در تولید انبوه یکسان می باشد.

جدول ۴-۵: مشخصات فنی ژنراتور DSG52M2-4 ماه نیرو

توان نامی (KVA)	۴۰۰
توان اکتیو (kW)	۳۲۰
جریان نامی (A)	۵۱۶
تعداد قطب	۴
ضریب توان	۰.۸
توان مکانیکی (kW)	۳۴۳
کلاس عایقی	H
وزن (Kg)	۱۲۰۰
سرعت (rpm)	۱۵۰۰
استاندارد	IEC60034

جدول ۵-۵: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه ژنراتور منتخب

نوع تجهیز	هزینه نمونه اولیه	هزینه تولید انبوه (بیش از ۲۰ عدد)

ژنراتور سنکرون سری DSG52 M2-4 شرکت ماه نیرو	۷۰۰۰ یورو (۱۸۲ میلیون تومان)	۷۰۰۰ یورو (۱۸۲ میلیون تومان)
---	------------------------------	------------------------------

۳-۲-۵ باتری

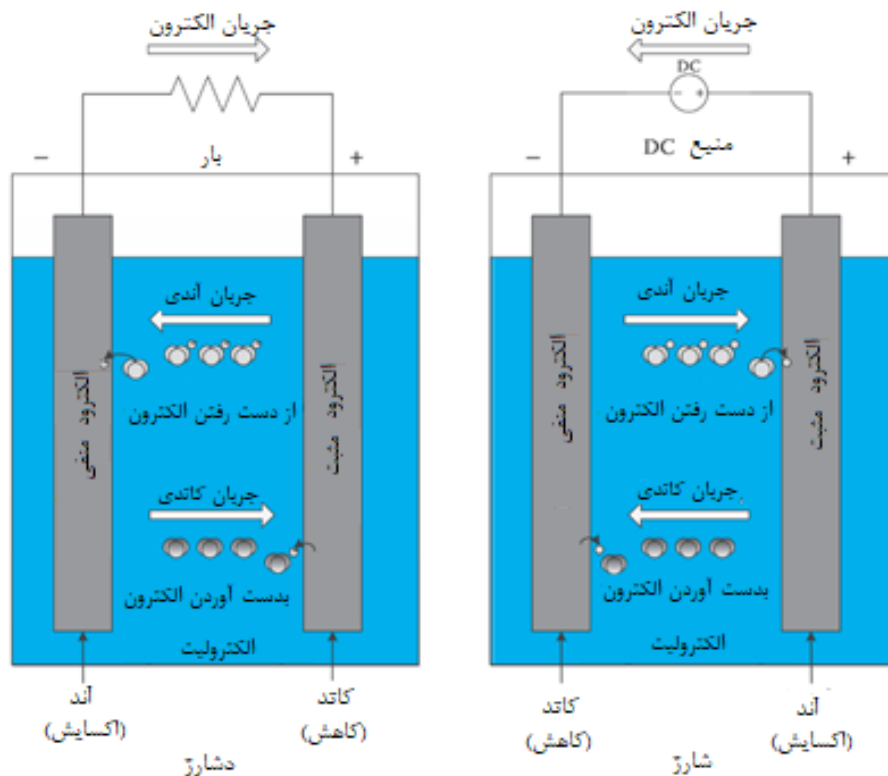
جهت برآورد هزینه باتری نیاز است تا در ابتدا بر اساس خواسته‌های عملکردی و دیگر معیارها سلول مناسب انتخاب شود. سپس براساس آن سلول مجموعه باتری طراحی شود و نهایتاً هزینه تولید مجموعه باتری چه بصورت یک نمونه و چه به صورت تولید انبوه محاسبه شود. در فصل قبل مقدار ظرفیت و توان باتری مورد نیاز جهت استفاده در لوکوموتیو مانوری هیبریدی به ترتیب برابر ۱۳۰ kWh و ۶۵۰ kW محاسبه شد. در این بخش به طراحی و برآورد هزینه مجموعه باتری پرداخته خواهد شد.

در طراحی مجموعه باتری، انتخاب نوع باتری و یا به طور دقیق تر نوع سلول از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. معیارهای مهمی در انتخاب نوع سلول تأثیر گذارند که از مهم ترین آنها می توان مواردی نظیر: هزینه، طول عمر، ایمنی، میزان تواندهی، دشارژ خودبخود پایین و چگالی انرژی و توان اشاره کرد. با توجه به اهمیت انتخاب سلول در قسمت اول این بخش پس از ارائه مقدمه ای کوتاه درباره ساختار باتری به معرفی انواع باتری های مورد استفاده در کاربرد تراکش و خودرویی پرداخته می شود. در ادامه نوع باتری مورد نظر پیشنهاد شده و طراحی مجموعه باتری و محاسبات اقتصادی بر اساس آن انجام خواهد پذیرفت.

- مقدمه ای درباره باتری:

منبع توان الکتروشیمیایی یا باتری وسیله ای است که انرژی آزاد شده از واکنش شیمیایی را مستقیماً به الکتریسته تبدیل می کند. باتری از مجموع چند سلول الکتروشیمیایی ساخته شده است. اساس عملکرد سلول های الکتروشیمیایی بر تبدیل انرژی الکتریکی به شیمیایی (حین شارژ) یا بصورت عکس یعنی تبدیل انرژی شیمیایی به الکتریکی (حین دشارژ) بنا نهاده شده است. هر باتری براساس واکنش الکتروشیمیایی درون آن مشخص و تعریف شده است. بدین صورت که یک الکترود یون آزاد کرده و الکترود دیگر الکترون جذب می کند و بدین وسیله می توان مسیر بسته جریان را بوجود آورد. اجزاء اصلی یک سلول عبارتند از: الکترودهای مثبت و منفی، الکترولیت.

شکل ۳-۵ نحوه عملکرد یک سلول باتری الکتروشیمیایی را حین شارژ و دشارژ نشان می دهد.



شکل ۳-۵: نحوه عملکرد سلول حین شارژ و دشارژ

از دیگر مولفه‌های باتری می‌توان از جمع‌کننده جریان یا ترمینال‌های جریان نام برد که جریان را به سمت خروجی هدایت می‌کنند و از اجزاء دیگر آن جدا کننده‌ها هستند که بخش الکتروود مثبت و منفی را از هم جدا می‌کنند که در حقیقت از اتصال کوتاه شدن دو الکتروود جلوگیری می‌کنند. اگر چند سلول را بصورت سری وصل کنیم باعث افزایش سطح ولتاژ خواهیم شد، هنگامی که بصورت موازی سلول‌های یکسانی را به هم وصل کنیم توان سلول را افزایش می‌دهیم [۴۷].

- انواع باتری‌های الکتروشیمیایی مورد استفاده در کاربرد خودرو

انواع باتری‌های مورد کاربرد در خودروهای برقی شامل باتری‌های سرب-اسید، باتری‌های نیکل-کادمیوم و نیکل-هیدرید فلزی و باتری‌های لیتیومی هستند که مشخصات آنها در جدول ۶-۵ با هم مقایسه شده است [۲۴، ۴۱]. امروزه باتری‌های لیتیومی عمده باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی و هیبرید برقی را شامل می‌شوند.

- باتری‌های سرب-اسید

باتری سرب-اسیدی که در سال ۱۸۵۹ اختراع شده است طی سال‌ها محصول تجاری موفقی بوده و هنوز هم علی‌رغم قابلیت ذخیره انرژی کم نسبت به وزن و حجم آن، به دلیل هزینه پایین و عرضه زیاد

بعنوان ذخیره‌ساز انرژی در برخی وسایل نقلیه سبک استفاده می‌شود. چگالی انرژی این نوع باتری به دلیل وزن اتمی بالای سرب، کم است.

در باتری‌های سرب-اسیدی ماده شیمیایی عمده تشکیل دهنده آند، اکسید سرب است. الکترون‌ها در حین دشارژ از کاتد خارج می‌شوند. ماده شیمیایی عمده تشکیل دهنده کاتد، سرب متخلخل است. لازم به ذکر است که سرب یا اکسید آن از لحاظ مکانیکی قابلیت فرم‌گیری مناسب ندارند و اغلب به کمک افزودن آلیاژهای مختلف و هم‌چنین شبکه‌های نگهدارنده حالت‌دهی می‌شوند. ضمناً اصطلاحاً آنها را مواد فعال نیز می‌گویند زیرا در اصل واکنش شیمیایی داخل باتری به کمک سرب و اکسید آن صورت می‌گیرد.

الکترولیت در باتری‌های سرب اسیدی محلول اسید سولفوریک با غلظتی در حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد و آب با غلظتی در حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد است. ترکیب آب و اسید سولفوریک باعث می‌شود که اسید سولفوریک بصورت یونیزه درآمده و به یون‌های H^+ و HSO_4^- تبدیل شود.

جداکننده و فاصله‌دهنده، بخش دیگر باتری‌های سرب اسیدی را تشکیل می‌دهند. وظیفه اصلی آنها جداسازی و ایزوله کردن الکتریکی قطب‌های مثبت و منفی از یکدیگر است. بخشی از تکنولوژی ساخت باتری‌های سرب اسیدی مربوط به طراحی این ایزولاتورهای الکترومکانیکی است. در بعضی از انواع که از نظر حجم باتری محدودیتی وجود ندارد. این ایزولاسیون به کمک ایجاد فاصله فیزیکی بین الکترودها ایجاد می‌شود که باعث ارزان‌تر شدن باتری ولی افزایش حجم آن می‌شود. انواع مختلفی از جداکننده‌ها تا بحال ابداع شده‌اند که مرسوم‌ترین آنها عبارتند از:

جداکننده‌های PVC: این نوع جداکننده‌ها اغلب در باتری‌های معمولی (Normal) دریچه دار (Vented) با آلیاژ سرب - آنتیموان استفاده می‌شود که از لحاظ هدایت الکتریکی از جمله بدترین جداکننده‌های باتری است.

جداکننده‌های سلولزی که از هدایت الکتریکی نسبی و تخلخل مناسبی برخوردار هستند.

جداکننده‌های پلی اتیلنی: از استحکام مکانیکی و هدایت مناسبی برخوردار هستند و به دلیل شکل پذیری مناسب خود اغلب بصورت پاکتی الکترودهای مثبت را در بر می‌گیرند.

جداکننده‌های AGM (Absorptive Glass Mat): تقریباً به عنوان بهترین نوع جداکننده شناخته می‌شوند و تأثیر بسزایی در برگشت‌پذیری مجدد اکسیژن آزاد شده در واکنش‌ها به محیط شیمیایی باتری‌ها بازی می‌کنند.

باتری‌های سرب اسیدی سوپاپ دار (VRLA): هدف از طراحی آنها ارتقاء بخشیدن به ترکیب

شیمیایی اکسیژن در الکتروود منفی و در نتیجه به حداقل رساندن کاهش آب است. در طراحی های VRLA، اسید به وسیله سیلیکاژل، تثبیت شده یا در جدا کننده هایی از جنس شیشه متخلخل با روزنه هایی برای انتقال اکسیژن، جذب گردیده است. عمل پخش اکسیژن از صفحه مثبت به صفحه منفی انجام شده و در آنجا ضمن اکسید نمودن سرب آن به پتانسیل لازم برای تولید هیدروژن جلوگیری می کند. چون در همین اثنا صفحه منفی در حال شارژ شدن است، محصول دشارژ فوراً بصورت سرب، احیاء شده و توزان شیمیایی سلول ابقا می گردد. از این رو مجموع خالص این واکنش های شیمیایی صفر است، بنابراین انرژی الکتریکی که در طول شارژ به سلول وارد می شود، به انرژی حرارتی تبدیل می شود. در لوکوموتیو هیبرید داخلی ساخته شده در سال ۱۳۷۹ از باتری های سرب- اسید به عنوان منبع ذخیره ساز انرژی استفاده شد.



شکل ۴-۵: استفاده از باتری سرب- اسید در لوکوموتیو هیبرید داخلی ساخته شده در سال ۱۳۷۹

پیش از توسعه باتری های نیکلی و لیتیومی، باتری های سرب اسید نوع VRLA در کاربرد خودروهای برقی مورد استفاده قرار می گرفتند. ولی با توسعه باتری های نیکلی و پس از آن باتری های لیتیومی کاربرد این نوع باتری محدود و محدودتر شد، بطوری که امروزه فقط در برخی خودروهای الکتریکی سبک و موتور سیکلت ها آن هم بدلیل قیمت پایین تر از این نوع باتری استفاده می شود. در جدول ۶-۵ مشخصات این نوع باتری با دیگر انواع باتری قابل کاربرد در خودروهای برقی مقایسه شده است.

- باتری‌های نیکل-کادمیوم

در این نوع باتری از اکسید نیکل و کادمیم به عنوان الکترود استفاده شده است. جریان نشتی این باتری از نوع سرب اسید بیشتر است. این باتری چگالی انرژی و توانی بیشتری نسبت به نوع سرب اسید دارد و همچنین نسبت به آن نیز گران تر است. تولید این نوع باتری به دلیل خطرات زیست محیطی که کادمیم دارد از دهه

جدول ۵-۶: مقایسه انواع باتری قابل کاربرد در خودروهای برقی

مشخصات	سرب-اسید	نیکل کادمیوم	نیکل هیدرید فلزی	لیتیوم یون
انرژی مخصوص (Wh/kg)	۳۵-۵۰	۵۰-۶۰	۷۰-۹۵	۸۰-۱۳۰
مقاومت داخلی (mΩ)	<۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۲۵-۵۰
چرخه طول عمر (۸۰٪ عمق دشارژ)	۵۰۰	۸۰۰	۷۵۰-۱۲۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰
زمان شارژ سریع	۸-۱۶ ساعت	۱ ساعت	۲-۴ ساعت	زیر ۱ ساعت
دشارژ خودبه‌خودی	۵٪	۲۰٪	۳۰٪	<۱۰٪
بازدهی انرژی	>۸۰٪	۷۵٪	۷۰٪	>۹۵٪
بیشته جریان بار	۵C	۲۰C	۵C	>۳۰C
دوره بازرسی	۳-۶ ماه	۳۰-۶۰ روز	۶۰-۹۰ روز	نیازی ندارد
هزینه (\$/kwh)	۱۲۰-۱۵۰	۲۵۰-۳۵۰	۲۰۰-۳۵۰	۱۵۰-۳۵۰

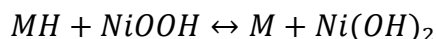
۱۹۹۰ میلادی محدود شده و جای خود را به باتری‌های لیتیومی و نیکل-هیدرید فلزی داد [۴۷]. در جدول ۵-۶ مشخصات این نوع باتری با دیگر انواع باتری قابل کاربرد در خودروهای برقی مقایسه شده است.

- باتری‌های نیکل-هیدرید فلزی

باتری‌های نیکل-هیدرید فلزی گونه‌ای از باتری‌های قابل شارژ هستند که شباهت زیادی با باتری‌های نیکل-کادمیومی دارند. در این باتری‌ها آند از جنس نیکل اکسی هیدروکسید (مانند باتری‌های نیکل-کادمیوم) و کاتد از جنس آلیاژ جذب کننده هیدروژن به جای کادمیوم استفاده شده است. این نوع باتری در قیاس با نوع نیکل-کادمیوم، دو تا سه برابر ظرفیت بیشتری دارند. نخستین بار این نوع باتری در سال ۱۹۹۲ میلادی به صورت تجاری به بازار عرضه شد. در این باتری به جای کادمیوم، از هیدروژن جذب شده

در آلیاژ فلزی به عنوان ماده فعال منفی استفاده می شود. حذف کادمیوم نه تنها موجب افزایش چگالی انرژی می شود بلکه منبع توان سازگارتری با محیط زیست که با مشکلات کمتری از نظر دفع زباله مواجه است، ایجاد می کند. اما سلول نیکل - هیدرید فلزی بقای شارژ ضعیف تری دارد و تحمل آن در برابر اضافه شارژ از شارژ از سلول نیکل - کادمیوم کمتر است.

واکنش کلی در سلول این باتری:



وقتی باتری دشارژ است، هیدرید فلز در کاتد اکسید می شود و آلیاژ فلز شکل می گیرد و نیکل اکسی هیدروکسید در آند به نیکل هیدروکسید کاهش می یابد. طی شارژ برعکس این واکنش اتفاق می افتد.

آلیاژهای جذب هیدروژن در دهه ۱۹۶۰ حین انجام تحقیقات در مورد مواد مغناطیسی کشف شدند. این مواد قادرند با بیش از هزار برابر حجم خودشان هیدروژن جذب کرده و معمولاً از دو فلز متشکل اند که یکی از آنها بخودی خود، هیدروژن را به طور گرمازا جذب کرده و در دومی، پروسه از نوع گرماگیر بوده و این فلز بصورت کاتالیزور در جذب سطح تفکیکی (که همان جدا کردن اجزاء ترکیب از طریق جذب سطحی یا تراکم ماده بر روی سطح می باشد) شرکت می کند. جذب سطحی تفکیکی قبل از پخش اتم هیدروژن در شبکه صورت می گیرد. مهم ترین آلیاژهای جذب هیدروژن سری AB₂ (مثل ZrNi₂) و سری AB₅ (مثل LaNi₅) است. با جایگزین نمودن جزئی یکی از این مواد می توان آلیاژ را مثلاً برای کنترل انبساط حجمی، تشکیل لایه سطحی و غیره به دقت تنظیم نمود و از این رو الکتروود منفی بهینه ای فراهم می گردد. در جدول ۵-۶ مشخصات این نوع باتری با دیگر انواع باتری قابل کاربرد در خودروهای برقی مقایسه شده است.

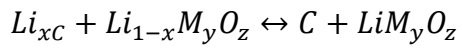
بیش از پیشرفت تکنولوژی سلول های لیتیوم-یونی، سلول های نیکل - هیدرید فلزی به علت داشتن چگالی نسبتاً بالای انرژی به شدت در خودروهای هیبرید استفاده می شدند و شرکت های تولیدکننده این نوع باتری ها از جمله شرکت هایی نظیر VARTA-Ovonic-Panasonic سالانه مقادیر زیادی از این نوع باتری ها را روانه بازار تولید خودرو هیبرید می کردند.

- باتری های لیتیوم-یون

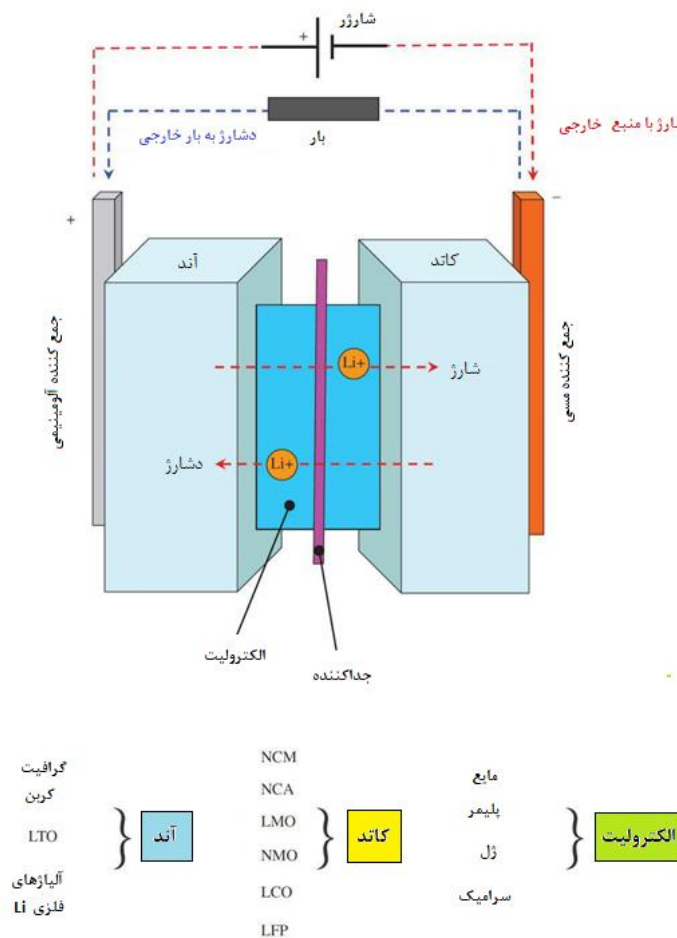
باتری لیتیوم-یون یک خانواده از باتری های قابل شارژ است که در آن در زمان دشارژ، یون های لیتیوم از کاتد به سمت آند و در هنگام شارژ شدن وارونه حرکت می کنند. باتری های لیتیوم-یون بالاترین چگالی انرژی را فراهم می سازند که تقریباً دو برابر انرژی قابل دسترسی از باتری های نیکل -

کادمیوم است و امروزه تقریباً جایگزین باتری‌های NiMH شده‌اند.

واکنش کلی صورت گرفته در سلول باتری لیتیوم-یون به صورت زیر است:



در ساختار سلول باتری لیتیوم-یون در کاتد و آند باتری از مواد مختلف استفاده می‌شود که هر کدام از این مواد باعث تغییر در برخی پارامترهای عملکردی و همچنین هزینه این نوع باتری می‌شود که در بخش بعدی به این موضوع نیز پرداخته خواهد شد.



شکل ۵-۵: سلول لیتیوم-یون [۴۸]

در جدول ۵-۶ نیز مشخصات این نوع باتری با دیگر انواع باتری قابل کاربرد در خودروهای برقی مقایسه شده است. همانطور که در جدول ۵-۶ مشاهده می‌شود باتری‌ها لیتیوم یون در اکثر معیارها نسبت به دیگر انواع باتری برتری دارند. بعنوان مثال این نوع باتری‌ها دارای انرژی مخصوص بیشتر،

مقاومت داخلی کمتر و در نتیجه بازدهی بیشتر، زمان شارژ سریعتر، دشارژ خودبخودی مناسب، چرخه عمر به مراتب بیشتر، جریان دهی بیشتر است. شاید بتوان عیب اصلی این باتری را در ابتدای تجاری سازی آن در دهه ۲۰۰۰ میلادی قیمت بالای آن برشمرد که با توجه به توسعه و تولید انبوه این نوع باتری طی دهه اخیر قیمت آن به شدت کاهش یافته و قابل رقابت و یا حتی بهتر از برخی انواع دیگر باتری شده است. در شکل ۵-۶ بررسی تغییرات قیمت باتری لیتیوم یون طی دهه گذشته را نشان می دهد [۴۱] که به خوبی مشاهده می شود که قیمت این باتری طی کمتر از یک دهه به کمتر از یک پنجم کاهش یافته است.



شکل ۵-۶: بررسی تغییرات قیمت باتری لیتیوم یون از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ [۴۱]

همچنین همانطور که در جدول مشاهده می شود تقریباً تمامی لوکوموتیوهای هیبریدی مدرن ساخته شده در سراسر دنیا (که در فصل دوم معرفی شدند) از باتری لیتیوم-یون به عنوان منبع ذخیره ساز خود استفاده کرده اند.

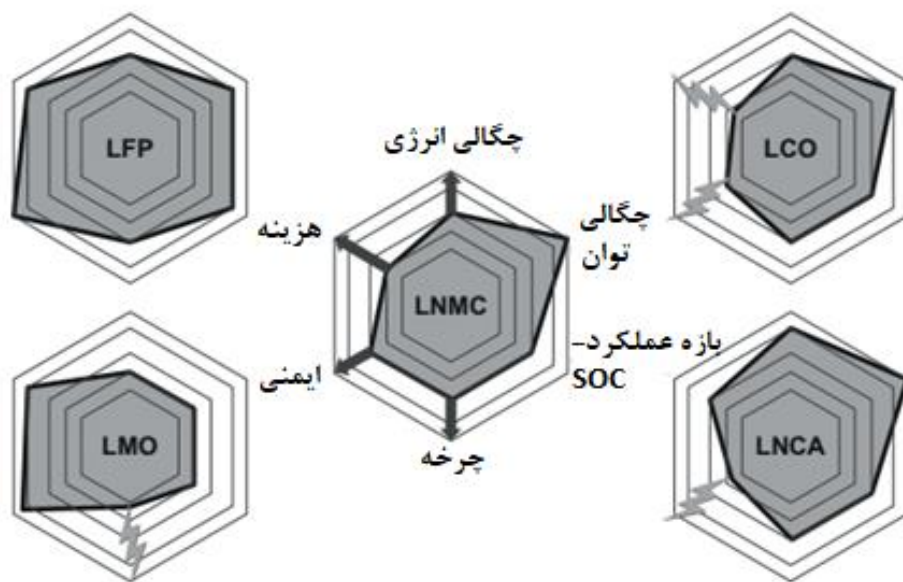
جدول ۵-۷ مشخصات فنی لوکوموتیوهای هیبرید موردنظر

لوکوموتیو	سال ساخت	سیستم هیبرید	کل توان خروجی	توان موتور دیزل	نوع باتری
سری HD300-توشیبا	۲۰۱۰	سری	۵۰۰ Kw	۲۰۵ Kw	لیتیوم-یون
TEM9H هیبرید-سینارا	۲۰۱۱	نامشخص	۸۹۵ Kw	۶۳۹ Kw	لیتیوم-یون
GG20B-ریل پاور	۲۰۰۴	سری	۱۴۹۰ Kw	۲۱۶ Kw	لیتیوم-یون
H3-آلستوم	۲۰۱۴	سری	۷۰۰ Kw	۳۵۰ Kw	لیتیوم-یون
Rada 718	۱۹۸۶	سری	۵۱۰ Kw	۱۸۹ Kw	نیکل-کادمیوم
هیبرید Mk 48 Raba	---	سری	۳۶۴ Kw	۲۰۴ Kw	لیتیوم-یون

با توجه به مطالب فوق باتری لیتیوم-یون به عنوان باتری مورد استفاده در نظر گرفته شد. اما همانطور که در بالا نیز اشاره شد، باتری لیتیوم-یون بسته به جنس الکتروود به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شود که در ادامه به بررسی و مقایسه انواع باتری لیتیوم-یون پرداخته می‌شود.

۵-۳-۱ انواع باتری‌های لیتیوم-یون

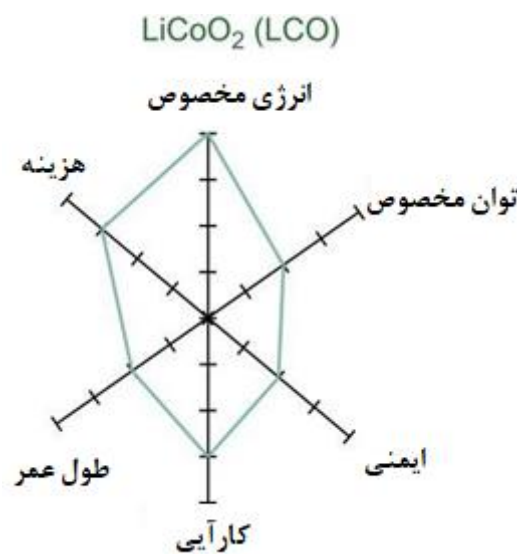
معمولاً در الکتروودهای باتری‌های لیتیوم-یون تنها از یک نوع ماده استفاده نمی‌شود بلکه مخلوطی از مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و یک دسته‌بندی بر اساس ماده‌ای که در الکتروود استفاده می‌شود برای باتری‌های لیتیوم-یون وجود دارد. یکی از موای که به‌عنوان کاتد در خودروهای برقی سبک مورد استفاده قرار می‌گیرد $LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$ (لیتیوم نیکل منگنز کبالت اکسید، NMC) است. NMC عملکرد معقولی با توجه به نیازهای اصلی خودروی برقی (ایمنی، هزینه، طول عمر پایدار، چگالی انرژی و توان) از خود نشان می‌دهد. در عین حال کاتد از جنس $LiMn_2O_4$ (اکسید لیتیوم منگنز، LMO) عملکرد ایمنی بهتری دارد و به لحاظ هزینه نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر است، چرا که نیاز به نیکل و کبالت ندارد. ماده دیگری که مورد استفاده قرار می‌گیرد $LiFePO_4$ (فسفات لیتیوم آهن، LFP) است. LFP ایمنی عالی و چرخه عمر خوب ولی چگالی انرژی کمی دارد. $LiNiAlO_2$ (اکسید لیتیوم نیکل کبالت آلومینیم، NCA) بالاترین انرژی و چگالی توان را ارائه می‌کند. اما از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه نیست. در ادامه بطور خلاصه به بررسی مشخصات هر کدام از این انواع باتری پرداخته می‌شود [۴۹].



شکل ۵-۷: ویژگی‌های انواع کاتدهای بکار رفته در سلول‌های لیتیوم-یونباتری اکسید لیتیوم - کبالت [۴۹]

• باتری اکسید لیتیوم کبالت

انرژی مخصوص بالای این نوع باتری باعث شده که برای گوشی‌های همراه، لپتاپ‌ها و دوربین‌های دیجیتال انتخاب خوبی باشد. کاتد باتری از جنس اکسید کبالت با ساختار لایه‌ای و آند آن از جنس گرافیت است.



شکل ۸-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری اکسید لیتیوم کبالت [۵۰]

جدول ۸-۵: مشخصات باتری اکسید لیتیوم کبالت [۵۰]

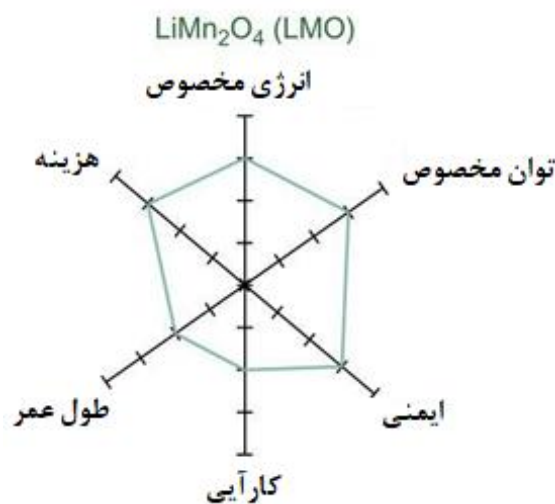
اکسید لیتیوم کبالت (LCO) کاتد: $LiCoO_2$ (~60% Co)، آند: گرافیت ۱۹۹۱	
ولتاژها	۳/۶ ولت نامی - ۴/۲ V/cell
انرژی مخصوص (ظرفیت)	۱۵۰-۲۰۰ Wh/kg
چرخه طول عمر	۵۰۰-۱۰۰۰
دمای تخریب باتری ^۱	۱۵۰ °C
کاربردها	گوشی همراه، تبلت، لپتاپ، دوربین

¹ Thermal runaway

توضیحات	انرژی ویژه خیلی بالا، توان ویژه محدود، گران بودن کبالت، سهم بازار تثبیت شده
---------	--

• باتری اکسید لیتیوم-منگنز

ظرفیت لیتیوم-منیزیم تقریباً یک سوم لیتیوم-کبالت است. اکثر باتری‌های لیتیوم-منگنز با لیتیوم-نیکل-منگنز تلفیق می‌شوند تا انرژی مخصوص را بهبود بخشند و طول عمر آن را زیاد کنند. بخش لیتیوم-منگنز وظیفه شتاب‌دهی (تواندهی بیشتر) و بخش لیتیوم-نیکل-منگنز محدوده طولانی‌راندگی (ظرفیت انرژی) را تامین می‌کند.



شکل ۹-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری اکسید لیتیوم منگنز [۵۰]

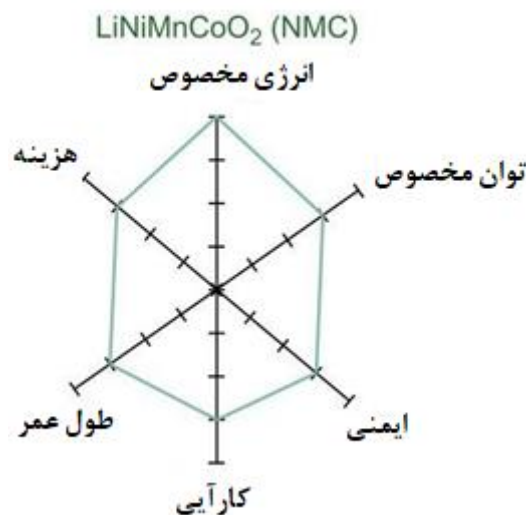
جدول ۹-۵: مشخصات باتری اکسید لیتیوم منگنز [۵۰]

اکسید لیتیوم منگنز (LMO)	
کاتد: $LiMn_2O_4$ ، آند: گرافیت	
۱۹۹۶	
ولتاژها	۳/۷ ولت نامی - ۴/۲ V/cell
انرژی مخصوص (ظرفیت)	۱۵۰-۱۰۰ Wh/kg
چرخه طول عمر	۷۰۰-۳۰۰
دمای تخریب باتری	۲۵۰ °C
کاربردها	تجهیزات پزشکی، پیشراندهای الکتریکی

توضیحات	توان بالا ولی ظرفیت کم، ایمن تر لیتیوم کبالت، معمولاً با NMC برای عملکرد بهتر ترکیب می‌شود
---------	--

اکسید لیتیوم-نیکل-منگنز-کبالت

یکی از موفق‌ترین باتری‌های لیتیومی است. ترکیب کاتد معمولاً بصورت یک سوم نیکل، یک سوم منگنز و یک سوم کبالت است. سازنده‌های باتری از سیستم‌های کبالتی به سمت کاتدهای نیکلی به دلیل قیمت بالای کبالت رفتند. یک مدل دیگر بصورت ۵ قسمت نیکل، ۳ قسمت کبالت و ۲ قسمت منگنز است.



شکل ۱۰-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری اکسید لیتیوم نیکل منگنز کبالت [۵۰]

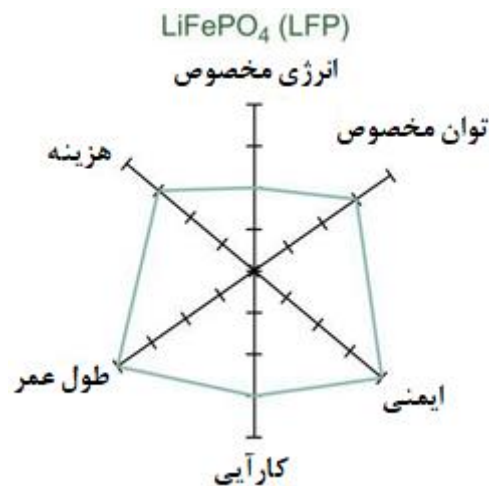
جدول ۱۰-۵: مشخصات باتری اکسید لیتیوم نیکل منگنز کبالت [۵۰]

لیتیوم نیکل منگنز کبالت اکسید (NMC)	
کاتد: LiNiMnCoO_2 ، آند: گرافیت	
۲۰۰۸	
ولتاژها	۳/۶ و ۳/۷ ولت نامی - ۴/۲ V/cell - ۳
انرژی مخصوص (ظرفیت)	۲۲۰-۱۵۰ Wh/kg
چرخه طول عمر	۲۰۰۰-۱۰۰۰
دمای تخریب باتری	۲۱۰ °C

کاربردها	تجهیزات پزشکی، دوچرخه برقی، خودرو برقی
توضیحات	ظرفیت و توان بالا، بعنوان سلول هیبرید کار می‌کند، سهم بازار در حال افزایش

باتری لیتیوم- فسفات آهن

دانشگاه تگزاس در سال ۱۹۹۶ فسفات را بعنوان ماده کاتد باتری‌های لیتیومی قابل شارژ کشف کرد. لیتیوم فسفات عملکرد الکتروشیمیایی خوبی با مقاومت کم دارد. مزایای کلیدی این باتری جریان‌دهی بالا، چرخه عمر خوب، پایداری دمایی خوب و ایمنی بهبود یافته است.



شکل ۱۱-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری فسفات لیتیوم آهن [۵۰]

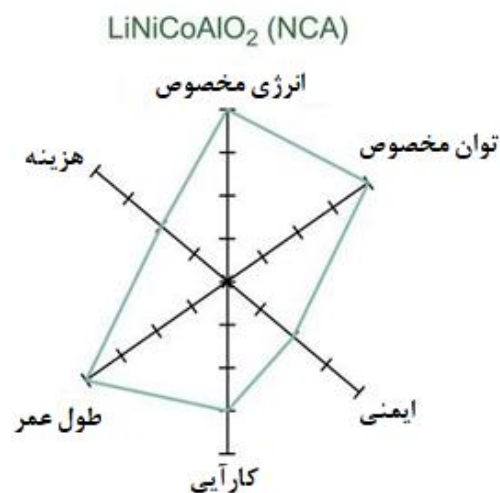
جدول ۱۱-۵: مشخصات باتری فسفات لیتیوم آهن [۵۰]

لیتیوم فسفات آهن (LFP)	
کاتد: $LiFePO_4$ ، آند: گرافیت	
۱۹۹۶	
ولتاژها	۳/۲ و ۳/۳ ولت نامی - ۲/۵ - ۳/۶۵ V/cell
انرژی مخصوص (ظرفیت)	۱۲۰-۹۰ Wh/kg
چرخه طول عمر	۲۰۰۰-۱۰۰۰

۲۷۰ °C	دمای تخریب باتری
کاربردهای ثابت و قابل حمل نیازمند بار زیاد و استقامت بالا	کاربردها
منحنی ولتاژ تخت ولی ظرفیت کم، یکی از ایمن ترین ها، بازار مخصوص بخود	توضیحات

باتری اکسید لیتیوم-نیکل-کبالت-آلومینیم

مشابه NMC، این نوع باتری انرژی ویژه بالا، توان ویژه خوب و طول عمر خوبی دارد. اضافه کردن آلومینیم از نظر شیمیایی پایداری بیشتری ایجاد می کند. انرژی بالا و چگالی توان و طول عمر خوب این باتری را برای پیشراندهای الکتریکی انتخاب مناسبی می کند. اما هزینه بالا و ایمنی مرزی ویژگی های منفی هستند.



شکل ۱۲-۵: تصویر شماتیک ویژگی های باتری اکسید لیتیوم نیکل کبالت آلومینیم [۵۰]

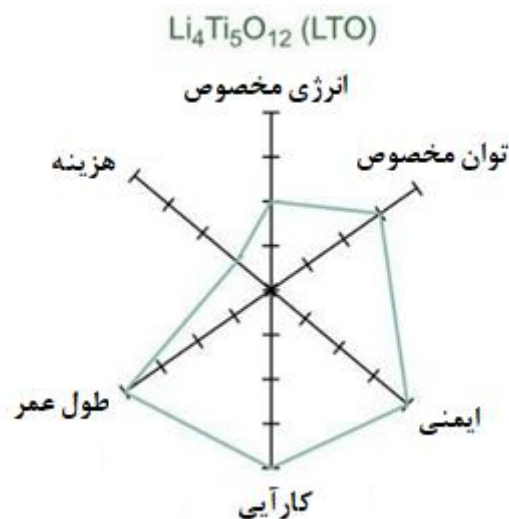
جدول ۱۲-۵: مشخصات باتری اکسید لیتیوم نیکل کبالت آلومینیم [۵۰]

اکسید لیتیوم نیکل کبالت آلومینیم (NCA)	
کاتد: $LiNiCoAlO_2$ (~9%Co) ، آند: گرافیت	
۱۹۹۹	
ولتاژها	۳/۶ ولت نامی - ۴/۲ V/cell
انرژی مخصوص (ظرفیت)	۲۶۰-۲۰۰ Wh/kg

چرخه طول عمر	۵۰۰
دمای تخریب باتری	۱۵۰ °C
کاربردها	تجهیزات پزشکی، صنعتی، پیشراشه‌های الکتریکی (تسلا)
توضیحات	مشابه LCO ، بعنوان سلول انرژی

• باتری لیتیوم تیتانات

در این باتری‌ها بجای گرافیت در آند از لیتیوم تیتانات استفاده می‌شود. کاتد می‌تواند اکسید لیتیوم منگنز یا NMC باشد.



شکل ۱۳-۵: تصویر شماتیک ویژگی‌های باتری لیتیوم تیتانات

جدول ۱۳-۵: مشخصات باتری لیتیوم تیتانات

لیتیوم تیتانات (LTO)	
کاتد: NMC ، آند: $Li_4Ti_5O_{12}$	
۲۰۰۸	
ولتاژها	۲/۴ ولت نامی - ۲/۸۵ V/cell - ۱/۸
انرژی ویژه (ظرفیت)	۸۰-۵۰ Wh/kg
چرخه طول عمر	۷۰۰۰-۳۰۰۰

یکی از ایمن ترین باتری های لیتیوم-یون	دمای تخریب باتری
UPS، پیشرانه الکتریکی (میتسوبیسی و هوندا) روشنایی خورشیدی معابر	کاربردها
عمر طولانی، شارژ سریع، دامنه دمایی گسترده اما انرژی ویژه کم و گران	توضیحات

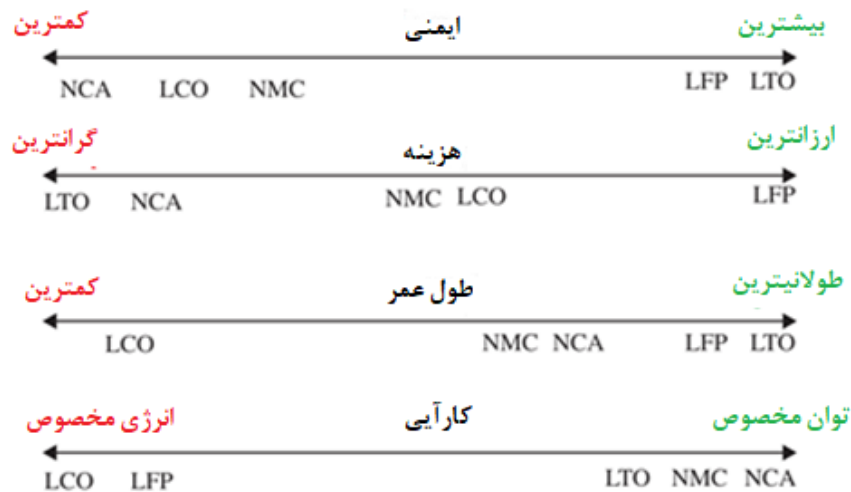
شکل ۱۴-۵ مقایسه ای بین مشخصات و عملکرد انواع باتری های یون-لیتیوم را نشان می دهد. همچنین در شکل ۱۵-۵ مقایسه هزینه و چگالی انرژی انواع باتری لیتیوم-یون نشان داده شده است [۵۰]. به منظور انتخاب نوع باتری مناسب برای کاربرد لوکوموتیو مانوری هیبریدی می بایست معیارهای مطلوب در ابتدا بررسی شود و سپس بر اساس آن معیارها نوع باتری لیتیومی انتخاب می شود. به منظور انتخاب نوع باتری مناسب می توان از نتایج شکل ۱۴-۵ و شکل ۱۵-۵ و جدول ۱۵-۵ استفاده کرد.

اولین معیار و شاید مهمترین معیار انتخاب باتری ایمنی باتری است که اهمیت و حساس بودن مأموریت لوکوموتیوهای مانوری این موضوع را در اولویت قرار می دهد. همانطور که در شکل ۱۴-۵ و جدول ۱۵-۵ مشاهده می شود، دو نوع باتری LFP و LTO از این حیث در وضعیت مطلوب تری قرار دارند. معیار مهم دوم طول عمر چرخه ای و تقویمی بالای باتری است. در صورت عمر بالا، لوکوموتیو نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری دارد که با توجه به مأموریت ۲۴ ساعته این لوکوموتیوها، در مسیر بودن و فعال بودن آن ها بسیار مهم خواهد بود. در شکل ۱۴-۵ و جدول ۱۵-۵ مشاهده می شود سلول LFP و LTO از این حیث در وضعیت مطلوب تری هستند. موضوع حایز اهمیت بعدی، هزینه است. همانطور که در جدول و شکل مشاهده می شود در اینجا سلول LFP وضعیت خوبی دارد و سلول LTO گرانترین هزینه را نسبت به دیگر سلول ها دارد. تا کنون جهت استفاده در کاربرد لوکوموتیو هیبریدی سلول LFP وضعیت بهتری نسبت به بقیه سلول ها داشت. شاید بتوان چگالی انرژی و توانی بالا را به عنوان دو عیب اصلی سلول LFP برشمرد که این معیار در کاربرد خودروهای سبک به دلیل محدودیت وزن و حجم مجموعه باتری بسیار حائز اهمیت است. اما نکته جالب آن است که در کاربرد لوکوموتیو بدلیل وجود فضای کافی برای مجموعه باتری، موضوع چگالی انرژی و انرژی مخصوص از درجه اهمیت کمی برخوردار است. حتی بدلیل توانایی ایجاد لغزش کمتر و نیرو کششی بیشتر^۱ هر چه وزن لوکوموتیو بیشتر باشد بهتر است. بنابراین عیب چگالی انرژی بالا به عنوان مزیت این نوع سلول در کاربرد لوکوموتیو هیبریدی در نظر گرفته می شود.

^۱ این موضوع بطور مشروح در گزارش مرحله سوم مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به مطالب فوق و بررسی‌های انجام گرفته سلول LFP (لیتیوم-فسفات-آهن) به عنوان سلول مناسب برای طراحی این بخش در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه به مقایسه انواع بسته‌بندی سلول‌های لیتیوم پرداخته خواهد شد و نوع مناسب نیز انتخاب خواهد شد.



شکل ۱۴-۵: مقایسه انواع باتری‌های لیتیوم-یون [۴۸]

جدول ۱۴-۵: مقایسه عملکرد انواع باتری‌های لیتیوم-یون [۴۹]

LTO	LFP	LMO	NMC	NCA	LCO	ولتاژ سلول، SOC ۵۰٪ / ۱۰۰٪
2.8V/2.4V	3.6V/3.3V	4.2V/3.9V	4.2V/3.7V	4.0V/3.6V	4.2V/3.8V	انرژی مخصوص ^۱
-	++	+	+++	+++	++	توان ^۲
+	++	+++	++	+++	++	عمر تقویمی ^۳
-	++	-	+	+++	+	عمر چرخه‌ای ^۴
+++	++	++	++	++	+	ایمنی ^۵
+++	+++	++	+	+	+	هزینه
-	++	++	++	+	-	

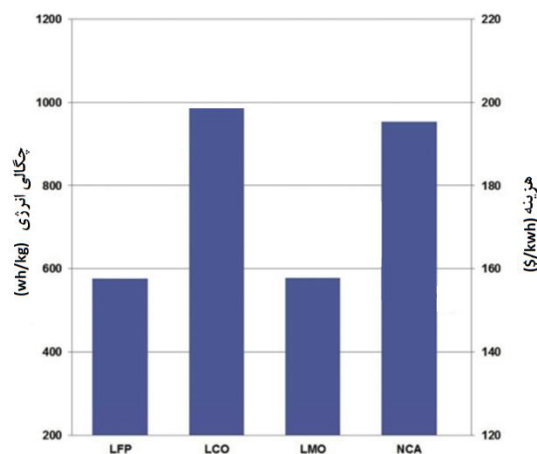
^۱ منظور از انرژی مخصوص مقدار انرژی قابل دریافت از باتری به ازای واحد جرم است (wh/kg).

^۲ میزان تواندهی باتری نسبت به ظرفیت آن

^۳ طول عمر باتری برحسب سال

^۴ تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ در طی عمر مفید باتری. در خودرو معمولاً عمر مفید باتری مادامی‌است که ظرفیت باتری به ۸۰٪ مقدار اولیه برسد.

^۵ ایمنی باتری در برابر شوک‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی



شکل ۱۵-۵: مقایسه هزینه و چگالی انرژی انواع باتری لیتیوم-یون [۵۰]

۵-۲-۳-۲ بسته‌بندی باتری‌های لیتیوم-یون

طراحی سلول‌های لیتیوم-یون خودروها معمولاً شامل یک یا چند اصطلاحاً رول ژله‌ای^۱ است که بصورت مارپیچ الکترودهای کاتد و آندها را تشکیل می‌دهند و توسط جداکننده‌های پلی اتیلن یا پلی پروپیلن جدا شده‌اند. یک مدل طراحی دیگر الکترودها که به طراحی الکترود انباشته^۲ معروف است در سلول‌های کیسه‌ای^۳ استفاده می‌شود. در باتری‌های لیتیوم-یون برای استفاده در وسایل نقلیه مجموعه‌ای از عملکردهای مدیریتی باید پیاده شود تا یک پارچگی ساختار، ایمنی، عملکرد باتری و پایداری طول عمر آن تضمین شود.

در خودروهای برقی، انواع مختلف سلول شامل استوانه‌ای^۴، منشوری^۵ یا کیسه‌ای^۶ (شکل ۱۶-۵) وجود دارد.

^۱ Jelly rolls

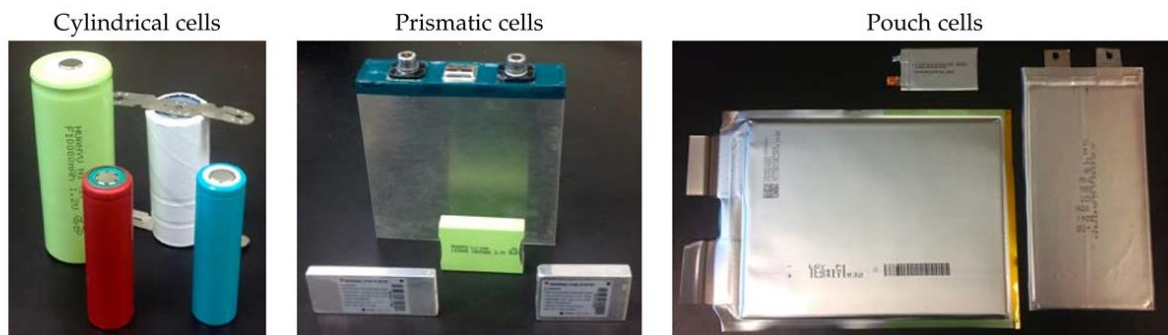
^۲ Stacked

^۳ Pouch

^۴ Cylindrical

^۵ Prismatic

^۶ Pouch



شکل ۱۶-۵: انواع مختلف سلول سلول باتری لیتیوم-یون

در جدول ۱۵-۵ ویژگی‌های انواع ساختار باتری‌های لیتیوم-یون نشان شده است [۴۸]. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود از لحاظ ایمنی (مقاومت در برابر تنش‌های مکانیکی و حرارتی) سلول‌های با بسته‌بندی استوانه‌ای و منشوری نسبت به سلول‌های کیسه‌ای ارجعیت دارند. در صورت استفاده از سلول‌های کیسه‌ای می‌بایست ایمنی آن را توسط بسته‌بندی^۱ مناسب افزایش داد. در این پروژه به منظور طراحی نمونه اولیه طرح پیشنهادی از سلول‌های استوانه‌ای استفاده شده است.

جدول ۱۵-۵: ویژگی‌های انواع ساختار باتری‌های لیتیوم-یون [۴۸]

کیسه‌ای	استوانه‌ای	منشوری	نوع ساختار / ویژگی
ضعیف	خوب	خوب	استحکام
عالی	خوب	بد	بسته‌بندی
اقتصادی	زیاد	زیاد	هزینه
خیلی خوب	خوب	خوب	دمایی
امکان تورم	خوب	دارد	ایمنی

در خودروهای برقی (سبک یا سنگین)، عموماً طراحی مجموعه باتری را بصورت ماژولار انجام می‌دهند. بدین شکل که ابتدا با استفاده از سری و موازی کردن تعدادی سلول یک ماژول باطری را طراحی می‌کنند. سپس با کنار هم قرار دادن ماژول‌ها، مجموعه باتری را بوجود می‌آورند [۴۹]. طراحی مجموعه باتری بصورت ماژولار این امکان را فراهم می‌کند تا در حین تعمیرات بدون تاثیر بر دیگر بخش‌ها ماژول معیوب را جایگزین و یا تعمیر کرد. همچنین از لحاظ جابجایی و مدیریت باتری طراحی بصورت ماژولار شرایط بهتری را فراهم می‌کند [۴۹]. معمولاً سعی می‌شود جهت ایمنی از ماژول‌های

¹ packaging

باتری با سطح ولتاژ کمتر از ۶۰ ولت استفاده شود [۴۹].

طراحی مجموعه باتری ۵-۲-۳-۳

طراحی این بخش برای دو نوع باتری خارجی و داخلی انجام شده است. همچنین محاسبه هزینه نیز برای هر دو نوع باتری انجام گرفته است.

طراحی مجموعه باتری با استفاده از ماژول‌های تولید خارج

در اولین طراحی، از ماژول‌های^۱ (یا بسته) ۴۸ ولتی باتری لیتیوم-یون تولید خارج کشور (کشور چین) که برای کاربردهای کششی و اتوبوس برقی طراحی شده استفاده شده است [۵۱]. تصویر ماژول در شکل ۱۷-۵ نشان داده شده است، همچنین مشخصات ماژول در

جدول ۵-۱۶ نشان داده شده است. شایان ذکر است ماژول باتری با مشخصات ذکر شده (ظرفیت، ولتاژ و تواندهی) به گونه‌ای انتخاب شده است تا عملکردهای درخواستی مورد نیاز را به خوبی برآورده کند.



شکل ۱۷-۵: ماژول ۴۸ ولتی مورد استفاده در طراحی

جدول ۱۶-۵: مشخصات ماژول ۴۸ ولتی مورد استفاده در طراحی [۵۱]

26650 LiFePo4 battery	نوع سلول
48V	ولتاژ نامی
100Ah	ظرفیت نامی
5 kWh	ظرفیت نامی بر حسب Kwh

¹ Module

1-5C¹	حداکثر جریان خروجی
0-45	محدوده دمایی شارژ باتری (°C)
-20~60	محدوده دمایی دشارژ باتری (°C)
(@ 80% DOD) 2000	چرخه عمر
≤2300g	وزن
460*370*250mm	ابعاد

همانطور که در جدول مشاهده می‌شود در این ماژول از سلول‌های استوانه‌ای لیتیوم فسفات آهن با بسته‌بندی استوانه‌ای و سایز ۲۶۶۵۰ استفاده شده است. که تصویر یک نمونه از این سلول‌ها در شکل ۱۸-۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل نیز نشان داده شده است عدد ۲۶۶۵۰ معرف ابعاد سلول است (۲۶ میلیمتر قطر و ۶۵ میلیمتر ارتفاع استوانه) است.



شکل ۱۸-۵: تصویر و ابعاد سلول استوانه‌ای ۲۶۶۵۰

پس از معرفی ماژول مورد استفاده در ادامه به محاسبه تعداد ماژول‌ها پرداخته می‌شود.

در محاسبات انجام گرفته در طراحی‌ها (گزارش مرحله سوم) ظرفیت مجموعه باتری برابر ۱۳۰ kwh و میزان تواندهی باتری برابر ۶۵۰kw محاسبه شد. همچنین میزان ولتاژ باتری حدود ۶۵۰ V در نظر گرفته شد. می‌توان با موازی کردن و سری کردن تعدادی از ماژول شکل ۱۷-۵ مقادیر مطلوب طراحی را

¹ نرخ C نشان دهنده نرخ جریان شارژ یا دشارژ باتری بر حسب ضریبی از ظرفیت باتری (C) است. به طور مثال سرعت 1C نماینده جریانی است که باعث می‌شود که کل ظرفیت باتری در یک ساعت تخلیه شود. یا 0.5C و 2C به ترتیب جریانی را بیان می‌کنند که باعث تخلیه ظرفیت باتری در طول دو ساعت و نیم ساعت می‌شود. در یک باتری با ظرفیت ۸ آمپر-ساعت، 1C برابر با ۸ آمپر و 2C برابر با ۱۶ آمپر و 0/25C برابر با ۴ آمپر می‌باشد. در مجموع داریم: (ظرفیت باتری بر حسب میلی آمپر ساعت)/(جریان شارژ یا دشارژ باتری بر حسب میلی آمپر)= نرخ C

بدست آورد.

داریم:

حداقل تعداد مازول ها برابر است با:

ظرفیت هر مازول ÷ ظرفیت مورد نیاز مجموعه باتری = حداقل تعداد مازول ها

که در رابطه فوق ظرفیت هر مازول همانطور که در

جدول ۵-۱۶ مشاهده می شود ظرفیت هر مازول برابر ۵ kWh و ظرفیت مجموعه باتری محاسبه شده برابر ۱۳۰ kWh است. بنابراین تعداد کل مازول ها برابر است با:

$$۲۶ \text{ مازول} = ۱۳۰ \text{ kWh} \div ۵ \text{ kWh} = \text{حداقل تعداد کل مازول ها}$$

تعداد مازولهای سری بر اساس ولتاژ مجموعه باتری محاسبه می شود که برابر است با:

ولتاژ هر مازول ÷ ولتاژ مجموعه باتری = تعداد مازول های سری

که در رابطه فوق همانطور که در

جدول ۵-۱۶ مشاهده می شود ولتاژ هر مازول برابر ۴۸ V و ولتاژ مجموعه باتری حدود ۶۵۰ V در نظر گرفته شده است. بنابراین تعداد مازول های سری برابر است با:

$$۱۳ \text{ مازول} \approx ۶۵۰ \text{ V} \div ۴۸ \text{ V} = 13.51 = \text{تعداد مازول های سری}$$

با توجه به تعداد ۱۳ مازول سری و مجموع ۲۶ مازول تعداد مازول های موازی برابر با ۲ خواهد بود.

همانطور که در

جدول ۵-۱۶ نشان داده شده است هر مازول توانایی تأمین جریانی برابر ۵ برابر (۵ C) ظرفیت جریانی خود را دارد، یعنی هر مازول توانایی تأمین توانی برابر (۵ kW × 5 = 25kW) را دارد. بنابراین با توجه به محاسبات فوق میزان توان حداکثر خروجی برابر حاصل ضرب توان دهی هر مازول ضربدر تعداد مازول ها خواهد بود که برابر (25 kW × 26 = 650kW) ۶۵۰ kW خواهد بود.

مشخصات مجموعه باتری طراحی شده به شرح جدول ۵-۱۷ خواهد بود. همانطور که در جدول به خوبی مشاهده می شود تمامی شرایط درخواستی (مشخصات طراحی) توسط مجموعه باتری طراحی شده برآورده می شود.

جدول ۱۷-۵: مشخصات مجموعه باتری طراحی شده

تعداد ماژول‌ها	۲۶ ماژول (۲ ماژول موازی و ۱۳ ماژول سری)
مقدار ظرفیت مجموعه باتری	۱۳۰ kWh
سطح ولتاژ نامی مجموعه باتری	۶۲۴ V
میزان توان‌دهی	۶۵۰ kW

همانطور که در جدول ۱۷-۵ به خوبی مشاهده می‌شود مجموعه باتری طراحی شده تمامی نیازهای عملکردی لوکوموتیو هیبرید مدنظر را برآورده می‌کند.

در جدول ۱۸-۵ میزان هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مجموعه باتری بر اساس ماژول شکل ۱۷-۵ نشان داده شده است.

در ردیف ۱ جدول ۱۸-۵ هزینه ماژول‌ها با قیمت خرید خارج از کشور لحاظ شده است [۵۱]. بر اساس نظر کارشناسان که در این پروژه با آنها مشورت شد، حدود ۳۰٪ هزینه خرید ماژول‌ها به منظور هزینه واردات و حمل و نقل در نظر گرفته شد که در ردیف ۳ به آن اشاره شده است. همچنین پس از مشورتی که با کارشناسان یک شرکت فعال در زمینه تولید و طراحی مجموعه باتری انجام شد، مشخص شد که حدود ۱۰۰ دلار به ازای کیلو وات ساعت ظرفیت باتری برای بسته‌بندی (پکینگ) و سیستم مدیریت لحاظ شود که با توجه اینکه ماژول‌ها بصورت بسته بندی شده خریداری شده‌اند، فقط هزینه سیستم مدیریت انرژی معادل ۵۰ دلار به ازای کیلو وات ساعت ظرفیت باتری در نظر گرفته شد که هزینه آن در ردیف ۲ جدول اشاره شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود برآورد هزینه تولید یک نمونه مجموعه باتری حدود ۳۲۱۱۴ دلار که معادل ۲۷۷۰۳ یورو می‌باشد (با در نظر گرفتن نسبت تبدیل ۱/۳ یورو به دلار) خواهد بود.

جدول ۱۸-۵: هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از ماژول وارداتی

ردیف	نوع تجهیز یا خدمات	هزینه واحد (بر حسب دلار)	تعداد	هزینه کل (بر حسب دلار)
۱	ماژول ۴۸ ولتی ۵kwh	۷۳۹	۲۶	۱۹۲۱۴
۲	هزینه بسته بندی و سیستم مدیریت انرژی (BMS)	---		۶۵۰۰
۳	هزینه حمل و نقل و واردات	---		۶۴۰۰
۴		هزینه کل (بر حسب دلار)		۳۲۱۱۴ دلار
		هزینه کل (بر حسب یورو)*		۲۷۷۰۳ یورو

* با در نظر گرفتن نسبت تبدیل ۱/۳ یورو به دلار

- طراحی مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های تولید داخل

خوشبختانه در کشورمان نیز باتری‌های لیتیوم یون (لیتیوم- فسفات آهن) توان بالا در بسته‌بندی سلول‌های استوانه‌ای سایز ۱۸۶۵۰ در شرکت توسعه منابع انرژی توان تولید می‌شود و به مرحله تجاری‌سازی و تولید انبوه نیز رسیده است (شکل ۱۹-۵) [۵۲]. زیرساخت شرکت توسعه منابع انرژی توان همان شرکت سهامی باتری‌سازی نیرو است که سال‌ها در ایران با برند صبا باتری فعالیت می‌کرد [۵۳]. با توجه به مشخصه توان‌دهی بالای این سلول می‌توان از آن در کاربرد خودرو برقی و بطور خاص در اینجا لوکوموتیو هیبریدی طراحی شده استفاده کرد.

مشخصات این سلول در جدول ۱۹-۵ نشان داده شده است [۵۲]. به منظور طراحی مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های استوانه‌ای شکل ۱۹-۵، همانطور که در بالا نیز اشاره شد می‌بایست ابتدا به طراحی یک ماژول و سپس با کنار هم قرار دادن ماژول‌ها مجموعه باتری را ایجاد کرد. در اینجا فرض بر طراحی یک ماژول ۴۸ ولت و ۵ کیلو وات ساعت است (همانند شکل ۱۷-۵) است. شایان ذکر است در طراحی ماژول‌ها محدودیتی از لحاظ ظرفیتی وجود ندارد و ولتاژ هر ماژول را می‌توان هر ولتاژی زیر ۶۰ ولت (به دلیل ایمنی) در نظر گرفت.

جدول ۱۹-۵: مشخصات سلول سری 38120 SE شرکت توان [۵۲]

مشخصات باتری 38120 SE	
LiFePO ₄	نوع باتری
Φ38×120 (mm)	ابعاد
360 g	وزن
10 Ah	ظرفیت نامی
3.2 V	ولتاژ نامی
6 mΩ ≥	مقاومت داخلی
3.65 ± 0.05 V	ولتاژ نامی شارژ
0.5C=5 A	جریان نامی شارژ
2C=20 A	بیشینه جریان شارژ
1C=10 A	جریان نامی دشارژ
3C=30 A	بیشینه جریان دشارژ پیوسته
10C=100 A	بیشینه جریان دشارژ لحظه ای
2.0 V	ولتاژ نامی قطع دشارژ
2000	سیکل کاری
0 °C ~ 45 °C	دمای انبارش یک ماهه
10 °C ~ 35 °C	دمای انبارش سه ماهه
0 °C ~ 45 °C	شارژ
-20 °C ~ 60 °C	دشارژ
دمای کارکرد	



شکل ۱۹-۵: تصویر سلول استوانه‌ای ۳۸۱۲۰ تولید شرکت توسعه منابع انرژی توان

به منظور طراحی هر ماژول ۴۸ ولتی با استفاده از سلول‌های ۳/۲ ولتی نیاز به سری کردن
(۱۵=۳/۲×۴۸) ۱۵ سلول و برای ایجاد ظرفیت ۵ kWh تعداد ردیف سلول‌های موازی برابر است با:

ظرفیت هر ردیف سری ÷ ظرفیت ماژول = تعداد ردیف سلول‌های موازی

که داریم:

ظرفیت هر سلول × ولتاژ ماژول = ظرفیت هر ردیف سری

که داریم:

$$Wh^1 \approx 500 = 48V \times 10 Ah = \text{ظرفیت هر ردیف سری}$$

بنابراین داریم:

$$10 \text{ ردیف} = 5000 Wh \div 5 kWh = \text{تعداد ردیف سلول‌های موازی}$$

بنابراین هر ماژول شامل ۱۰ ردیف موازی که هر ردیف خود نیز شامل ۱۵ سلول است خواهد بود.

بنابراین در مجموع هر ماژول شامل ۱۵۰ سلول می‌شود.

با انجام محاسباتی همانند محاسبات برای ماژول شکل ۱۷-۵ و با استفاده از روابط (۱) و (۲) تعداد
ماژول‌های مورد نیاز مجموعه باتری برابر ۲۶ ماژول خواهد بود. در اینجا نیز پس از طراحی نتایجی مشابه
جدول ۱۷-۵ حاصل می‌شود که نشان می‌دهد در اینجا نیز مجموعه باتری توانایی تامین عملکردهای

¹ دلیل تقریب آن است که در عمل ولتاژ ماژول در وضعیت شارژ بالا بیش از ۴۸ V است و عدد ۴۸ V مقدار ولتاژ نامی ا به عبارت دیگر متوسط است. بنابراین مقدار ظرفیت ماژول در حالت شارژ کامل بیش از ۵۰۰ Wh خواهد بود ولی در منابع بصورت تجاری برابر همان ۵۰۰ Wh در نظر گرفته می‌شود.
[۷].

مورد نیاز طراحی را دارد.

هزینه محاسبه طراحی یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های داخلی در جدول ۲۰-۵ نشان داده شده است.

در اینجا با در نظر گرفتن قیمت ۷ دلار به ازای هر سلول^۱ و تعداد ۱۵۰ سلول در هر ماژول، هزینه سلول‌های هر ماژول برابر (۱۰۵۰ دلار = 7×150) ۱۰۵۰ دلار خواهد بود. همچنین در اینجا دلیل نیاز به بسته‌بندی سلول‌ها در ماژول‌ها (یا همان پک کردن) هزینه بسته‌بندی و سیستم مدیریت انرژی (BMS) برابر ۱۰۰ دلار به ازای هر کیلو وات ساعت در نظر گرفته شده است.

با تولید انبوه این مجموعه باتری حدود ۲۰ درصد از هزینه تولید مجموعه باتری کاهش خواهد یافت. بنابراین هزینه تولید انبوه این محصول برابر ۲۴۸۰۰ یورو در نظر گرفته شده است. بنابراین هزینه تولید نمونه اولیه و تولید انبوه مجموعه باتری براساس سلول‌های تولید داخل برابر جدول ۲۱-۵ خواهد بود.

جدول ۲۰-۵: هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های داخلی

ردیف	نوع تجهیز یا خدمات	هزینه واحد (بر حسب دلار)	تعداد	هزینه کل (بر حسب دلار)
۱	ماژول ۴۸ ولتی ۵kwh	۱۰۵۰	۲۶	۲۷۳۰۰
۲	هزینه بسته‌بندی و سیستم مدیریت انرژی (BMS)	---		۱۳۰۰۰
۴		هزینه کل (بر حسب دلار)		۴۰۳۰۰ دلار
		هزینه کل (بر حسب یورو)*		۳۱۰۰۰ یورو

* با در نظر گرفتن نسبت تبدیل ۱/۳ یورو به دلار

جدول ۲۱-۵: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه مجموعه باتری

نوع تجهیز	هزینه نمونه اولیه (یورو)	هزینه تولید انبوه (یورو)
مجموعه باتری	۳۱۰۰۰	۲۴۸۰۰

همانطور که در جدول ۲۰-۵ مشاهده می‌شود قیمت یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های ساخت داخل حدود ۳۱،۰۰۰ یورو خواهد بود در حالی که همانطور که در جدول ۲۱-۵ مشاهده شد، تولید یک نمونه مجموعه باتری با استفاده از ماژول‌های خارجی (کشور چین) حدود ۲۷،۷۰۳ یورو برآورد شد. به نظر می‌رسد اگر چه تولید مجموعه باتری با استفاده از سلول‌های خارجی حدود ۱۰٪ ارزانتر تمام

^۱ قیمت استعلامی برابر ۱۴۰ هزار تومان بوده که با در نظر گرفتن نرخ ۲۰،۰۰۰ تومانی دلار معادل ۷ دلار در نظر گرفته شد.

می شود ولی با توجه به مزایای محصول تولید داخل نظیر عدم وابستگی به خارج، اصمینان بیشتر از تامین قطعات در چرخه تولید، برخورداری از گارانتی و خدمات بهتر، زمان کوتاه تر برای دسترسی به سلول ها (نسبت به خرید از خارج)، امکان رایزنی بهتر با تولید کننده جهت کاهش قیمت و افزایش کیفیت بر اساس عملکرد مورد نظر و مهمتر از همه حمایت از تولید داخلی استفاده از مجموعه باتری با استفاده از سلول های ساخت داخل توصیه می شود.

۴-۲-۵ مبدل dc/dc

همانطور که در فصل پیشین اشاره گردید، با افزودن باتری به عنوان سیستم ذخیره ساز انرژی به سیستم تولید توان و اتصال آن به باس dc از طریق یک مبدل dc/dc می توان ساختار لوکوموتیو دیزل الکتریک را به یک لوکوموتیو هیبرید الکتریک از نوع سری تبدیل نمود.

با توجه به سطح ولتاژ ۶۵۰ ولت مجموعه باتری و سطح ولتاژ ۱۰۰۰ ولت لینک dc، نیاز به استفاده از یک مبدل dc به dc دوطرفه است تا هم بتواند ولتاژ لینک dc و جریان مورد نیاز موتور را تامین کند و هم بتواند جریان شارژ باتری را کنترل کند. به منظور برآورد هزینه ساخت مبدل علاوه بر بررسی های به عمل آمده با آقای دکتر حمیدرضا کارشناس عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان نیز در این خصوص مشورت شد. مبدل مربوطه بر خلاف دیزل و ژنراتور نمونه ساخت داخل ندارد و لذا هزینه ساخت نمونه اولیه با هزینه تولید انبوه آن متفاوت است. در جدول ۲۲-۵ هزینه بخش های مختلف در ساخت یک نمونه از مبدل مربوطه برآورد شده است. هزینه تجهیزات تست و دانش فنی فقط در نمونه اولیه دیده می شوند و در تولید انبوه لحاظ نشده است. بنابراین هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه همانند جدول ۲۳-۵ خواهد بود.

جدول ۲۲-۵: هزینه برآورد شده جهت تولید یک نمونه مبدل dc/dc

ردیف	نوع تجهیز یا خدمات	هزینه (تومان)	هزینه (یورو)*
۱	هزینه قطعات و مواد اولیه	۲۰۰ میلیون	۷۶۹۲
۲	هزینه تجهیزات تست	۱۰۰ میلیون	۳۸۴۶
۳	قیمت دانش فنی	۲۰۰ میلیون	۷۶۹۲
۴	مهندسی ساخت و خدمات	۱۰۰ میلیون	۳۸۴۶
۵	هزینه کل	۶۰۰ میلیون	۲۳,۰۷۶

* هر دلار معادل ۲۰,۰۰۰ تومان و هر یورو معادل ۲۶,۰۰۰ تومان (۱/۳ دلار) در نظر گرفته شده است.

جدول ۲۳-۵: هزینه نمونه اولیه و تولید انبوه مبدل

نوع تجهیز	هزینه نمونه اولیه (میلیون ریال)	هزینه تولید انبوه (میلیون ریال)
مبدل dc/dc	۲۳,۰۷۶	۱۵۳۸۴

۳-۵ برآورد اقتصادی نمونه اولیه

مطابق با اطلاعات ارائه شده در جدول ۳-۵ و جدول ۵-۵ و جدول ۲۱-۵ و جدول ۲۳-۵ هزینه تبدیل یک نمونه لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید در جدول ۲۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۲۴-۵: برآورد هزینه تبدیل یک نمونه لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریک

هزینه	توان (یا انرژی) مورد نیاز تجهیز	نوع تجهیز	
۱۸,۴۶۰ یورو	۳۱۵Kw	موتور دیزلی ساخت سری ۴۵۷ شرکت ایدم	۱
۷,۰۰۰ یورو	۳۵۰ Kw	ژنراتور سنکرون سری DSG52 M2-4 شرکت ماه نیرو	۲
۲۳,۰۷۶ یورو	۶۵۰ Kw	مبدل DC/DC	۳
۳۱,۰۰۰ یورو	۱۳۰ Kwh	باتری	۴
۲۰,۰۰۰ یورو	----	دیگر تجهیزات (مونیتورینگ، کنترلی، کمپرسور برقی، ...)	۵
۹۹,۵۳۶ یورو	مجموع هزینه‌ها		

۴-۵ برآورد اقتصادی تبدیل انبوه

در اینجا نیز مطابق با اطلاعات ارائه شده در جدول ۳-۵ و جدول ۵-۵ و جدول ۲۱-۵ و جدول ۲۳-۵ هزینه تبدیل انبوه لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید در جدول ۲۵-۵ ارائه شده است.

جدول ۲۵-۵: برآورد هزینه تبدیل انبوه لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریک

هزینه	توان (یا انرژی) مورد نیاز تجهیز	نوع تجهیز	
۱۸,۴۶۰ یورو	۳۱۵Kw	موتور دیزلی ساخت سری ۴۵۷ شرکت ایدم	۱
۷,۰۰۰ یورو	۳۵۰ Kw	ژنراتور سنکرون سری DSG52 M2-4 شرکت ماه نیرو	۲
۱۵,۳۸۴ یورو	۶۵۰ Kw	مبدل DC/DC	۳
۲۴,۸۰۰ یورو	۱۳۰ Kwh	باتری	۴

۵	دیگر تجهیزات (مونیتورنگ، کنترلی، کمپرسور برقی، ...)	----	۲۰,۰۰۰ یورو
مجموع هزینه‌ها			۸۵,۶۴۴ یورو

۵-۵ نتیجه‌گیری

در این مرحله از گزارش به بررسی و محاسبه هزینه تبدیل یک نمونه لوکوموتیو مانوری به هیبریدی و همچنین هزینه تبدیل انبوه لوکوموتیو مانوری دیزلی به هیبریدی پرداخته شد. بدین منظور بصورت برای هر کدام از اجزا شامل دیزل، ژنراتور، مجموعه باتری و همچنین مبدل DC/DC این هزینه‌ها محاسبه شد. خوشبختانه دانش فنی تولید هر کدام از این اجزاء در داخل کشور موجود بوده و محصولات مرتبط توسط تولیدکننده‌های داخلی در حال تولید است.

طبق محاسبات انجام گرفته در گزارش مرحله قبل و برآورد هزینه در این مرحله از گزارش (جدول ۲۴-۵)، میزان هزینه تبدیل یک نمونه لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک به نوع هیبریدی حدود ۹۹,۵۳۶ یورو برآورد شد. همچنین هزینه تبدیل انبوه (بیش از ۲۰ لوکوموتیو) لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک به نوع هیبریدی (بر اساس نتایج جدول ۲۵-۵) برابر ۸۵,۶۴۴ یورو برآورد شد. این اختلاف قیمت حدود ۱۵٪ بخاطر هزینه‌هایی است که در ساخت نمونه اولیه تحمیل شود. در فصل بعد، با توجه به نتایج این مرحله و مراحل پیش به ارائه مدل کسب‌وکار مناسب جهت تولید این محصول پرداخته خواهد شد.

فصل ۶ - ارائه یک طرح کسب و کار برای جایگزینی لوکوموتیوهای دیزلی با انواع هیبریدی آن

۱-۶ مقدمه

در حقیقت طرح کسب و کار یک نوشته رسمی است که اهداف کسب و کار را تعیین، دلایل امکان تحقق اهداف را ذکر و برنامه‌هایی که برای رسیدن به اهداف دنبال می‌شوند را ارائه می‌کند. طرح کسب و کار سندی مکتوب است که جزئیات کسب و کار پیشنهادی را مشخص می‌کند. این سند باید ضمن تشریح موقعیت کنونی، نیازها، انتظارات، نتایج پیش‌بینی شده را شرح دهد و کلیه جوانب آن را ارزیابی کند [۵۴]. در یک طرح کسب و کار می‌بایست مباحث مختلف نظیر: معرفی و شرح طرح، تحلیل صنعت، طرح تولید و طرح اقتصادی و مالی مورد بررسی قرار گیرد [۱].

در بخش معرفی و شرح طرح به طرح مسئله و ارائه راه حل آن نیز اشاره خواهد شد. در ادامه به تحلیل صنعت پرداخته می‌شود. در تحلیل صنعت بررسی بازار هدف طرح، بازیگران اصلی طرح و چرایی پیشگامی پژوهشگاه نیرو در ارائه این طرح بیان می‌شود. در قسمت مربوط به طرح تولید به فناوری مورد نیاز، فهرست تجهیزات و همچنین موقعیت و فضای لازم پرداخته می‌شود. در بخش ارزیابی مالی و اقتصادی طرح در ابتدا به بررسی جریان نقدینگی در طول افق برنامه‌ریزی طرح پرداخته شده، سپس به بررسی روش‌های ارزیابی اقتصادی طرح شامل روش ارزش خالص فعلی، روش نسبت سود به هزینه و دوره بازگشت سرمایه پرداخته می‌شود. در انتها نیز تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییرات احتمالی در پیش‌فرض‌های غیر مطمئن پرداخته می‌شود. در شکل ۱-۶ بوم مدل کسب و کار^۱ طرح مربوطه که دورنمای کلی طرح را نشان می‌دهد به نمایش گذاشته شده است.

۶-۲ معرفی طرح

۶-۲-۱ طرح مسئله

لوکوموتیوها در کاربردهای مختلف در سیستم حمل و نقل ریلی و صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از کاربردهای لوکوموتیو استفاده مانوری آن است. لوکوموتیوهای مانوری در ایستگاههای قطار به منظور

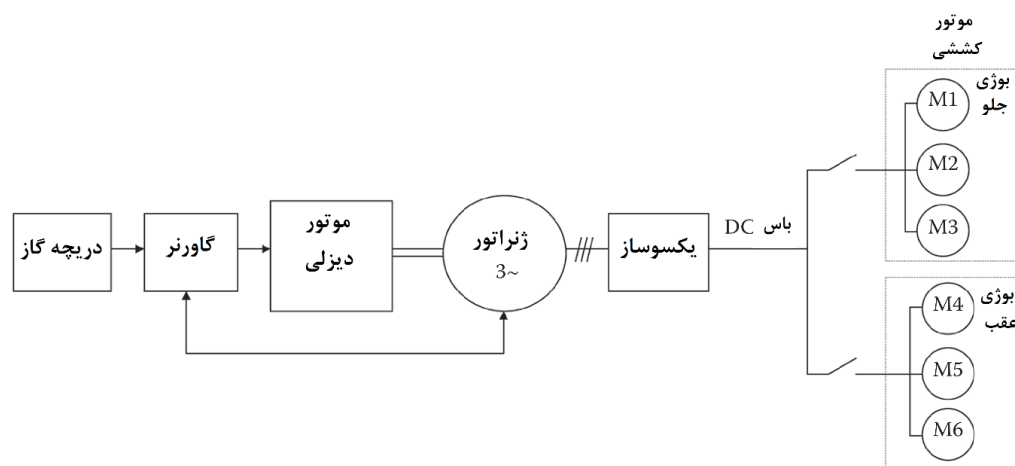
¹ Business model Canvas

فعالیت کلیدی:	گروه مشتریان طرح:	منابع اصلی:	ارزش پیشنهادی:	همکاران کلیدی طرح:
تبدیل لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک به هیبریدی	شرکت راه آهن جمهوری اسلامی	- منابع مالی حاصل از محل ماده ۱۲ قانون رفع موانع تولید رقابت پذیر - صندوق های حمایتی سازمان محیط زیست - نیرو انسانی متخصص داخلی	- کاهش مصرف سوخت - کاهش آلودگی هوا - کاهش آلودگی صوتی - بومی سازی سیستم تأمین توان در لوکوموتیو	- شرکت راه آهن - سازمان محیط - شرکت نفت - سازمان بهینه سازی - شرکت باتری ساز - شرکت دیزل ساز - شرکت ژنراتور ساز
جریان درآمد: درآمد ناشی از کاهش مصرف سوخت درآمد ناشی از کاهش هزینه اجتماعی آلودگی هوا		جریان هزینه ها: - هزینه اجزاء شامل (هزینه دیزل، هزینه ژنراتور، هزینه باتری، هزینه مبدل) - هزینه سیستم کنترل و مونیتورینگ - هزینه اکتساب دانش فنی - هزینه نیروی انسانی		

شکل ۱-۶ بوم مدل کسب و کار تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریک مرسوم به هیبریدی

جابجایی واگن ها در بین مسیرها و همچنین در صنایع سنگین نظیر فولاد، ذوب آهن و صنایع معدنی جهت جابجایی مواد اولیه و تولیدی مورد استفاده قرار می گیرند.

در لوکوموتیوهای دیزل الکتریک مانوری (که لوکوموتیوهای هدف در این طرح هستند) همانطور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است، مسیر انتقال قدرت از طریق تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی به وسیله دیزل - ژنراتور و تبدیل مجدد از الکتریکی به مکانیکی در موتور کششی برقرار می شود. در این نوع لوکوموتیو قدرت مکانیکی موتور دیزل به وسیله ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل و سپس در موتورهای کششی نصب شده روی محورها مجدداً به انرژی مکانیکی تبدیل و به صورت گشتاور دورانی به چرخ ها منتقل می شوند.



شکل ۲-۶ دیاگرام سیستم پیشرانه یک لوکوموتیو دیزل الکتریک مرسوم

در یک لوکوموتیو مانوری دیزل الکتریک به دلیل زمان توقف زیاد (تا ۶۰٪ سیکل کاری) و روشن بودن دیزل ژنراتور در حین توقف، بازدهی کلی سیستم پایین بوده و در نتیجه میزان مصرف سوخت بالا خواهد بود. علاوه بر افزایش مصرف سوخت، بدلیل فعالیت دیزل ژنراتور در زمان توقف لوکوموتیو، میزان آلاینده‌گی لوکوموتیو نیز افزایش می یابد. با توجه به فعالیت لوکوموتیوهای مانوری در محوطه ایستگاه های راه آهن درون شهر موضوع آلاینده‌گی آنها اهمیتی چندین برابر پیدا می کند.

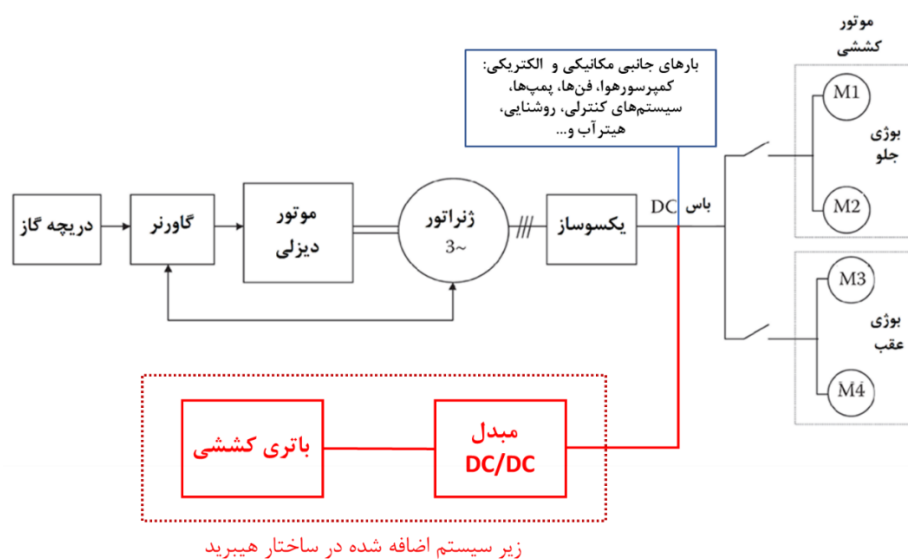
۳-۶ ارائه راه حل

ساختار بخش پیشرانه یک لوکوموتیو مانوری تا حدود زیادی به یک خودرو هیبریدی سری شباهت دارد. بنابراین در طرح پیشرو پیشنهاد می شود تا همانند شکل ۳-۶ با افزودن یک مجموعه باتری و یک مبدل سطح ولتاژ ساختار لوکوموتیو دیزل الکتریک به یک لوکوموتیو دیزل الکتریک هیبرید تبدیل شود. با هیبرید کردن لوکوموتیو مانوری می توان در زمان توقف لوکوموتیو، دیزل ژنراتور را خاموش کرده

و باتری به تنهایی توان مورد نیاز سیستم‌های جانبی را تأمین کند. در اینصورت مصرف سوخت لوکوموتیو مانوری به شدت کاهش می‌یابد.

همچنین با هیبرید کردن لوکوموتیو مانوری، در مواقعی که توان درخواستی موتورهای کششی بالا باشد، مجموعه باتری می‌تواند به کمک دیزل-ژنراتور توان مورد نیاز را تأمین کند. بنابراین با توجه به همراهی مجموعه باتری با دیزل-ژنراتور در تأمین توان مورد نیاز موتورهای کششی، می‌توان سایز دیزل ژنراتور را کاهش داد. با توجه به تأمین دیزل‌های توان بالا با هزینه هنگفت (عموماً از خارج کشور) و تولید دیزل‌های با توان کمتر در داخل کشور با هزینه‌ای به مراتب کمتر، استفاده از دیزل ژنراتورهای با توان پائین از دیگر مزایای طرح هیبریداسیون لوکوموتیوهای مانوری است.

کاهش میزان آلایندگی از دیگر مزایای هیبریداسیون است. زیرا علاوه بر کاهش سایز دیزل ژنراتور و در نتیجه آلایندگی کمتر آن در این نوع لوکوموتیو، موتور دیزلی در مواقع توقف لوکوموتیو خاموش است و هیچگونه آلودگی ایجاد نمی‌کند.



شکل ۳-۶: دیاگرام سیستم پیشنهادی لوکوموتیو دیزل الکتریک هیبریدی پیشنهادی

۶-۴ تحلیل صنعت

۶-۴-۱ بررسی بازار هدف طرح

طبق مکاتبات و بررسی‌های انجام گرفته در این پروژه، لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریک عمدتاً در شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. طبق آمار موجود حدود ۱۲۵ لوکوموتیو مانوری در ایستگاه راه‌آهن تهران و کرج وجود دارد. بنابراین بازار هدف این طرح لوکوموتیوهای مانوری شرکت راه‌آهن خواهد بود.

۶-۴-۲ بازیگران اصلی طرح

شرکت راه‌آهن به عنوان متولی اصلی این طرح محسوب می‌شود. لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریک پایه توسط این شرکت تأمین می‌شود. همچنین با توجه کاهش مصرف سوخت لوکوموتیوهای مانوری لازم است پیگیری‌های لازم جهت دریافت سود حاصل از فروش گازوئیل صرفه‌جویی شده از محل ماده ۱۲ قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر صورت گیرد، و در این خصوص مذاکرات لازم با شرکت نفت و سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت نیز صورت پذیرد.

با توجه به کاهش قابل توجه آلودگی هوا و همچنین کاهش هزینه‌های اجتماعی مرتبط با آلودگی در طرح پیش‌رو (که در این ادامه بررسی می‌شوند) لازم است تا جهت جلب حمایت‌های مالی و معنوی با سازمان حفاظت محیط زیست رایزنی‌های لازم انجام گیرد.

از دیگر بازیگران اصلی طرح می‌توان به شرکت‌های تأمین کننده تجهیزات، همانند شرکت‌های تولید موتور دیزلی (نظیر شرکت دسا و شرکت ایدم تبریز)، شرکت‌های تولید کننده ژنراتور (نظیر شرکت ماه‌نیرو)، شرکت‌های تولید کننده مجموعه باتری نظیر شرکت باتری توان و همچنین شرکت‌های تولید کننده مبدل‌های الکترونیک قدرت در توان بالا جهت پیشبرد طرح رایزنی‌های لازم انجام گیرد.

۶-۴-۳ چرا پژوهشگاه نیرو؟

پژوهشگاه نیرو به واسطه‌ی نیروهای مجرب و دانش فنی که در مراکز و پژوهشکده‌های مختلف در اختیار دارد و همچنین به دلیل ارتباطاتی که می‌تواند با ارگان‌های مربوطه‌ی داخلی و خارجی ایجاد کند، می‌تواند با مشارکت شرکت‌های خصوصی فعال در حوزه بهره‌برداری لوکوموتیو و همچنین شرکت راه‌آهن، نقشی فعال در راهبری طرح مذکور ایفا نماید.

۶-۵ طرح تولید

۶-۵-۱ فهرست تجهیزات و فناوری مورد نیاز

پس از محاسبات انجام گرفته در مراحل چهارم و پنجم پروژه، فهرست تجهیزات مورد نیاز در توان و یا انرژی مورد نظر جهت تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریکی به هیبرید الکتریک همانند جدول ۶-۱ استخراج شد. پس از بررسی‌های انجام گرفته در مرحله پنجم پروژه، مشخص شد که خوشبختانه تمامی تجهیزات اصلی مورد نیاز در داخل کشور بومی‌سازی شده و موجود است. این موضوع خود باعث افزایش اطمینان در سرمایه‌گذاری و افزایش اطمینان از چرخه تأمین قطعات خواهد شد. اسامی شرکت‌های نمونه تأمین کننده قطعات اصلی در جدول ۶-۱ اشاره شده است.

جدول ۶-۱: تجهیزات مورد نیاز جهت تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریک به هیبرید الکتریک

توان (یا انرژی) مورد نیاز تجهیز	شرکت تأمین کننده و سری ساخت	نوع تجهیز	
۳۱۵Kw	سری ۴۵۷ شرکت ایدم	موتور دیزلی	۱
۳۵۰Kw	سری DSG52 M2-4 شرکت ماه نیرو	ژنراتور سنکرون	۲
۶۵۰Kw	دانشگاه صنعتی اصفهان	مبدل DC/DC	۳
۱۳۰ Kwh	شرکت توان	باتری	۴
----	شرکت‌های داخلی، دانش بنیان و دانشگاهی	دیگر تجهیزات (مونیتورنگ، کنترلی، کمپرسور برقی، ...)	۵

۶-۵-۲ موقعیت و فضای لازم

بدلیل نیاز به خط راه‌آهن برای جابجایی و تست و راه‌اندازی لوکوموتیو، نیاز است تا فضایی در مجموعه شرکت راه‌آهن برای این طرح در نظر گرفته شود. که می‌توان همانند پروژه پیشین که در سال ۱۳۷۹ به انجام رسید، فضایی از مجموعه تعمیر و نگهداری شرکت راه‌آهن در اختیار طرح قرار داده شود.

۶-۶ طرح اقتصادی و مالی

یکی از محورهای مهم یک پروژه و به‌طور خاص در اینجا یک طرح کسب‌وکار، ارزیابی مالی و اقتصادی آن است. هر پروژه صرف‌نظر از نوع و اندازه بایستی صرفه اقتصادی داشته باشد. وجاهت اقتصاد یک پروژه حصول اطمینان از سودمندی سرمایه‌گذاری آن بوده و موجبات پایداری و ماندگار آنرا فراهم می‌سازد. نحوه ارزیابی اقتصادی پروژه‌های بخش خصوصی و دولتی قدری با

یکدیگر متفاوت است. در پروژه های بخش خصوصی بیشینه سازی منافع مدنظر است و ممکن است منافع یا ضررهای اجتماعی یک سرمایه گذاری کمتر مورد توجه قرار گیرد، در صورتی که در پروژه های دولتی از آن جهت که منظور از سرمایه گذاری رفاه حال عامه مردم است منافع و ضررهای عمومی یک سرمایه گذاری مورد توجه قرار می گیرد و لذا از طریق مقایسه مجموعه منافع و ضررها تحلیل و ارزیابی اقتصاد آن صورت می پذیرد.

در این بخش به منظور ارزیابی اقتصادی در ابتدا میزان جریان نقدینگی در طول افق برنامه ریزی مورد بررسی قرار می گیرد. جریان نقدینگی شامل میزان هزینه اولیه جهت هیبریداسیون و همچنین درآمد سالانه ناشی از کاهش مصرف سوخت سالانه خواهد بود. همچنین در این بخش کاهش هزینه اجتماعی ناشی از کاهش میزان آلاینده های لوکوموتیوهای هیبریدی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.^۱

در بخش دوم طرح اقتصادی به بررسی روش های ارزیابی اقتصادی طرح، شامل: روش ارزش خالص فعلی، روش نسبت سود به هزینه و دوره بازگشت سرمایه پرداخته می شود. در حقیقت روش های ارزیابی اقتصادی، شاخص مطلوبیت یک طرح برای سرمایه گذاری به ویژه در بخش خصوصی از منظر ارزیابی اقتصاد پروژه ها به شمار می رود. مطمئناً هرچه مقادیر این شاخص ها بهتر باشد، سرمایه گذاری در آن را برای سرمایه گذار جذاب تر خواهد کرد.

در بخش سوم به تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییرات احتمالی در پیش فرض های غیر مطمئن پرداخته می شود. در اینجا هزینه قیمت سوخت به عنوان پیش فرض غیر مطمئن در نظر گرفته شده و حساسیت و تأثیرگذاری آن بر روی معیارهای ارزیابی مورد بررسی قرار می گیرد.

۶-۶-۱ میزان جریان نقدینگی^۲ در طول افق برنامه ریزی

منظور از افق برنامه ریزی، مدت زمانی است که مدیریت سرمایه گذاری با توجه به کلیه نامعلومات و عدم اطمینان ها نسبت به آینده، برای دوره های سرمایه گذاری تعیین می کند. این هدف همچنین متأثر از عمر مفید تسهیلات سرمایه گذاری نیز می باشد. طبق جلسات برگزار شده با تیم فنی شرکت راه آهن با توجه به حساسیت مأموریت یک لوکوموتیو مانوری، میزان عمر مفید دیزل - ژنراتور مورد استفاده در یک لوکوموتیو مانوری بین ۵ تا ۶ سال اعلام شد. بر این اساس در اینجا نیز طول افق برنامه ریزی برابر ۶

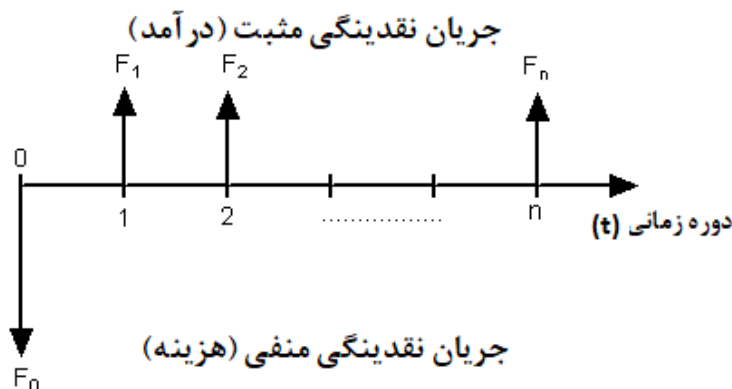
^۱ همانطور که در فصل چهارم بطور مفصل بررسی شد، در صورتی که لوکوموتیوی بدون دیزل ژنراتور باشد و بخواهیم بین دو گزینه سیستم دیزل ژنراتور مرسوم و سیستم هیبریدی، سیستم مناسب و کم هزینه تر انتخاب شود، مطمئناً هزینه سیستم هیبریدی، علیرغم افزودن باتری و مبدل، بدلیل کاهش سایز دیزل ژنراتور به مراتب کمتر است. بنابراین نیازی به طرح کسب و کار نبوده و از همان اول سیستم هیبریدی به صرفه است. اما در این بخش از پروژه هدف بر آن است تا مدل کسب و کار تبدیل لوکوموتیو دیزلی به هیبریدی مورد بررسی قرار گیرد. این بدین معنی است که سیستم هیبریدی (شامل موتور دیزلی، ژنراتور، باتری و مبدل) با دیزل ژنراتور لوکوموتیوهای موجود دیزلی جایگزین شود.

^۲ Cash flow

سال در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ارزیابی اقتصادی می‌بایست در یک افق ۶ ساله مورد مطالعه قرار گیرد.

شایان ذکر است همانطور که در فصل چهارم گزارش بررسی شد، با توجه به استفاده از ۲۰٪ ظرفیت باتری در یک سیکل کاری، طول عمر چرخه‌ای آن به بیش از ۴۰,۰۰۰ سیکل یعنی (با فرض ۲۴ سیکل در شبانه‌روز و ۳۰۰ روز فعالیت در سال) حدود ۶ سال افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان افق برنامه‌ریزی ۶ ساله را نیز به عنوان طول عمر مفید سیستم تامین توان جهت انجام محاسبات در نظر گرفت.

در مورد جریان نقدینگی می‌توان گفت که جریان نقدینگی تصویری از کلیه هزینه‌ها و درآمدها با ملاحظه زمان و وقوع هر یک در طول افق برنامه‌ریزی است. تقسیم‌های دوره‌ای در طول افق برنامه‌ریزی برای جریان نقدینگی بر حسب سالهای $t=0, 1, 2, 3, \dots, n$ فرض می‌شود که $t=0$ معرف زمان حاضر است. در هر دوره هزینه‌ها و درآمدهای سرمایه‌گذاری محاسبه و جریان نقدینگی خالص سالانه از تفاضل درآمد و هزینه سال مربوطه به دست می‌آید. نمایش نمودار جریان نقدینگی به شرح شکل ۴-۶ است. در این نمودار جریان نقدینگی مثبت (درآمد) با پیکان رو به بالا و جریان نقدینگی منفی (هزینه) با پیکان رو به پایین (درآمد) با پیکان رو به بالا و جریان نقدینگی منفی (هزینه) با پیکان رو به پایین (سال) وقوع رویدادهای مالی نمایش داده می‌شود. جریان‌های مالی بین دوره‌ای معمولاً در ابتدا یا انتها دوره مربوطه متمرکز می‌شوند.



شکل ۴-۶ جریان نقدینگی

همانطور که مشاهده شد به منظور محاسبه جریان نقدینگی در یک افق برنامه‌ریزی نیاز است تا هزینه‌ها و درآمدها در هر سال مورد بررسی قرار گیرد. در فصل پنجم به‌طور مشروح هزینه تبدیل یک لوکوموتیو مانوری معمولی به نوع هیبرید مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در فصل چهارم مشخص شد که با استفاده از هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری می‌توان حدود ۳۳/۶٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت داشت. در اینجا می‌توان میزان هزینه صرفه‌جویی شده سالانه مصرف سوخت را به عنوان درآمد سالانه در نظر گرفت. یکی از مزایای هیبریداسیون کاهش آلودگی هوا است. می‌توان میزان کاهش آلودگی هوا را

به عنوان کاهش هزینه اجتماعی سالیانه در نظر گرفت. با توجه به این نکته که متأسفانه در کشور ما به دلیل این که هنوز هیچ نهاد یا سازمانی بطور جدی به پرداخت یارانه کاهش مصرف آلایندگی وارد نشده است مطالعات جریان نقدینگی بصورت جداگانه برای دو حالت بدون در نظر گرفتن درآمد ناشی از هزینه اجتماعی و با در نظر گرفتن آن انجام می شود.

در ادامه بطور جداگانه به بررسی هزینه و درآمد هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری بر اساس مطالب فوق پرداخته می شود.

- برآورد هزینه تبدیل لوکوموتیو مانوری دیزلی به هیبرید در طی افق برنامه ریزی

در فصل پنجم بطور مشروح به بررسی هزینه تبدیل یک نمونه و تبدیل انبوه لوکوموتیو هیبریدی پرداخته شد. با توجه به این نکته که در طرح کسب و کار، مقصود بررسی هزینه تولید انبوه است هزینه محاسبه شده تولید انبوه به عنوان هزینه تبدیل لوکوموتیو مانوری دیزلی به هیبرید در نظر گرفته شده است که البته هزینه اکتساب دانش فنی تولید محصول اولیه در آن گنجانده شده است. فهرست هزینه اجزاء در جدول ۲-۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هزینه هیبریداسیون یک لوکوموتیو مانوری برابر ۸۵،۶۴۴ یورو محاسبه شده است. این هزینه در همان ابتدای افق ۶ ساله (یعنی سال $t=0$) در نظر گرفته می شود.

جدول ۲-۶: برآورد هزینه تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریکی به هیبرید الکتریکی

هزینه	توان (یا انرژی) مورد نیاز تجهیز	نوع تجهیز یا خدمات	
۱۸،۴۶۰ یورو	۳۱۵Kw	موتور دیزلی ساخت سری ۴۵۷ شرکت ایدم	۱
۷،۰۰۰ یورو	۳۵۰Kw	ژنراتور سنکرون سری DSG52 M2-4 شرکت ماه نیرو	۲
۱۵،۳۸۴ یورو	۶۵۰Kw	مبدل DC/DC	۳
۲۴،۸۰۰ یورو	۱۳۰ Kwh	باتری	۴
۷،۰۰۰ یورو	----	دیگر تجهیزات (مونیتورنگ، کنترلی، کمپرسور برقی، ...)	۵
۸،۰۰۰ یورو		هزینه نیروی انسانی*	۶
۵،۰۰۰ یورو		هزینه دانش فنی**	۷
۸۵،۶۴۴ یورو		مجموع هزینه ها	

* در هر تجهیز هزینه نیروی انسانی تولید آن تجهیز لحاظ شده است. در اینجا منظور هزینه نیروی انسانی، هزینه کارشناسان و مدیریت پروژه است.

** هزینه اضافی بابت اکتساب دانش فنی در تولید نمونه اولیه.

- برآورد درآمد ناشی از هیبریداسیون در طی افق برنامه ریزی

۱. درآمد ناشی از صرفه جویی مصرف سوخت

در فصل چهارم پس از طراحی لوکوموتیو هیبریدی مانوری مشخص شد که می توان به میزان حدود ۳۳/۶٪ مصرف سوخت سالیانه را کاهش داد. در جدول ۳-۴ جزئیات مصرف سوخت روزانه و سالانه هر دو لوکوموتیو مانوری معمولی و هیبریدی نشان داده شده است (نتایج فصل چهارم). شایان ذکر است که در جدول ۳-۴ میزان فعالیت سالانه لوکوموتیو ۳۰۰ روز در سال در نظر گرفته شده است و حدود دو ماه در سال برای بازرسی و تعمیرات سالانه لوکوموتیو در نظر گرفته شده است. در جدول (طبق محاسبات فصل چهارم) میزان صرفه جویی سوخت سالانه لوکوموتیو هیبریدی نسبت به نوع دیزلی برابر ۱۱۵،۹۱۰ لیتر محاسبه شده است. همچنین با فرض قیمت هر لیتر گازوئیل برابر ۰/۵ دلار [۵۵] (معادل ۰/۳۸ یورو) همانطور که در جدول ۳-۴ مشاهده می شود میزان درآمد سالانه ناشی از کاهش مصرف سوخت برابر ۵۷،۹۵۵ دلار (۴۴،۰۴۵ یورو) خواهد بود. همانطور که مشاهده می شود درآمد ناشی از کاهش مصرف سوخت سالانه بخش اعظمی از هزینه هیبریداسیون را پوشش می دهد که این موضوع بطور مفصل در بخش های آتی مورد بررسی قرار می گیرد.

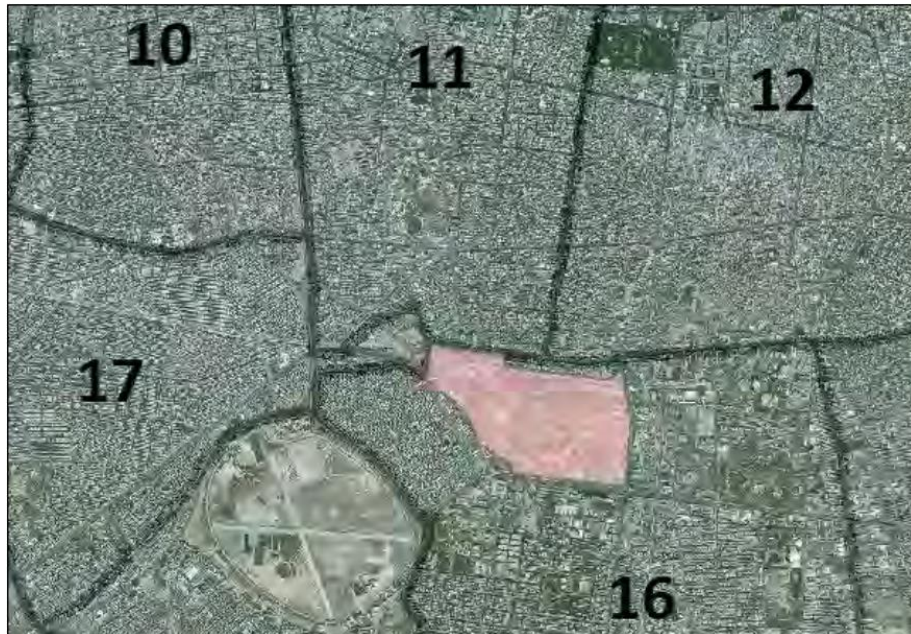
جدول ۳-۶ اطلاعات محاسبه شده مصرف سوخت و میزان کاهش آن در لوکوموتیو هیبریدی

میزان مصرف سوخت روزانه لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی	۱۰۳۰ لیتر
میزان مصرف سوخت روزانه لوکوموتیو هیبریدی	۶۸۴ لیتر
میزان مصرف سوخت سالانه لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی	۳۴۵،۰۵۰ لیتر
میزان مصرف سوخت سالانه لوکوموتیو هیبریدی	۲۲۹،۱۴۰ لیتر
درصد کاهش مصرف سوخت لوکوموتیو هیبریدی نسبت به لوکوموتیو دیزلی	۳۳/۶٪
میزان صرفه جویی سوخت سالیانه لوکوموتیو هیبریدی	۱۱۵،۹۱۰ لیتر
میزان صرفه جویی سوخت سالیانه لوکوموتیو هیبریدی بر حسب دلار	۵۷،۹۵۵ دلار
میزان صرفه جویی سوخت سالیانه لوکوموتیو هیبریدی بر حسب یورو	۴۴،۰۴۵ یورو

۲. درآمد ناشی از کاهش آلودگی هوا

با توجه به مأموریت لوکوموتیوهای مانوری، فعالیت آن ها در ایستگاه های راه آهن است. بنابراین با توجه به اینکه معمولاً ایستگاه های راه آهن در فضای پر ازدحام و آلوده شهری قرار دارند کاهش آلودگی این لوکوموتیوها از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. در شکل ۵-۶ موقعیت نسبی ایستگاه راه آهن تهران نشان داده شده است. ایستگاه راه آهن تهران با وسعت تقریبی ۱۷۴ هکتار در محدوده خیابان های شوش، کشتارگاه (بهمن)، بزرگراه بعثت و خیابان شهید رجایی قرار گرفته است. با توجه به قرار گرفتن

ایستگاه راه آهن در فضای شهری و محدوده پرازدحام منطقه ۱۶ اهمیت کاهش آلاینده‌های لوکوموتیوهای مانوری در این ایستگاه بسیار حائز اهمیت خواهد بود [۵۶].



شکل ۵-۶ موقعیت نسبی ایستگاه راه آهن تهران

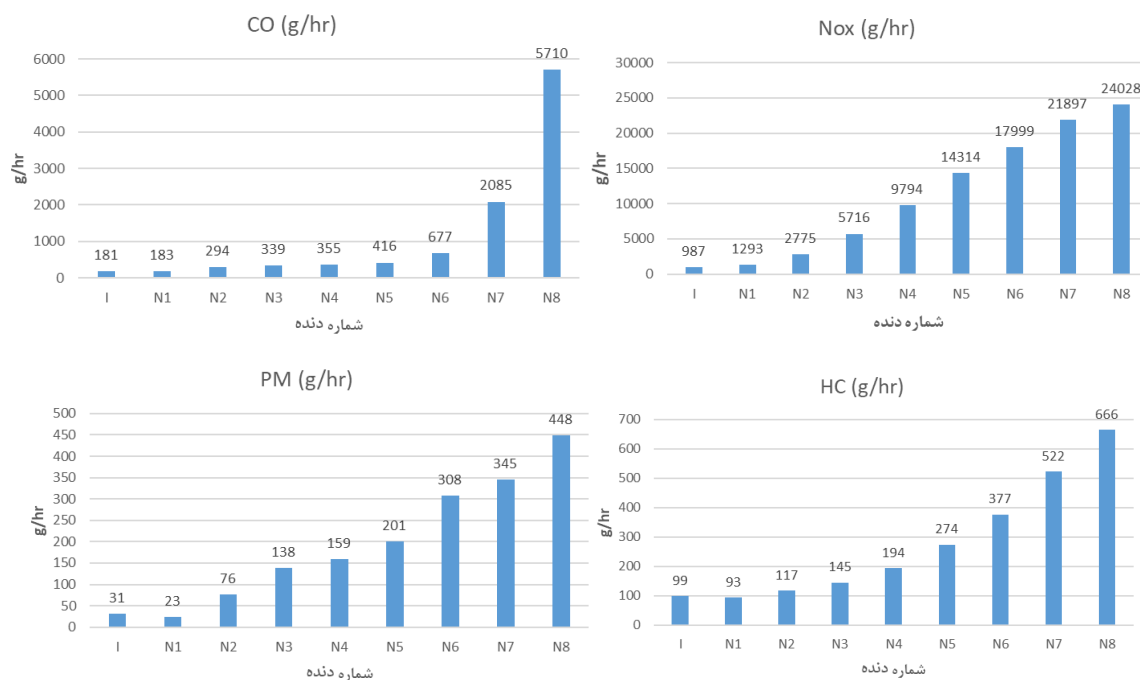
برای محاسبه هزینه اجتماعی ناشی از لوکوموتیوهای مانوری نیاز است تا در ابتدا میزان آلاینده‌های هر کدام از لوکوموتیوهای مانوری معمولی و هیبریدی بر اساس سیکل کاری ارائه شده توسط شرکت راه آهن محاسبه شده و سپس بر اساس هزینه اجتماعی هر کدام از آلاینده‌ها هزینه اجتماعی کل آلاینده‌ها و همچنین میزان کاهش هزینه‌های اجتماعی آلودگی هوا توسط لوکوموتیوهای مانوری را محاسبه کرد.

در جدول ۴-۶ و همچنین شکل ۶-۶ میزان تولید آلودگی‌های مختلف موتور دیزلی EMD 12-645E (مورد مطالعه در طراحی‌های فصل چهارم و پنجم) به ازای دنده‌های مختلف برحسب گرم بر ساعت نشان داده شده است.

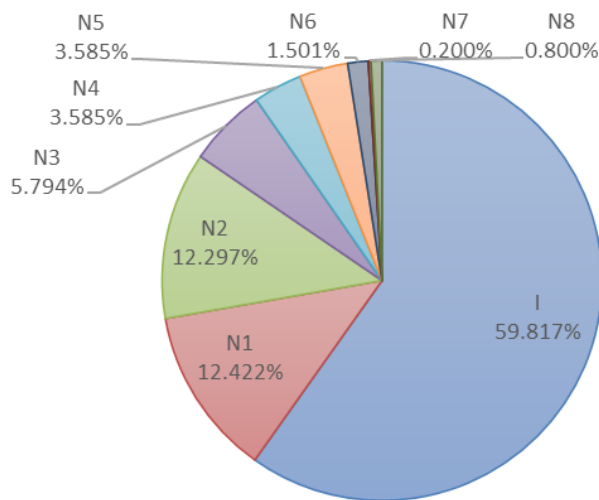
با استفاده از جدول ۴-۶ و سیکل کاری ارائه شده برای لوکوموتیو مانوری توسط شرکت راه آهن که بیانگر درصد فعالیت در هر دنده در طی یک شبانه روز است (شکل ۵-۴) می‌توان میزان آلاینده‌های لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی را محاسبه کرد.

جدول ۴-۶ میزان آلاینده‌گی موتور دیزلی EMD 12-645E به ازای دنده‌های مختلف بر حسب گرم بر ساعت فعالیت

PM (g/hr)	HC (g/hr)	CO (g/hr)	Nox (g/hr)	
31	99	181	987	دنده خنثی
23	93	183	1293	دنده ۱
76	117	294	2775	دنده ۲
138	145	339	5716	دنده ۳
159	194	355	9794	دنده ۴
201	274	416	14314	دنده ۵
308	377	677	17999	دنده ۶
345	522	2085	21897	دنده ۷
448	666	5710	24028	دنده ۸



شکل ۴-۶ میزان تولید آلودگی‌های مختلف موتور دیزلی EMD 12-645E به ازای دنده‌های مختلف



شکل ۶-۷ درصد زمانی فعالیت لوکوموتیو در دنده‌های مختلف در طی مدت زمان ۲۴ ساعت

میزان تولید آلاینده‌های مختلف در طی یک شبانه روز و همچنین یک سال بر حسب کیلوگرم محاسبه شده و در جدول ۵-۶ آورده شده است. همچنین با استفاده از استراتژی کنترلی ارائه شده در فصل سوم و نواحی عملکردی موتور دیزلی میزان آلاینده‌گی لوکوموتیو دیزلی نیز محاسبه شده و در جدول ۵-۶ بیان شده است. همچنین در جدول ۵-۶ میزان کاهش آلاینده‌گی روزانه و سالانه لوکوموتیو بر حسب کیلوگرم و بر حسب درصد ذکر شده است.

جدول ۵-۶ میزان آلاینده‌گی روزانه و سالانه لوکوموتیو دیزلی معمولی و هیبریدی و همچنین میزان کاهش آلاینده‌گی (روزانه و سالانه) لوکوموتیو مانوری بعد از هیبریداسیون بر حسب

Nox	CO	HC	PM	
67.025	6.584	2.936	1.452	میزان آلاینده‌گی روزانه لوکوموتیو دیزلی معمولی (بر حسب کیلوگرم)
51.351	2.950	1.424	0.988	میزان آلاینده‌گی روزانه لوکوموتیو هیبریدی (بر حسب کیلوگرم)
20108	1975	881	436	میزان آلاینده‌گی سالانه لوکوموتیو دیزلی معمولی (بر حسب کیلوگرم)
15405	885	427	296	میزان آلاینده‌گی سالانه لوکوموتیو هیبریدی (بر حسب کیلوگرم)
15.674	3.635	1.512	0.465	میزان کاهش آلاینده‌گی روزانه لوکوموتیو بعد از هیبریداسیون (بر حسب کیلوگرم)
4702	1090	454	139	میزان کاهش آلاینده‌گی سالانه لوکوموتیو بعد از هیبریداسیون (بر حسب کیلوگرم)
23%	55%	51%	32%	میزان کاهش آلاینده‌گی لوکوموتیو بعد از هیبریداسیون (بر حسب درصد)

همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، بعد از هیبریداسیون حدود ۲۳٪ آلاینده Nox ، حدود ۵۵٪ آلاینده CO_2 ، حدود ۵۱٪ آلاینده HC و حدود ۳۲٪ آلاینده PM کاهش می‌یابد.

اثر آلاینده‌ها و هزینه‌ای که آنها برای دستگاه‌های حکومتی و مردم ایجاد می‌کنند با شاخصی به نام هزینه‌های اجتماعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا و مرگ و میر افراد است [۵۷-۶۰].

به منظور تخمین هزینه‌های اجتماعی می‌بایست تاثیر هر کدام از آلاینده‌ها بر سلامت افراد مطالعه شود. متأسفانه در کشور ما مطالعه جامع و دقیقی در این حوزه انجام نگرفته است و شاید می‌توان تنها مطالعه انجام گرفته را در مرجع [۶۱] دانست که میزان هزینه اجتماعی آلودگی ذرات معلق در تهران را مورد بررسی قرار داده است.

به منظور مطالعه هزینه اجتماعی، بدلیل نبود اطلاعات داخلی از اطلاعات [۶۲] که نتیجه بررسی منابع مختلف است استفاده شده است. فقط همانطور که اشاره شد در مطالعه‌ای که درباره میزان آلودگی PM و هزینه اجتماعی آن در تهران توسط سازمان بهداشت جهانی انجام گرفته هزینه اجتماعی ناشی از ۸/۶ هزار تن سالانه آلاینده PM برابر ۲/۶ میلیارد دلار در نظر گرفته شده است [۶۱]. از اینرو میزان هزینه اجتماعی آلاینده PM برحسب گرم بصورت زیر در نظر گرفته شد:

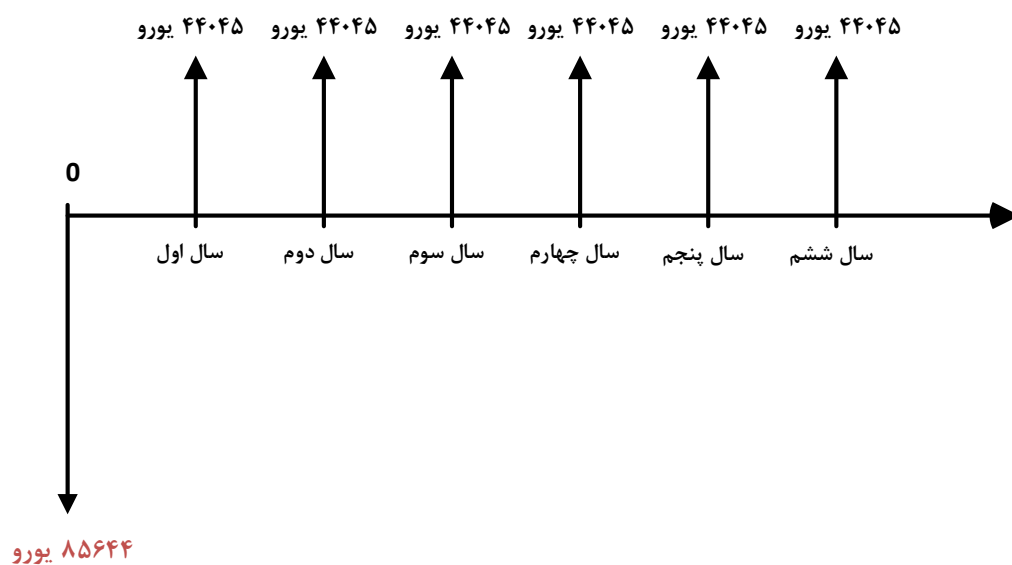
$$(۱) \quad ۲۳۲ \text{ کیلوگرم/یورو} = ۳۰۲ \text{ کیلوگرم/دلار} = ۸/۶ \text{ هزار تن} \div ۲/۶ \text{ میلیارد دلار}$$

در جدول ۶-۶ میزان هزینه اجتماعی هر کدام از آلاینده‌ها نشان داده شده است. همچنین با استفاده از اطلاعات جدول ۵-۶ مقدار هزینه اجتماعی سالیانه ناشی از آلودگی هوا برای دو نوع لوکوموتیو دیزل معمولی و هیبریدی محاسبه شده و به همراه مقدار کاهش هزینه اجتماعی سالیانه بخاطر هیبریداسیون در جدول ۶-۶ گنجانده شده است. همانطور که در جدول ۶-۶ به خوبی مشاهده می‌شود بعد از هیبریداسیون سالانه حدود ۹۵،۵۱۵ یورو از هزینه اجتماعی ناشی از آلودگی هوا در هر لوکوموتیو مانوری کاسته می‌شود که می‌توان آن را به عنوان درآمد ناشی از کاهش آلودگی هوا در نظر گرفت. این هزینه یا بخشی از آن می‌تواند از طریق مراجع ذیصلاح (سازمان محیط زیست و ...) به عنوان یارانه کاهش آلودگی هوا جهت پوشش مقداری از هزینه هیبریداسیون پرداخت شود.

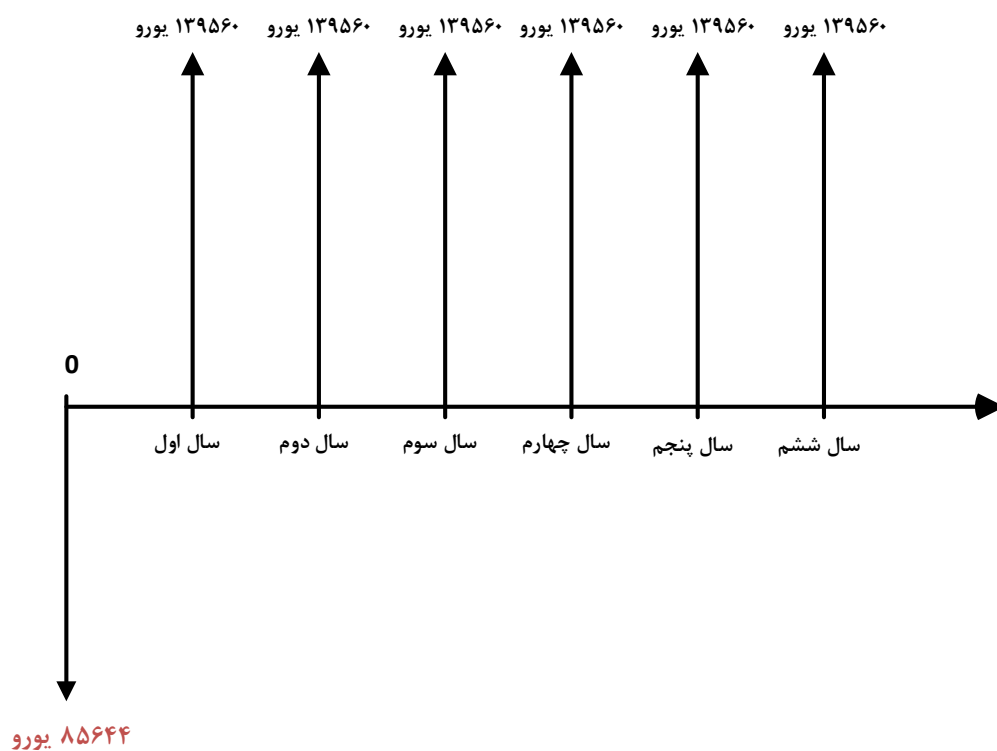
جدول ۶-۶ هزینه اجتماعی هر کدام از آلاینده‌ها و همچنین مقدار هزینه اجتماعی سالیانه ناشی از آلودگی هوا برای دو نوع لوکوموتیو دیزل معمولی و هیبریدی به همراه مقدار کاهش هزینه اجتماعی سالیانه

نوع آلاینده	هزینه اجتماعی واحد آلاینده (هزار تومان در کیلوگرم) (دلار)	هزینه اجتماعی واحد آلاینده (هزار تومان در کیلوگرم) (یورو)	هزینه اجتماعی سالانه لوکوموتیو دیزلی معمولی (بر حسب یورو)	هزینه اجتماعی سالانه لوکوموتیو هیبریدی (بر حسب یورو)	میزان کاهش سالیانه هزینه اجتماعی آلودگی هوا پس از هیریداسیون (بر حسب یورو)
CO	0.097	0.075	147	66	81
NO _x	17.25	13.269	266811	204417	62394
PM	302	232.308	101226	68849	32377
HC	1.9	1.462	1287	624	663
مجموع			369471	273956	95515

در شکل ۸-۶ جریان نقدینگی طرح هیبرید کردن لوکوموتیو مانوری در طی افق برنامه‌ریزی ۶ ساله با در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش مصرف سوخت و بدون در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش هزینه اجتماعی نشان داده شده است. در اینجا هزینه اولیه معادل هزینه تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریکی معمولی به نوع هیبریدی بوده و درآمد سالیانه، درآمد ناشی از کاهش مصرف سوخت در نظر گرفته شده است. همچنین در شکل ۹-۶ جریان نقدینگی با در نظر هزینه اجتماعی به نمایش گذاشته شده است. علت اینکه در نمودار اول (شکل ۸-۶) هزینه اجتماعی در نظر نگرفته نشده این است که متأسفانه هنوز در کشورمان ساز و کار مناسبی برای پرداخت یارانه کاهش آلودگی هوا وجود ندارد، بنابراین در نمودار شکل ۸-۶ درآمد ناشی از هزینه اجتماعی لحاظ نشده تا طرح با واقعیت‌های موجود همخوانی داشته باشد. در ادامه به بررسی روش‌های ارزیابی اقتصادی طرح، شامل روش ارزش خالص فعلی، روش نسبت سود به هزینه و دوره بازگشت سرمایه برای هر دو جریان نقدینگی شکل ۸-۶ و شکل ۹-۶ پرداخته می‌شود.



شکل ۸-۶ جریان نقدینگی طرح هیبریدکردن لوکوموتیو مانوری در طی افق برنامه‌ریزی ۶ ساله بدون در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش هزینه اجتماعی



شکل ۸-۹ جریان نقدینگی طرح هیبریدکردن لوکوموتیو مانوری در طی افق برنامه‌ریزی ۶ ساله با در نظر گرفتن درآمد ناشی از کاهش هزینه اجتماعی

۶-۶-۲ بررسی روش‌های ارزیابی اقتصادی

همانطور که در بالا اشاره شد، معیار سنجش سود، شاخصی برای مطلوبیت یک سرمایه‌گذاری بویژه در بخش خصوصی از دیدگاه ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها به شمار می‌آید. چندین معیار برای سنجش سود وجود دارد. بعضی از این معیارها اندازه سود را در یک مقطع زمانی نشان می‌دهد و بعضی دیگر نرخ بازده سرمایه‌گذار را در هر دوره زمانی که سرمایه در جریان کاربری است نشان می‌دهد. یکی از روش‌ها نیز که بعنوان روش کمکی مورد استفاده قرار می‌گیرد سرعت بازگشت سرمایه یا دوره استرداد را محاسبه می‌نماید. روش‌های ارزیابی اقتصادی در این بخش عبارتند از:

- ارزش خالص فعلی
- نسبت سود - هزینه
- دوره استرداد

در ادامه به ارزیابی اقتصادی با استفاده از هر کدام از معیارهای فوق پرداخته می‌شود.

- ارزش خالص فعلی (NPV^1)

ارزش خالص فعلی یکی از روش‌های استاندارد ارزیابی طرح‌های اقتصادی است. در این روش، جریان نقدینگی (درآمدها و هزینه‌ها) بر پایه زمان وقوع (درآمد یا هزینه) به نرخ روز تنزیل (یا همان تبدیل شده به ارزش فعلی) می‌شود. در حقیقت، ارزش خالص فعلی برای بودجه بندی سرمایه مورد استفاده قرار می‌گیرد تا احتمال سرمایه‌گذاری محاسبه شده یا پروژه را تحلیل کند.

در روش ارزش خالص فعلی، ابتدا تمامی هزینه‌ها و درآمدها بسته به اینکه در چه زمانی به وقوع خواهند پیوست، با نرخ بهره طبق رابطه زیر تنزیل می‌شوند.

$$P = \frac{R_t}{(1+i)^n} \quad (2)$$

در رابطه فوق t زمان انجام هزینه یا واقع شدن درآمد، i نرخ، R_t مقدار کمی درآمد یا هزینه بر اساس جریان نقدینگی است و P ارزش فعلی هزینه یا درآمد پس از تنزیل است.

سپس با تفریق هزینه‌های تبدیل شده از درآمدهای تبدیل شده، عدد خالصی به دست خواهد آمد که به آن NPV یا ارزش فعلی تجمعی یا ارزش فعلی خالص گفته می‌شود. اگر این عدد مثبت باشد، طرح

¹ Net present value

سودآور و قابل قبول بوده و اگر منفی باشد، طرح زیان‌ده و غیرقابل اجرا (از نظر اقتصادی) است.

شایان ذکر است که در این پروژه میزان ضریب بهره برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است. علت انتخاب مقدار پایین برای ضریب بهره، علیرغم نرخ بالای تورم سالیانه در کشور (بالای ۲۰٪)، این است که تمامی مقادیر به صورت ارزی (بر حسب یورو) محاسبه شده و نرخ تورم ناشی از افزایش قیمت ارز در آن تأثیر گذار نیست (برخلاف تورم داخلی که متأثر از نرخ ارز است).

با توجه به مطالب فوق می‌توان میزان ارزش خالص فعلی طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری با جریان نقدینگی بیان شده در نمودار شکل ۸-۶ (بدون لحاظ کردن تأثیر هزینه اجتماعی) را در طی افق ۶ ساله طرح به صورت جدول ۷-۶ محاسبه کرد.

جدول ۷-۶ میزان ارزش خالص فعلی طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری (جریان نقدینگی بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی)

سال	جریان نقدینگی	ارزش فعلی (یورو)	ارزش فعلی تجمعی (یورو)
سال جاری $T=0$	$\frac{-85644}{(1+5\%)^0}$	-85644	-85644
سال اول $T=1$	$\frac{44045}{(1+5\%)^1}$	41948	-43696
سال دوم $T=2$	$\frac{44045}{(1+5\%)^2}$	39950	-3746
سال سوم $T=3$	$\frac{44045}{(1+5\%)^3}$	38048	34301
سال چهارم $T=4$	$\frac{44045}{(1+5\%)^4}$	36236	70537
سال پنجم $T=5$	$\frac{44045}{(1+5\%)^5}$	34510	105048
سال ششم $T=6$	$\frac{44045}{(1+5\%)^6}$	32867	137915

همانطور که در جدول ۷-۶ مشاهده می‌شود ارزش خالص فعلی پروژه ۱۳۷،۹۱۵ یورو است که از مقدار مرجع صفر (که همان لوکوموتیو دیزلی معمولی است) بیشتر است. این بدان معنی است که ارزش خالص فعلی پروژه در انتهای افق برنامه‌ریزی ۶ ساله به اندازه ۱۳۷،۹۱۵ یورو بیشتر از لوکوموتیو دیزل الکتریک معمولی است. که این مقدار سودآوری بالای این پروژه را به خوبی نشان می‌دهد.

همچنین با روشی مشابه جدول ۷-۶، مقدار ارزش خالص فعلی نمودار شکل ۹-۶ (جریان نقدینگی با لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) را در طی افق ۶ ساله طرح برابر ۶۲۲،۷۲۰ یورو محاسبه شد.

- روش نسبت سود - هزینه (B/C)¹

نسبت منافع به هزینه B/C که آن را به صورت نسبت منافع تنزیل شده به هزینه های تنزیل شده در یک مقطع زمانی معین تعریف می کنند شاخص نسبت سوددهی در یک پروژه است. ملاک قبولی یک پروژه مستقل براساس نسبت سود - هزینه وقتی است که این نسبت باید همواره بزرگتر از ۱ باشد ($B/C > 1$). هر چه نسبت سود - هزینه یک پروژه بیشتر باشد، آن پروژه مطلوب تر خواهد بود. اگر نسبت سود - هزینه برابر یک باشد، قبول یا رد کردن پروژه تفاوتی نخواهد داشت. نسبت سود - هزینه کوچک تر از یک به معنای منفی بودن ارزش فعلی خالص پروژه بوده و باعث رد پروژه می شود [۶۳]. به منظور محاسبه نسبت سود - هزینه هیبریدسازی لوکوموتیو مانوری (بدون در نظر گرفتن تأثیر هزینه اجتماعی) می توان از مقادیر تنزیل شده سود و هزینه در جدول ۷-۶ استفاده کرد به این روش که مجموع مقادیر مثبت ردیف سوم جدول (ارزش فعلی) نشان دهنده سود تنزیل شده است و مقدار منفی ردیف سوم برابر همان هزینه است بنابراین در اینجا مقدار نسبت سود - هزینه برابر است با:

$$B/C = (41948 + 39950 + 38048 + 36236 + 34510 + 32867) / (85644) = 2.61$$

بنابراین نسبت سود - هزینه برابر ۲/۶۱ خواهد بود که سودآوری پروژه را نشان می دهد.

مقدار محاسبه شده نسبت سود - هزینه در حالتی که تأثیر هزینه اجتماعی در جریان نقدینگی دیده شده است در افق ۶ ساله سرمایه گذاری برابر ۸/۲۷ خواهد بود.

- روش دوره استرداد یا روش بازگشت سرمایه PBP²

دو روش قبل سودآور بودن پروژه را در طی افق برنامه ریزی بیان می کردند، در صورتی که در روش دوره استرداد سرعت بازگشت سرمایه بررسی می شود. لذا این روش به عنوان یک روش کمکی و نه یک روش مستقل در ارزیابی اقتصادی پروژه ها به کار می رود. در شرایط خاص اقتصادی ممکن است سرعت بازگشت سرمایه در کنار سودآوری آن نیز مورد توجه سرمایه گذار قرار گیرد در این روش معمولاً ارزش فعلی سرمایه گذاری و درآمدها برای دوره های مختلف افق برنامه ریزی پروژه برابر صفر در نظر گرفته می شود تا دوره بازگشت سرمایه محاسبه شود.

این روش به علت سهولت محاسبه و فهم ساده و همچنین در نظر گرفتن ریسک در تصمیم گیری ها توسط بسیاری از تحلیل گران مالی و مدیران مورد استفاده قرار می گیرد. براساس این روش پروژه ای که دارای دوره بازگشت کوتاه تری باشد، ارجح تر خواهد بود.

¹ Benefit-cost ratio

² Payback period

مسئله‌ای که در مورد محاسبه دوره بازگشت سرمایه وجود دارد این است که بر خلاف سایر شاخص‌های مالی مانند ارزش فعلی خالص (NPV)، نسبت سود - هزینه و جریان نقدی تنزیل شده، ارزش زمانی پول نادیده گرفته می‌شود. این محدودیت با تعریف دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده (Discounted Payback Period) بر طرف شده است. دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده (DPP)، مدت زمان لازم برای جبران هزینه‌های سرمایه گذاری بر اساس ارزش فعلی خالص (NPV) جریان نقدی است. بر خلاف دوره بازگشت سرمایه، DPP نشان دهنده مقدار زمان لازم برای بازگشت هزینه های سرمایه گذاری در یک پروژه است که بر اساس جریان‌های نقدی تنزیل شده محاسبه می شود. دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده معمولاً بیشتر از دوره بازگشت سرمایه عادی است. با استفاده از رابطه زیر می توان دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده در یک طرح را محاسبه کرد [۶۴].

$$\text{دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده} = \frac{\left(\frac{\text{میزان سرمایه گذاری} \times \text{نرخ تنزیل}}{\text{جریان نقدی هر سال}} \right) - \ln(1 - \text{نرخ تنزیل})}{\ln(1 + \text{نرخ تنزیل})} \quad (۳)$$

در جدول ۸-۶ محاسبه دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری با جریان نقدینگی نمودار شکل ۸-۶ (بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) بصورت مرحله به مرحله انجام گرفته است. با استفاده از رابطه (۳) نیز نتیجه مشابهی حاصل می‌شود. همانطور که در جدول ۸-۶ مشاهده می‌شود در صورت هیبریداسیون، با استفاده از درآمد ناشی از صرفه جویی مصرف سوخت، هزینه تجهیزات اولیه مورد نیاز هیبریداسیون بعد از ۲/۰۹ سال برگشته و پروژه بعد از درآمدزا خواهد بود.

به همین روش می‌توان دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری با جریان نقدینگی نمودار شکل ۹-۶ (جریان نقدینگی با لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی) را محاسبه کرد که برابر با ۰/۶۴ سال خواهد بود. این بدان معناست که در صورت لحاظ نمودن هزینه اجتماعی بازگشت سرمایه کمتر از یک سال خواهد بود.

جدول ۸-۶ دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری (جریان نقدینگی بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی)

سال	مورد نیاز	جریان نقدینگی	درآمد پس از تنزیل (یورو)	مانده (یورو)	سالهای مورد نیاز برای باز یافت سرمایه
سال اول ۱	85,644	$\frac{44045}{(1 + 5\%)^1}$	41,948	43,696	1
سال دوم ۲	43,696	$\frac{44045}{(1 + 5\%)^2}$	39,950	3,746	1

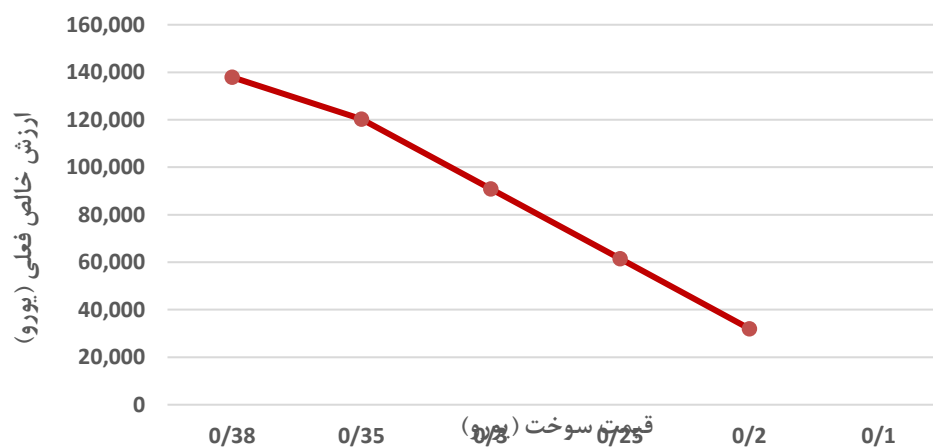
سال سوم T=۳	3,746	$\frac{44045}{(1+5\%)^3}$	38,048	-	38,048/3,746=0.09
دوره بازگشت سرمایه (سال)					
2.09					

۳-۶-۶ تحلیل حساسیت

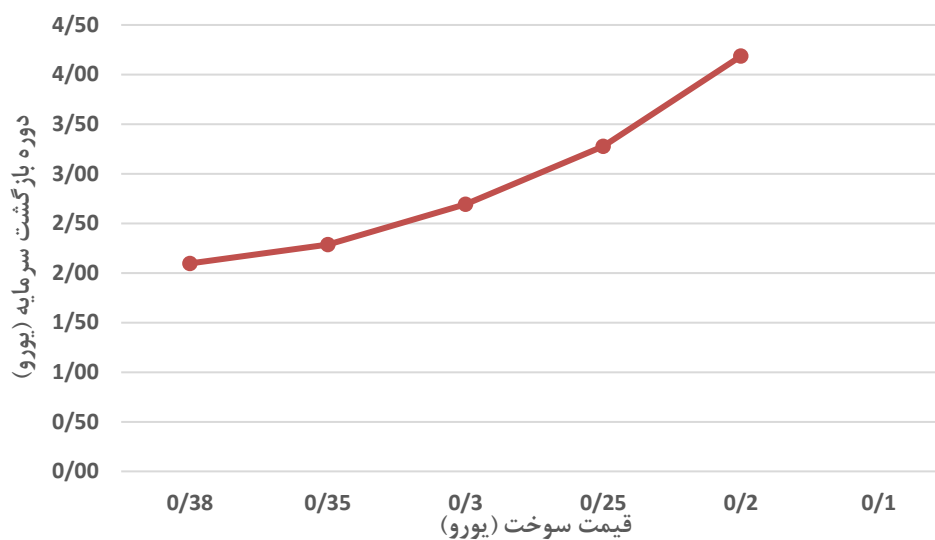
در روش تحلیل حساسیت نتایج ارزیابی اقتصاد سرمایه گذاری در مقابل تغییرات یکی از پارامترهای از پیش فرض شده سنجیده می شود. مطلوب محاسباتی تعیین محدوده تغییرات در یک پارامتر از پیش فرض ها است که کماکان ارزیابی اقتصادی سرمایه گذاری را موجه نگه می دارد. در نتیجه این تحلیل، اگر حساسیت و ارزیابی اقتصادی نسبت به یک پارامتر زیاد باشد و احتمال نوسان و تغییر آن پارامتر نیز زیاد پیش بینی شود سرمایه گذاری از حاشیه اطمینان کمی برخوردار بوده و ممکن است غیر موجه ارزیابی شود.

در طرح هیبریداسیون لوکوموتیو مانوری در بخش هزینه ها با توجه به مکاتبات و مذكرات انجام گرفته با تولیدکنندگان اجزاء، قطعیت مناسبی از هزینه هیبریداسیون وجود دارد. در بخش درآمدها در مورد قیمت سوخت دیزل عدم قطعیت وجود دارد. در محاسبات اقتصادی انجام گرفته قیمت هر لیتر گازوئیل برابر ۰/۵ دلار (معادل ۰/۳۸ یورو) در نظر گرفته شد که این قیمت می تواند در سال های مختلف افق سرمایه گذاری پروژه تغییر کند. اگر قیمت سوخت افزایش یابد، پروژه سودآور و قطعاً جذاب تر خواهد بود. ولی اگر قیمت سوخت کاهش یابد، مطمئناً بر روی پارامترهای ارزشیابی پروژه (ارزش فعلی خالص و دوره بازگشت سرمایه) تاثیر منفی خواهد داشت. بنابراین پارامتری که بر روی آن تحلیل حساسیت انجام می شود قیمت سوخت خواهد بود.

در این بخش با فرض در نظر گرفتن صرفه جویی سالانه ۱۱۵،۹۱۰ لیتر سوخت در سال (مستخرج از جدول ۳-۴) مقادیر ارزش خالص فعلی و همچنین دوره بازگشت سرمایه به ازای قیمت های مختلف سوخت یعنی به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۳۵، ۰/۳، ۰/۲۵، ۰/۲ و ۰/۱۴۵ یورو به ازای هر لیتر گازوئیل در افق برنامه ریزی ۶ ساله محاسبه شده و در شکل ۱۰-۶ و شکل ۱۱-۶ نشان داده شده است. همانطور در شکل ۱۰-۶ مشاهده می شود با قیمت گازوئیل تا ۰/۱۴۵ یورو به ازای لیتر این پروژه کماکان دارای صرفه اقتصادی است ولی با کاهش قیمت کمتر از این مقدار پروژه صرفه اقتصادی نخواهد داشت.



شکل ۱۰-۶ مقادیر ارزش خالص فعلی به ازای قیمت‌های مختلف سوخت (بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی)



شکل ۱۱-۶ دوره بازگشت سرمایه به ازای قیمت‌های مختلف سوخت (بدون لحاظ نمودن تأثیر هزینه اجتماعی)

۶-۷ نتیجه‌گیری

در این مرحله از پروژه به ارائه یک طرح کسب و کار برای جایگزینی لوکوموتیوهای دیزلی با انواع هیبریدی آن پرداخته شد. در در ابتدا به معرفی و طرح مسئله و ارائه راه حل آن اشاره شد. در ادامه به تحلیل صنعت پرداخته شد. در تحلیل صنعت بررسی بازار هدف طرح، بازیگران اصلی طرح و چرایی پیشگامی پژوهشگاه نیرو در ارائه این طرح بیان شد. در قسمت مربوط به طرح تولید به فناوری مورد نیاز، فهرست تجهیزات و همچنین موقعیت و فضای لازم پرداخته شد. در بخش ارزیابی مالی و اقتصادی طرح در ابتدا به بررسی جریان نقدینگی در طول افق برنامه‌ریزی طرح پرداخته شد، سپس روش‌های ارزیابی اقتصادی طرح شامل روش ارزش خالص فعلی، روش نسبت سود به هزینه و دوره بازگشت سرمایه بررسی شد. در انتها نیز تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییرات احتمالی در پیش‌فرض‌های غیر مطمئن انجام شد. مشاهده شد با کاهش قیمت گازوئیل تا ۰/۱۴۵ یورو به ازای لیتر این پروژه کماکان دارای صرفه اقتصادی است ولی با کاهش قیمت کمتر از این مقدار پروژه صرفه اقتصادی نخواهد داشت.

مراجع

- [1] M. Spiriyagin, C. Cole, Y. Q. Sun, M. McClanachan, V. Spiriyagin, and T. McSweeney, *Design and simulation of rail vehicles*. CRC Press, 2014.
- [2] "تحلیلی بر روند آمار و شاخصهای حمل و نقل ریلی در سالهای اخیر," دفتر فناوری اطلاعات و ارتباطات شرکت راه آهن, 395.1
- [3] "کتاب سالنامه آماری حمل و نقل ریلی کشور سال ۱۳۹۴," معاونت برنامه ریزی و اقتصاد حمل و نقل شرکت راه آهن شهریور ۱۳۹۵.
- [4] "کتاب سالنامه آماری حمل و نقل ریلی کشور سال ۱۳۹۶," معاونت برنامه ریزی و اقتصاد حمل و نقل شرکت راه آهن تابستان ۹۷.
- [5] "ماهنامه آماری حمل و نقل ریلی کشور نیمه اول سال ۹۷," معاونت برنامه ریزی و اقتصاد حمل و نقل شرکت راه آهن ۱۳۹۷.
- [6] س. ب. ع. ا. حاتمی, "مدارات الکتریکی لوکوموتیوهای GM ویژه لوکوموتیورانان," انتشارات مرکز آموزش و تحقیقات راه آهن – چاپ اول.
- [7] <https://en.wikipedia.org>. (accessed.
- [8] N. T. Konarzewski M., Stankiewicz M., Szurgott P, "Hybrid Locomotives: Overview of Construction Solutions," *Journal of Kones Powertrain and Transport*, vol. 20, 2013.
- [9] T. Soeda, Lin, M., Hasebe, T., Ujiie, A, "Electrical Equipments Used in Diesel Hybrid Shunting Locomotive HD300," *Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research*, Lille, 2011.
- [10] r. <http://www.railway-technology.com/news/newsrussian-railways-to-develop-first-hybridlocomotive>. (accessed.
- [11] r. <http://www.railwayinsider.eu/wp/archives/26603>. (accessed.
- [12] J. Moore, "Low Emissions Locomotive Spotter's Guide," 2007.
- [13] B. S. Robyns, C.; Hissel, D.; Roboam, X.; Sareni, B.; Pouget, J., "J. Electrical Energy Storage in Transportation Systems," *Electrical Engineering Series; Wiley Publishing: Hoboken, NJ, USA*, 2016.
- [14] K. Dzienkowski, "Hybrid Locomotives: Better Economics, Better Environment," *ARB's Rail Symposium, El Monte, CA, United States*, 2006.
- [15] r. gas2.org/2012/03/28/ges-hybrid-locomotive-cuts-fuel-consumption-and-emissions. (accessed.
- [16] http://www.comsol.com/stories/general_electric_modeling_train_batteries/full/retrieved29.06.2013. (accessed.
- [17] r. http://www.gettransportation.com/resources/doc_details/9-hybrid-locomotive-ecomaginationfact-sheet.html?tmpl=component. (accessed.
- [18] <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-68038f6a-23b2-4a1f-a815-29b7a876cb59>. (accessed.
- [19] r. <http://www.zelpage.cz/atlasloko.php?id=718&lang=pl>. (accessed.
- [20] r. <http://www.atlaslokomotiv.net/katalog/718/718-501.jpg>. (accessed.
- [21] <https://www.railwaygazette.com/news/business/single-view/view/battery-diesel-hybrid-locomotive-cuts-emissions-in-the-forest.html>. (accessed.
- [22] G. ABAD, *Power Electronics and Electric Drives*. John Wiley & Sons, 2017.

- [23] "Technical and Economic Feasibility of Applying sed EV Batteries in Stationary Applications," Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, March 2003.
- [24] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.
- [25] *Merits Of Ac Vs Dc Locomotives*. Business, Art & Photos, 2008.
- [26] V. Jayakumar, *ENGINEERING MECHANICS*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- [27] J.-M. Allenbach, "Traction Electrique," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013.
- [28] R. Locomotive, "AC Traction vs DC Traction," Greenville, South Carolina, 2019.
- [29] T. Soeda, M. Lin, T. Hasebe, and A. Ujiie, "Electrical equipments used in diesel hybrid shunting locomotive HD300," in *Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research, Lille, France, 2011*.
- [30] "Searching of The Optimum Configuration of The Traction Electric Transmission of The Shunting Locomotive," in *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019.
- [31] *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicle*. CRC Press, 2004.
- [32] "Engine control strategy for a series hybrid electric vehicle incorporating load-leveling and computer controlled," *Society of Automotive Engineers (SAE) Journal*, p. Paper No.960230, 2002.
- [33] "CONTROL STRATEGIES FOR PARALLEL HYBRID ELECTRIC VEIDCLES," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 23, no. 22, pp. 495-500, April 2004.
- [34] "A Supervisory Control Algorithm for a Series Hybrid Vehicle With Multiple Energy Sources," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 11, pp. 4942 - 4953, Nov. 2015.
- [35] "A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle," in *Proceedings of the American Control Conference*, Albuquerque, New Mexico, June 1997.
- [36] "ECMS as a realization of Pontryagin's minimum priciple for HEV control," in *Proc Amer Control Conf*, 2009.
- [37] M. Farzad Rajaei Salmasi, IEEE, "Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles:Evolution, Classification, Comparison,and Future Trends," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 56, no. 5, pp. 2393-2404, SEPTEMBER 2007.
- [38] "A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for a Series Hybrid Electric Vehicle," in *Power and Energy Engineering Conf*, 2009, pp 1-7.
- [39] S. Iwnicki, *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC press, 2006.
- [40] G. M. Gould, *A Spatially Detailed Locomotive Emission Model and Goods Movement Data Constraints on Public Policy and Planning*. University of California, Davis, 2010.
- [41] <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/> (accessed.
- [42] M. Andersson, "Energy storage solutions for electric bus fast charging stations," *Uppsala University*, vol. 20, 2017.
- [43] موسایی, احمد, بندریان, قدیریان, صدرایی, ساسان, "ارزیابی قیمت دانش فنی برای تجاری سازی یک فناوری," *فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی*, vol. 8, no. پانزده-65, pp. 78, 2010.
- [44] "<http://www.desa.ir/d87-disel.aspx>."

- [45] "<https://www.idem.ir/fa/>."
- [46] "<http://mahnirooco.ir>."
- [47] C. Vincent and B. Scrosati, *Modern batteries*. Elsevier, 1997.
- [48] G. Abad, *Power electronics and electric drives for traction applications*. Wiley Online Library, 2017.
- [49] B. Scrosati, J. Garche, and W. Tillmetz, *Advances in battery technologies for electric vehicles*. Woodhead Publishing, 2015.
- [50] [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2018/06/20180630arl.html>.
- [51] "https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-Price-48V-100Ah-LiFePo4-Battery_62396671936.html?spm=a2700.7724857.normalList.88.37253d108jeRmz."
- [52] "<http://www.esdo.ir/products/%D9%85%D8%AD%D8%B5%D9%88%D9%84%D8%A7%D8%AA-%D9%84%DB%8C%D8%AA%DB%8C%D9%85%DB%8C-%D8%A8%D8%A7%D8%AA%D8%B1%DB%8C-%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D9%88%D8%A7%D9%86%D9%87-%D8%A7%DB%8C-38120>." (accessed.
- [53] "<http://www.esdo.ir>."
- [54] "هیسریچ، رابرت؛ پیترز، مایکل. کارآفرینی. ترجمه علیرضا فیاض بخش. انتشارات دانشگاه صنعتی شریف. شابک ۹۷۸-۹۶۴-۶۹۸۲-۰۹-۲."
- [55] "Index Mundi." <https://www.indexmundi.com/> (accessed.
- [56] "افشین، وحید حسینی "سیاهه انتشار آلاینده‌های شهر تهران برای سال مبنای ۱۳۹۲، جلد چهارم: فرودگاه مهرآباد، ایستگاه راه آهن و پایانه‌های اتوبوس درون شهری" گزارش تهیه شده توسط شرکت کنترل کیفیت هوا شهرداری تهران سال ۱۳۹۴."
- [57] A. K. Sen, G. Tiwari, and V. Upadhyay, "Estimating marginal external costs of transport in Delhi," *Transport Policy*, vol. 17, no. 1, pp. 27-37, 2010.
- [58] ه. زنوز، ز. نژاد، منصور، طایی، حسن، and خدایانه، "پیامدهای بیرونی حمل و نقل با خودرو شخصی در شهر تهران،" *مجله علمی پژوهشی اقتصاد مقداری*, vol. 8, no. 2, pp. 51-77, 2011.
- [59] M. Santarelli, M. Calì, and A. Bertolaso, "Different fuelling technologies for urban transport bus service in an Italian big town: economic, environmental and social considerations," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 14, pp. 2353-2370, 2003.
- [60] K. Funk and A. Rabl, "Electric versus conventional vehicles: social costs and benefits in France," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 4, no. 6, pp. 397-411, 1999.
- [61] M. Heger and M. Sarraf, "Air pollution in Tehran: health costs, sources, and policies," ed: World Bank, 2018.
- [62] J. Stempien and S. Chan, "Comparative study of fuel cell, battery and hybrid buses for renewable energy constrained areas," *Journal of Power Sources*, vol. 340, pp. 347-355, 2017.
- [63] "ارزیابی اقتصاد پروژه ها سرمایه گذاری، حسین اسلامی، مدیریت پروژه و ساخت، دانشکده مهندسی عمران شریف."
- [64] "<https://www.modirsun.com/Page/Detail/116/>."

پیوست‌ها

03/12 2018 2:55 AM FAX

0001

تاریخ: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲
شماره: ۶۹۰۳۹
پیوست:



سید تعالی

جناب آقای مرجانمهر
معاون محترم فن آوری پژوهشگاه نیرو

موضوع: آمار لوکوموتیوهای مانوری شرکت ملی پالایش و پخش فرآوردههای نفتی ایران

با سلام،

احتراماً در پاسخ به نامه شماره ۹۷/۳۰۰/۷۸۱۸ مورخ ۹۷/۵/۹ جنابعالی باستحضار می‌رساند شرکت ملی پالایش و پخش فرآوردههای نفتی ایران به قراخور نیازهای عملیاتی از لوکوموتیوهای مانوری تحت مالکیت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران در انبارها و ترمینال‌های نفتی ماهشهر، مشهد، نکا، تبریز، اصفهان و اراک بهره می‌برد. از آنجایی که شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران مالکیت لوکوموتیوهای مورد بهره‌برداری را عهده‌دار است، لذا اطلاعاتی در خصوص مشخصات فنی لوکوموتیوها در اختیار نبوده و پیشنهاد می‌گردد در این رابطه با شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران مکاتبه لازم را به عمل آورند.

اعلی‌ترضا آرمان مقدم
رئیس محترم برنامه‌ریزی تلفیقی

رونوشت: معاونین محترم مدیرعامل، احتراماً جهت استحضار
رئیس محترم برنامه‌ریزی تلفیقی مصرف

تهران - خیابان استاد نجات الهی - خیابان ورشو - جنب پارک - پلاک ۴ - کد پستی ۱۵۹۸۶۶۶۱۱ - تلفن: ۸۸۹۲۸۲۲۰ - ۲۹

29-AUG-2002 09:20 FROM:P.N.I.C 0098 21 88601257

TO:88078296

P:1

تاریخ: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰
شماره: ۵۸۳۹۲ ۷/ ۱- ص پ
پیوست:



سال حمایت از کالای ایرانی

جناب آقای مرخانمهر
معاون محترم فناوری پژوهشگاه نیرو

موضوع: داده های آماری لوکوموتیوهای مانوری در صنعت پتروشیمی

با سلام،

احتراماً عطف به نامه شماره ۷۸۱۹/۳۰۰/۹۷ مورخ ۹۷/۹/۵ جناب عالی خطاب به معاون محترم وزیر و مدیرعامل شرکت ملی صنایع پتروشیمی، به استحضار می رساند طبق بررسی های بعمل آمده، لوکوموتیو مانوری در مجتمع های پتروشیمی موجود نمی باشد.
مزایب جهت استحضار و دستورات مقتضی ایفاد می گردد.

با سپاس

فدیه خاتون فرج پور
مدیر کنترل تولید

رونوشت: معاون محترم وزیر و مدیرعامل شرکت ملی صنایع پتروشیمی جهت استحضار

تهران - خیابان خورشید، پلاک ۱۳، کد پستی: ۱۹۱۴۲۲۵۵۷ - تلفن: ۸۲۱۱۳۸۸۲ - فکس: ۸۸۰۵۷۷۲ - صندوق پستی: ۱۳۱۵ - ۶۸۱۶

www.nipc.ir



جناب آقای دکتر محمدزاده

مدیرعامل محترم شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران

موضوع: درخواست ارسال داده‌های آماری مربوط به لوکوموتیوهای مانوری شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران

با سلام و احترام،

همانطور که مستحضرب، لوکوموتیوهای مانوری در سیستم حمل و نقل ریلی و صنایع بزرگی نظیر فولاد، ذوب آهن و معدنی کاربردهای مختلفی دارند که از جمله می‌توان به جابه‌جایی واگن در بین مسیرها و جابه‌جایی مواد اولیه و تولیدی اشاره نمود. بر اساس برآوردهای ابتدائی سیستم پیشرانۀ لوکوموتیوهای مانوری کشور عموماً مشتمل بر فناوری قدیمی دیزل-ژنراتور بعنوان مولد و موتور الکتریکی بعنوان محرک چرخ‌ها است و بر این اساس این لوکوموتیوها به دلیل زمان توقف زیاد (تا حدود ۶۰ درصد سیکل کاری) و روشن بودن دیزل-ژنراتور در حین توقف (استندبای)، راندمان کلی سیستم بسیار پایین بوده و مصرف سوخت بالاست. آلودگی صوتی زیاد نیز از دیگر معایب این سیستم‌ها است.

از طرف دیگر با توجه به پیشرفت‌های اخیر فناوری به خصوص در حوزه باتری‌ها، موتورهای الکتریکی و مبدل‌های الکترونیک قدرت؛ نسل جدیدی از لوکوموتیوهای مانوری توسعه یافته که سیستم پیشرانۀ آن از نوع هیبرید سری و قدری پیچیده تر از لوکوموتیوهای مانوری قدیمی بوده و علاوه بر دیزل-ژنراتور و موتور الکتریکی، در آن از مبدل الکترونیک قدرت و باتری بعنوان ذخیره ساز انرژی حرکت لوکوموتیو استفاده شده است و لذا در این سیستم‌ها به دلیل وجود باتری و مبدل، می‌توان در برخی از ساعات کاری، دیزل را خاموش نمود و در نتیجه مصرف سوخت، آلایندۀها و نویز صوتی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. بر اساس برآوردهای اولیه ۸۰ درصد کاهش مصرف سوخت، ۹۰ درصد کاهش آلایندۀها و کاهش آلودگی صوتی تا ۲۰ دسی بل از جمله مزیت‌های فناوری‌های جدید لوکوموتیوهای مانوری نسبت به انواع قدیمی است.

با عنایت به توضیحات فوق‌الذکر، پژوهشگاه نیرو اخیراً پروژه‌ای با عنوان "ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریکی به هیبرید" تعریف نموده و در دست اجرا دارد تا پس از استخراج آمار دقیق انواع لوکوموتیوهای مانوری موجود در صنایع مختلف کشور و مشخصات فنی آنها، به ارزیابی اقتصادی و فنی تغییر سیستم پیشرانۀ این لوکوموتیوها مبادرت ورزد تا در قدم بعد و در صورت وجود توجیه کافی، نسبت به جذب سرمایه‌گذار و نوسازی و اصلاح سیستم پیشرانۀ آنها با هماهنگی هر یک از دستگاه‌های ذیربط اقدام نماید.

 وزارت نیرو		 پژوهشگاه نیرو Niroo Research Institute
تاریخ:	۱۳۹۷/۰۸/۲۶	
شماره:	۹۷/۳۰۰/۷۵۱۹	
پیوست:	دارد	

لذا خواهشمند است به منظور کسب اطلاعات و آمار دقیق در زمینه لوکوموتیوهای مانوری فعال در حوزه آن مدیریت محترم، دستور فرمایند همکاری لازم صورت پذیرفته و اطلاعات مورد نیاز مطابق جدول پیوست برای پژوهشگاه نیرو ارسال گردد. قبلاً از همکاری و مساعدت حضرتعالی قدردانی می گردد.


سید محسن مرجاننصیر
معاون فناوری

تهران - شهرک قدس، انتهای بلوار شهید دادمان، صندوق پستی ۱۴۶۶۵-۵۱۷، تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۰، فکس: ۸۸۰۷۸۲۹۶
www.nri.ac.ir info@nri.ac.ir

تاریخ: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

شماره: ۹۷/۳۰۰/۸۸۵۲

تبارد: پیوست:



سرکار خانم دکتر قیومی

سرپرست محترم مرکز توسعه آموزش و فناوری راه آهن

موضوع: درخواست دسترسی به گزارش و همچنین تشکیل جلسه

با سلام و احترام،

ضمن تشکر از حسن همکاری پیشین سرکار عالی و گروه فعال در مرکز توسعه آموزش و فناوری راه آهن به جهت دستور ارسال مقاله‌ای از مجموعه مقالات ششمین همایش بین‌المللی حمل و نقل؛ پیرو نامه شماره ۹۷/۳۰۰/۸۷۰۷ مستحضر هستید که پروژه‌ای تحت عنوان "ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیو دیزل الکتریکی به هیبرید الکتریکی" در حال حاضر در پژوهشگاه نیرو در حال اجراست که نظر به اینکه پروژه‌ای تحت عنوان "لوکوموتیو هایبرید" سابقاً در مرکز تحقیقات راه‌آهن انجام گرفته، لذا به منظور بهبود روند پژوهش و کسب دانش از تجربیات پیشین، خواهشمند است امکان دسترسی به گزارش تهیه شده از پروژه مذکور فراهم گردد.

همچنین پیرو مذاکراتی که با جناب آقای مهندس محسن درگزی صورت گرفت، خواستار همکاری بیشتر بین مرکز توسعه آموزش و فناوری شرکت راه‌آهن و پژوهشگاه نیرو بوده و خواهشمند است با برگزاری جلسه‌ای با حضور آقای مهندس محسن درگزی و تیم کارشناس مربوطه در محل پژوهشگاه نیرو و یا مرکز توسعه آموزش و فناوری موافقت فرمایید.

قبلاً از حسن همکاری سرکار عالی قدردانی می‌گردد.

سهراب امینی
رئیس مرکز توسعه موتورهای
الکتریکی پیشرفته

	
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲	
شماره: ۹۷/۳۰۰/۱۱۴۲۳	
پیوست: دارد	

جناب آقای مهندس خان آبادی
مدیر کل محترم دفتر فنی مهندسی و نظارت ناوگان شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران

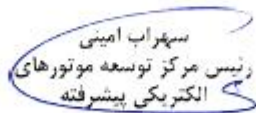
موضوع: ارسال شرح خدمات پروژه و درخواست تشکیل کمیته فنی مشترک

با سلام و احترام،

ضمن تشکر از همکاری جنابعالی و تیم همکار، پیرو مذاکرات جلسه مورخ ۹۷/۱۲/۰۷ بدینوسیله شرح مشخصات اجرایی و مشارکتی پروژه "ارزیابی فنی و اقتصادی تبدیل لوکوموتیوهای مانوری دیزل الکتریکی به هیبریدی" جهت استحضار به پیوست ارائه شده است. خواهشمند است پیرامون این شرح خدمات اعلام نظر فرمائید. همچنین در صورت موافقت پیشنهاد می گردد کارگروه مشترکی برای مشروح تر نمودن شرح خدمات و زمان بندی اجرای پروژه (در صورت نیاز) و نظارت بر اجرای فعالیت ها و راهبری پروژه تشکیل گردد. آقای دکتر محمدرضا نیکزاد به عنوان نماینده پژوهشگاه نیرو در پروژه مذکور معرفی می گردد.

در پایان و پیرو مذاکرات فوق الذکر در صورتی که آن شرکت محترم متمایل به افزایش تعاملات و انجام پروژه های تحقیقاتی مشترک در سایر زمینه ها نظیر Gen-Set و ... می باشد، خواهشمند است پیشنهادات مورد نظر برای همکاری متقابل برای این مرکز ارسال گردد تا گردش کار لازم (جهت اخذ تاییدات مورد نیاز) در پژوهشگاه دنبال گردد.

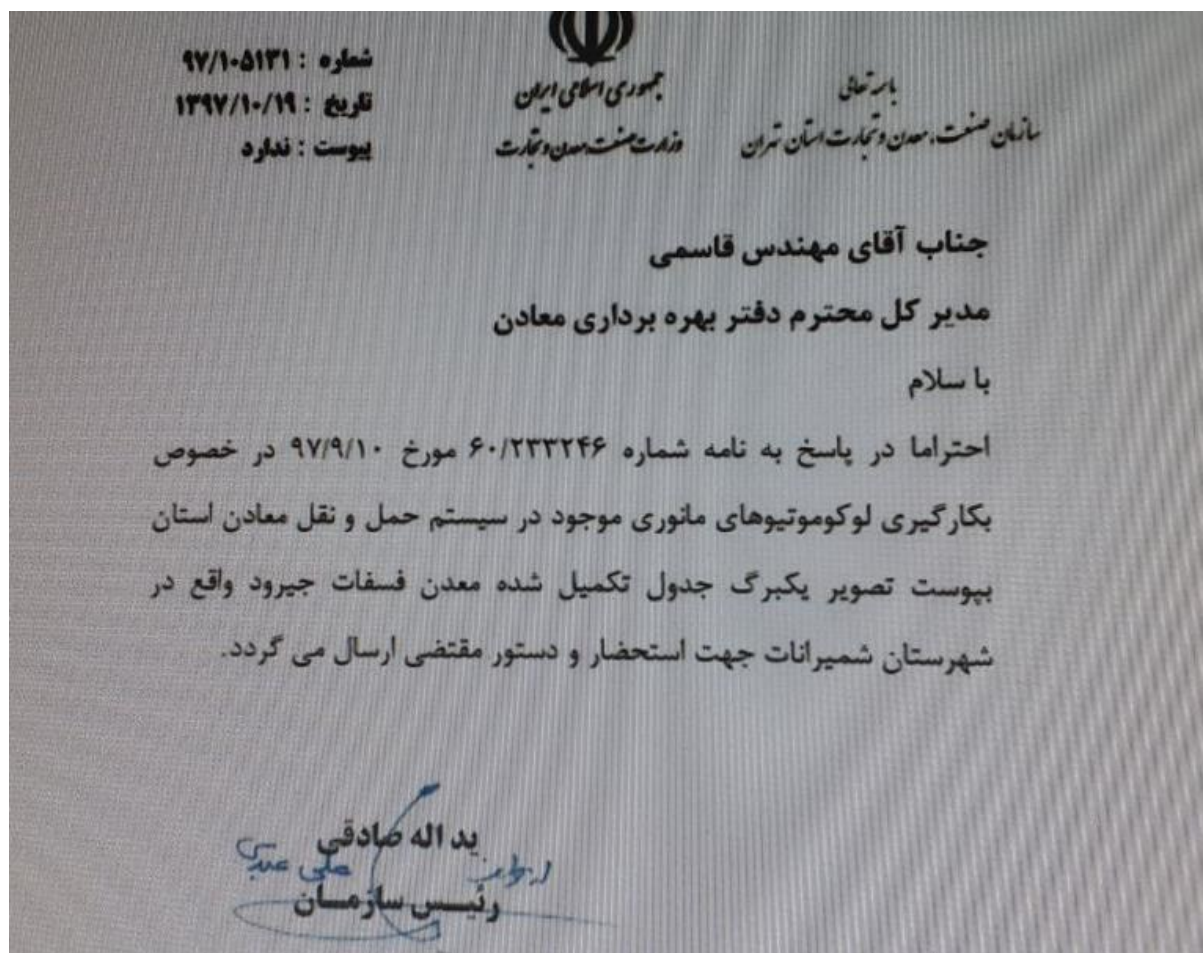
قبلاً از حسن همکاری جناب عالی قدردانی می گردد.



بسمیراب امینی
رئیس مرکز توسعه موتورهای
الکتریکی پیشرفته

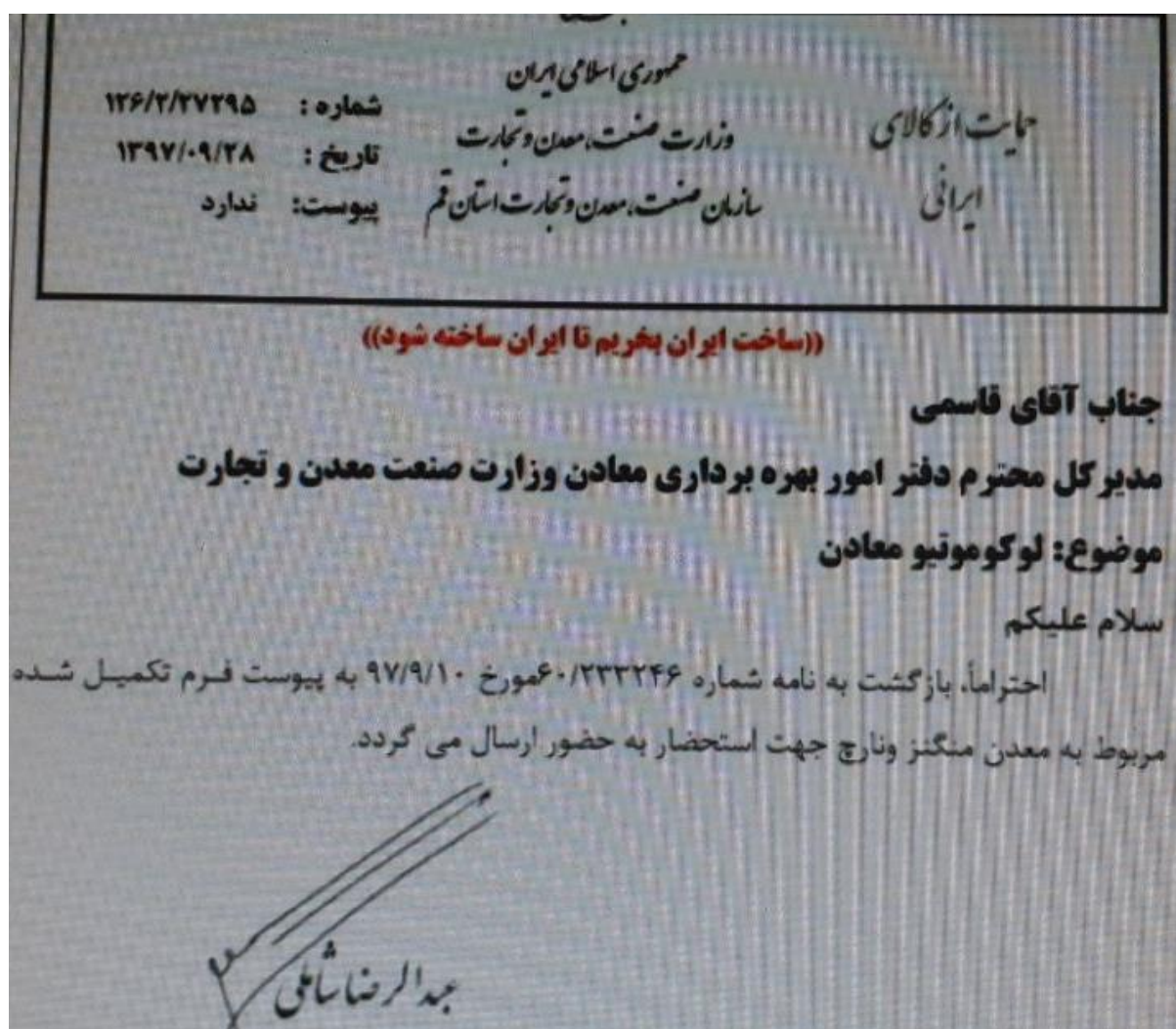


تهران - شهرک قدس انتهای پلوار شهید دامن، صندوق پستی ۱۴۶۶۵-۵۱۷، تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۰، فکس: ۸۸۰۷۸۲۹۶
info@nri.ac.ir www.nri.ac.ir



بهره بردار معدن فسفات جیروود

تعداد: ۴	تعداد لوکوموتیو های مانوری در حال بهره برداری	
توضیحات: لوکوموتیو از نوع توتلی و جهت حمل واکن های کوچک مواد معدنی مورد استفاده قرار می گیرد.		
تعداد: ۰		
توضیحات: -	تعداد لوکوموتیو های مانوری در حالت تعمیر	
تعداد: ۰		
توضیحات: -	تعداد لوکوموتیو های رانده (بدون استفاده)	
تعداد: ۲۱۵ تن (ساخت کشور روسیه)	نوع و مشخصات فنی لوکوموتیو	
تعداد: ۷		
توضیحات: -	تعداد سال های تحت بهره برداری	
تعداد: ۱۰۰ ساعت		
توضیحات: -	تعداد ساعات کاری تخمینی در ماه برای هر دستگاه	
تعداد: -		
توضیحات: لوکوموتیو برقی است با باتری شارژی کار می کند	حجم سوخت مصرفی تخمینی در ماه برای هر دستگاه	
نام و نام خانوادگی	سمت شغلی	شماره تماس
۱- حسن محبوب	سرپرست تعمیرات	۰۹۱۳۵۲۸۲۹۲۱
۲- اکبر رحیم بصیر	سرپرست پشتیبانی	۰۹۱۳۳۷۷۱۰۳۱
نام و شماره تماس افراد خبره فعال در حوزه فوق		تعداد:



۱۷۸