

ارتقای توان لکوموتیو آمریکایی شرکت آلکو تا توان ۳۶۰۰ اسب بخار در هند

حامد مینایی^۱، محسن نجاریان^۲ و *^۱کارشناس، اداره کل راه آهن خراسان، راه آهن جمهوری اسلامی ایران، مشهد^۲کارشناس ارشد، اداره کل راه آهن خراسان، راه آهن جمهوری اسلامی ایران، مشهد

*مسئول مکاتبات: najarian_m@rai.ir

واژگان کلیدی

لکوموتیو
توان
سلول تست
توربوشارژر
پمپ انژکتور

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

چکیده

از سال ۱۹۶۰ تولید لکوموتیوهای آمریکایی کمپانی ALCO با انتقال تکنولوژی در کشور هند تولید گردید. این لکوموتیو با توان ۲۶۰۰ اسب بخار دارای ۱۶ سیلندر بوده و تولید آن بدون هیچگونه تغییر در سیستم‌ها به مدت ۲۵ سال انجام می‌گرفت. برای ارتقای سطح تکنولوژی موتور مذکور جهت دستیابی به بهینه‌سازی مصرف سوخت و افزایش توان بدون اعمال تغییرات اساسی در شاکله موتور، مدیریت تحقیق و توسعه موتور در سال ۱۹۸۰ در مرکز تحقیق و توسعه راه آهن هند ایجاد گردید. از آن به بعد، تلاش‌هایی جهت نیل به اهداف ذکر شده در راه آهن هند انجام گرفت. در مرحله اول تغییرات مختلفی در موتور اصلی ۱۶ سیلندر جهت دستیابی به کاهش مصرف سوخت به مقدار ۶ درصد و کاهش مصرف روغن به مقدار ۱۵ درصد انجام گرفت. با این تغییرات، موتور با نام موتور ۲۶۰۰ اسب بخار FE نام گرفت. در مرحله دوم، توان موتور از ۲۶۰۰ اسب بخار به ۳۱۰۰ اسب بخار ارتقای یافت و در عین حال مصرف سوخت به میزان ۸ درصد و مقدار روغن مصرفی به میزان ۲۵ درصد کاهش یافت. در مرحله سوم و با استفاده از بهبود تکنولوژیکی، توان موتور به حدود ۳۶۰۰ - ۳۳۰۰ اسب بخار افزایش یافته و در عین حال مصرف سوخت به میزان ۹/۶ درصد و مقدار روغن مصرفی به میزان ۳۳ درصد کاهش یافت. تغییرات مرحله چهارم جهت صحت‌گذاری و تست هم اکنون در سلول تست RDSO در حال انجام بر روی لکوموتیو می‌باشد. مصرف سوخت کنونی این لکوموتیو قابل رقابت با هر موتور روز تولید شده در دنیا می‌باشد.

۱ مقدمه

راه آهن هند لکوموتیو دیزل خود را در شرکت DWL که یک واحد صنعتی زیر مجموعه وزارت راه آهن هند است، تولید نمود. واحد صنعتی فوق در سال ۱۹۶۱ و با همکاری شرکت ALCO آمریکا در شهر Varanasi تأسیس گردید. این شرکت تاکنون حدود ۴۶۵۰ لکوموتیو تولید و محصولات آن به کشورهای جنوب غربی آسیا نیز صادر گردیده است. افزایش هزینه‌های انرژی در سراسر دنیا تولید کنندگان موتور را وادار به بهبود، بهینه‌سازی توان و کنترل موتور گردانید. راه آهن هند بطور سالیانه حدود دو میلیارد لیتر گازوئیل در ناوگان ۴۰۰۰ واحدی حمل و نقلی خود مصرف می‌نماید. لکوموتیوهای باری و مسافری این راه آهن شامل موتورهای ۱۶، ۱۲ و ۶ سیلندر شرکت آلکو می‌باشند [۱]. موارد ذکر شده در بالا در سال ۱۹۸۷ منتهی به ایجاد معاونت توسعه موتور RDSO در شهر Lucknow گردید. این واحد دارای تجهیزات مخصوص جهت توسعه تست انواع موتورهای دیزل مورد استفاده در راه آهن هند می‌باشد. این تجهیزات قابل مقایسه با بهترین تجهیزات مورد استفاده در دنیا بوده تا اهداف ذیل بدست آید:

- توسعه تکنولوژی برای بهبود موتورهای دیزل ریلی برای:

- بهینه‌سازی مصرف سوخت

- بالا بردن قابلیت اطمینان

- افزایش و سهولت در دسترسی

در این مقاله اقدامات متعددی شامل تغییر در توربوشارژرها، خنک‌کن هوا، پمپ انژکتور، میل سوپاپ و سایر موارد جهت ارتقای توان لکوموتیو آلکو بدون تغییر در شاکله اصلی لکوموتیو در هند مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالب و اطلاعات از منابع و گزارشات معتبر علمی استخراج گردیده که می‌تواند به عنوان راهکارهای راهگشا جهت بهبود و ارتقای توان و همچنین بهبود و کاهش مصرف سوخت و روغن لکوموتیوهای داخلی مورد استفاده قرار گیرد.

۲ تجهیزات سلول تست موتور

دستگاه RDSO دارای ۴ سلول تست^۱ مجهز می‌باشد. این سلول‌ها دارای تجهیزات مخصوص جهت تست چهار نوع از موتورهای تولید شده در DLW می‌باشند. (موتور ۱۶ سیلندر GM-EMD، ۱۶، ۱۲ و ۶ سیلندر ALCO). هر سلول تست دارای سیستم داده برداری تحت کنترل ریز پردازنده^۲ و واحد نمایشگر^۳ (VDU) جهت نمایش فشار، دما و دیگر پارامترها می‌باشد. مبدل‌های مختلف، اطلاعات بدست آمده از تست موتور را تقویت کرده و بر اساس نیاز اپراتور جهت تجزیه و تحلیل به کمک نرم افزار، به ریز پردازنده ارسال می‌کنند. یک سلول تست در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹Test cell ²Microprocessor ³Video Display Unit



شکل ۱: سلول تست موتور دیزل [۱]

۴ مراحل مختلف توسعه

۱.۴ مرحله اول

در ابتدای دهه ۹۰ میلادی کیت بهینه سازی مصرف سوخت برای موتورهای ۱۶ سیلندر DWL ساخته شده توسط شرکت آلکو توسعه و ارتقا داده شد که باعث کاهش مصرف سوخت ویژه به مقدار بیشتر از ۶ درصد و کاهش مقدار روغن مصرفی در حدود ۱۵ درصد گردید. مصرف سوخت در حالت تمام بار از ۱۶۶ گرم بر توان ترمزی بر ساعت به مقدار ۱۵۶ گرم بر توان ترمزی بر ساعت کاهش یافت. بطور مشابه، نسبت مصرف روغن به سوخت از ۱/۵ درصد به ۱/۲۷ درصد کاهش پیدا نمود. تغییرات اصلی در طراحی جهت بهبود در مصرف سوخت و روغن بشرح ذیل می باشد.

۱.۱.۴ بهبود طراحی در خنک کن هوا

افتراکولر^۶ در یک موتور توربوشارژر شده، هوای فشرده شده خروجی توربوشارژر^۷ را قبل از ورود به موتور خنک می کند [۳]. یک افتراکولر بزرگ با عملکرد بالاتر جهت بهبود در ظرفیت خنک کاری هوای فشرده شده طراحی و ساخته شد. اندازه هسته جهت بالا بردن سطح تماس بین هوا و آب افزایش یافت. افتراکولر جدید که افتراکولر بزرگ نام گذاری شد باعث کاهش دمای سیکل خنک کاری و کاهش تنش های حرارتی موتور گردید. شکل ۳ نمای این افتراکولر را نشان می دهد.

این تغییر، خنک کاری موثر افتراکولر را از ۵۰ درصد به ۷۵ درصد و دمای دود آگزوز را از ۶۰۰°C به ۵۲۰°C کاهش داد. در این حالت، تخمین بهبود انجام گرفته برای کاهش مصرف سوخت حدود ۱ درصد و مصرف روغن حدود ۲/۵ درصد برآورد گردیده است.

هر سلول تست دارای حدود ۱۲۰ - ۶۰ عدد از تجهیزات مخصوص از جمله ترانسدیوسرهای فشار/دما به همراه تجهیزات پیشرفته موازنه جرمی سوخت جهت اندازه گیری مصرف سوخت و تجهیزات دیگر برای اندازه گیری دبی هوا می باشد [۱]. همچنین این بسترهای تست، مجهز به سیستم داده برداری پرسرعت بوده (شکل ۲) که توانایی جمع آوری اطلاعات موتور در فرکانس ۱۰۰ MHz از ۱۶ کانال داده برداری آنالوگ و دسترسی همزمان به ترانسدیوسرهای مختلف مانند فشار سیلندر، برخاستگی سوپاپ^۱، فشار تزریق سوخت، برخاستگی سوپاپ سوزنی انژکتور^۲ و غیره را داراست [۱].

۳ دو شاخص مهم بهینه سازی مصرف سوخت

۱.۳ مصرف سوخت در دنده ۸

از آنجایی که مصرف سوخت در دنده ۸^۳ بیشتر از دنده های دیگر بوده و این دنده در لکوموتیو به نسبت دنده های دیگر مدت زمان بیشتری مورد استفاده قرار می گیرد، مصرف سوخت در دنده ۸ یکی از مهمترین شاخص های بهینه کردن مصرف سوخت می باشد. این مقدار با گرم بر توان ترمزی - ساعت (gm / bhp - hr) اندازه گیری می شود [۲].

۲.۳ مصرف سوخت بر اساس چرخه عمر

یک موتور در طول سیر بر حسب نیاز سرعت / بار لکوموتیو، در دنده های مختلفی کار می کند. درصد حرکت لکوموتیو در دنده های مختلف در طول چرخه عمر^۴ آن بر اساس نوع استفاده باری و مسافری^۵ در راه آهن هند مطابق جدول ۱ می باشد.

¹Valve lift ²Injector needle valve lift ³Notch ⁴Duty cycle ⁵Passenger and freight operations ⁶After-cooler ⁷Turbocharger



شکل ۲: تجهیزات داده برداری پر سرعت و اتاق فرمان [۱]

جدول ۱: درصد حرکت لکوموتیو در دنده‌های مختلف در طول چرخه عمر بر اساس نوع استفاده باری و مسافری [۲]

دنده	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	خلاص
مسافری	۲۱	۶	۴	۸	۴	۸	۵	۶	۳۸
درصد چرخه عمر باری	۲۲	۷	۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳	۱/۵	۵۱

حالی که توربوشارژرهای جدید دارای راندمان بیشتر از ۶۰ درصد می باشند. سرعت دورانی روتور این نوع توربوشارژرها در محدوده توان اسمی، بالاتر از ۲۳۰۰۰ rpm (در مقایسه با دور ۱۹۰۰۰ rpm توربوشارژرهای قبلی) می باشد. با افزایش راندمان توربوشارژر، چگالی هوای ورودی بدون تغییر در محفظه احتراق افزایش یافته است [۲]. با استفاده از این نوع توربوشارژر، فشار بوست^۱ هوای ورودی از ۱/۲ bar به ۱/۶ bar افزایش یافت. جدول ۲ مشخصات این دو نوع توربوشارژر را نشان می دهد. تخمین زده می شود که با اعمال این تغییر، مصرف سوخت و روغن به ترتیب به مقدار حدود ۱ درصد و ۲/۵ درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۳: افترکولر بزرگ [۲]

۳.۱.۴ تغییر در مسیرهای آب خنک کاری

چیدمان مسیر آب خنک کاری جهت بالا بردن عملکرد خنک کاری هوای ورودی تغییر داده شد. ورودی آب افترکولر برای تغذیه آب به آن در کمترین دمای ممکن تغییر پیدا کرد. آب ورودی به افترکولر مستقیماً از رادیاتور تغذیه شده و خروجی آن به ورودی واتر پمپ متصل شده است [۳]. در طراحی اولیه آب ورودی افترکولر از خروجی واتر پمپ تغذیه می گردید. اتصالات قدیمی و تغییر یافته در دیاگرام زیر نمایش داده شده است.

در یک محاسبه تخمین زده شده است که این تغییرات موجب کاهش حدود ۵/۵ درصد در مصرف سوخت و ۱ درصد در مصرف روغن موتور گردیده است. دیاگرام مدار خنک کاری قدیمی و تغییر یافته در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲.۱.۴ تغییر و توسعه در توربوشارژرها

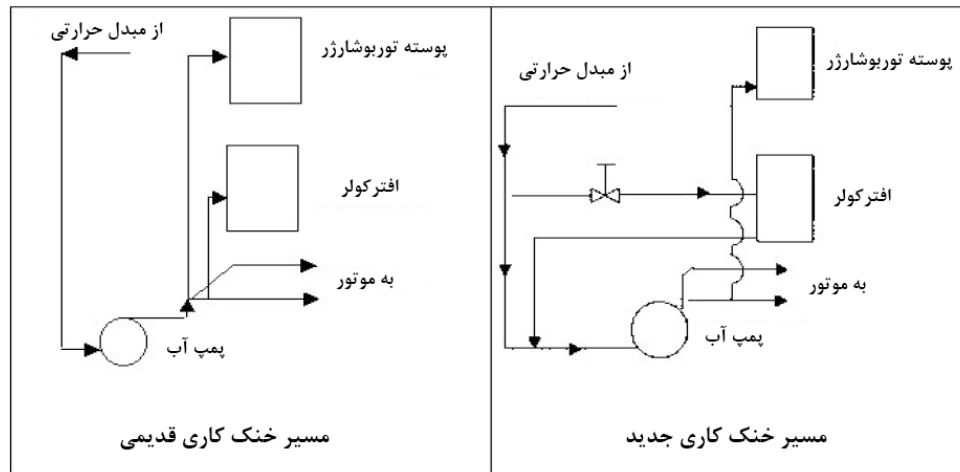
موتورهای اولیه لکوموتیو تولید شده DWL بوسیله توربوشارژرهای A720 آلکو تجهیز شده بودند. این توربوشارژرها با یک نوع پیشرفته ترمینال که دارای راندمان بالاتر در مصرف سوخت است، تعویض شدند.

- توربوشارژر Napier NA295 A720 و
 - توربوشارژرهای ABB VTC-304 VG-13
- راندمان عمومی توربوشارژر ALCO در محدوده ۵۰ درصد بوده، در

¹Boost pressure

جدول ۲: مشخصات توربوشارژر اولیه و توربوشارژر پیشرفته جایگزین در مرحله اول [۲]

مشخصه	توربوشارژر مدل ۱۹۶۰ - ۱۹۹۰	توربوشارژر استفاده شده در مرحله اول
کلاس بندی تکنولوژی توربوشارژرها	متداول	عملکرد بالا
مدل های توربوشارژر استفاده شده توسط RDSO	ALCO 720A	Napier NA295 A720 ABB VTC-304 VG-13
کارایی عمومی توربوشارژر	۵۰ درصد	۶۰ درصد
دمای دود آگزوز در ورودی توربوشارژر	$> 600^{\circ}C$	$580^{\circ}C$
بازه های تعمیر و نگهداری	۶ ماه	۲ سال
خصوصیات برجسته	انطباق یاتاقان از نوع پرسی. یاتاقان تراست در سمت داغ	انطباق یاتاقان از نوع لق. بوش شناور. یاتاقان تراست در سمت خنک



شکل ۴: دیاگرام مدار خنک کاری قدیمی و تغییر یافته [۳]

کپه های فولادی علاوه بر تحمل تنش های حرارتی در دماهای بالا به دلیل خوردگی و سایش کمتر نشیمنگاه رینگ ها، دارای عمر بالاتری می باشند [۴، ۵]

مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن با استفاده از پیستون فولادی به ترتیب حدود ۱/۵ درصد و ۴ درصد تخمین زده شده است.

۵.۱.۴ تغییرات در پمپ انژکتور

پمپ های انژکتور مورد استفاده در موتورهای آلکو دارای پلانجر با قطر ۱۵ mm می باشد که نمایی از آن در شکل ۶ نشان داده شده است. قطر پلانجر در پمپ انژکتور از ۱۵ mm به ۱۷ mm افزایش یافت. این افزایش قطر باعث تزریق سریعتر سوخت یعنی تزریق در فشار بالاتر گردید. این تغییر منجر به افزایش فشار خط سوخت از ۷۵۰ bar به ۸۵۰ bar و در نتیجه بهبود راندمان سوخت رسانی گردید.

مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن در این تغییر به ترتیب حدود ۱/۵ درصد و ۴ درصد تخمین زده شده است.

۶.۱.۴ تغییرات میل سوپاپ

همپوشانی سوپاپ در میل سوپاپ جدید جهت بهبود تهویه میل لنگ^۲ از ۱۲۳ deg به ۱۴۰ deg افزایش یافت (شکل ۷) که در این حالت بادامک های

۴.۱.۴ افزایش نسبت تراکم موتور به ۱۲/۵ با استفاده از پیستون های با کپه فولادی

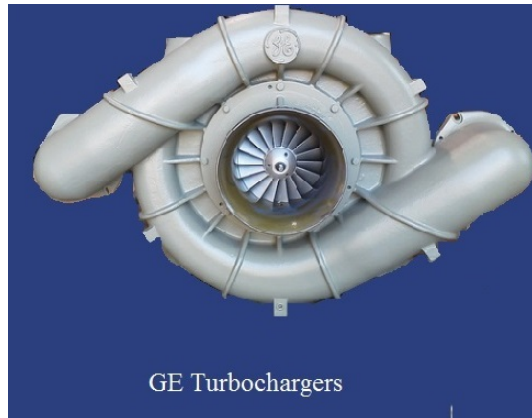
موتور اصلی آلکو دارای پیستون های با کپه آلومینیومی است. استفاده از توربوشارژر با بازدهی بالاتر و پمپ انژکتور با ظرفیت بالاتر (همانطور که در قبل اشاره گردید) موجب افزایش فشار پیک اشتعال موتور گردید [۳]. در این حالت پیستون های آلومینیومی در مقابل این فشار مقاومت نداشته و به همین علت پیستون های فولادی (مطابق شکل ۵) جایگزین آنها گردیدند. کپه فولادی این پیستون ها علاوه بر مقاومت حرارتی بالا دارای شکل بخصوص در قسمت تاج پیستون^۱ جهت احتراق بهتر می باشد [۴].



شکل ۵: پیستون کپه فولادی و آلومینیومی [۵]

¹Piston crown ²Scavenging

توربوشارژرهای بازدهی بالا به ترتیب حدود ۱ درصد و ۴/۵ درصد تخمین زده شده است.



شکل ۸: توربوشارژر GE7S1716 با دو مجرای تخلیه [۲]

در جدول ۳ مقایسه مشخصات توربوشارژرهای مرحله اول و دوم نشان داده شده است.

۲.۲.۴ معرفی رینگ پیستون‌های با راندمان سوخت بالا

موتورهای اولیه DWL دارای مجموعه رینگ پیستون با آرایش ترتیبی رینگ کمپرس با مقاطع مربعی، مخروطی، مخروطی و دو رینگ روغن یکی در بالا و دیگری در دامنه پیستون می‌باشد. در آرایش جدید، مطابق شکل ۹ رینگ‌های کمپرس به ترتیب بشک‌ای، دو رینگ مخروطی و دو رینگ روغن بعد از رینگ‌های کمپرس قرار می‌گیرد. آرایش رینگ‌های جدید باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در مصرف سوخت و روغن گردیده است [۴]. این آرایش جدید رینگ‌ها به نام دست رینگ کم مصرف^۳ نام گذاری گردید.



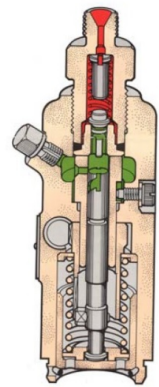
شکل ۹: رینگ پیستون [۹]

با استفاده از این آرایش رینگ، بصورت تخمینی کاهش مصرف سوخت و روغن به ترتیب حدود ۵/۰ درصد و ۵/۲ درصد محاسبه گردیده است.

۳.۲.۴ استفاده از روغن روانکاری چند درجه

روغن‌های روانکاری تک درجه^۴ که بطور پیشنهادی در موتور آلکو استفاده می‌شود، در راه آهن هند تا سال ۱۹۹۸ مورد استفاده قرار می‌گرفت. از سال

هوا و دود بگونه‌ای طراحی گردیدند که سوپاپ‌های هوا و دود در بازه زمانی بیشتری بطور همزمان باز نگه داشته شوند. این همپوشانی منجر به افزایش راندمان حجمی موتور که اثر بسیار مهمی در کاهش مصرف سوخت دارد، گردید [۴]. پهنای بادامک‌های سوخت^۱ همراه با عرض بادامک سوخت نیز افزایش یافت تا فشار تزریق سوخت افزایش یابد.



شکل ۶: پمپ انژکتور و برش عرضی آن [۶]



شکل ۷: میل سوپاپ [۶]

مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن در این تغییر به ترتیب حدود ۵/۰ درصد و ۱ درصد تخمین زده شده است.

۲.۴ مرحله دوم

با افزایش دور موتور از ۱۰۰۰ rpm به ۱۰۵۰ rpm و استفاده از توربوشارژر جدید در سال ۱۹۹۲ توان موتور آلکو از ۲۶۰۰ hp به ۳۱۰۰ hp افزایش یافت. جدا از ارتقای موتور، تغییرات بالا باعث کاهش بیشتر مصرف سوخت از ۱۵۶ gm/bhp-hr به ۱۵۳ gm/bhp-hr در دنده ۸ و کاهش در نسبت سوخت و روغن از ۱/۲۷ درصد به ۱/۱۲ درصد گردید.

۱.۲.۴ ارتقای توربوشارژرهای بازدهی بالا

توربوشارژرهای بازدهی بالای^۲ موجود در بازار جهانی بر روی موتور ارتقا یافته ۳۱۰۰ hp تست شده و بهینه سازی گردیدند. دو طرح جدید توربوشارژرها، ABB VTC-304 VG-15 و GE 7S1716 (دو مجرای تخلیه) برای موتور ۳۱۰۰ hp انتخاب گردیدند. در شکل ۸ نمایی از این توربوشارژر نشان داده شده است. با استفاده از این توربوشارژرها فشار بوسه از ۱/۶ bar به ۱/۹ bar افزایش یافت. سرعت روتور در توان اسمی نیز به ۲۷۰۰۰ rpm (در عوض ۲۳۰۰۰ rpm در توربوشارژرهای مرحله یک) افزایش یافت.

مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن با استفاده از

^۱Fuel cam lobe

^۲High Efficiency Turbocharger

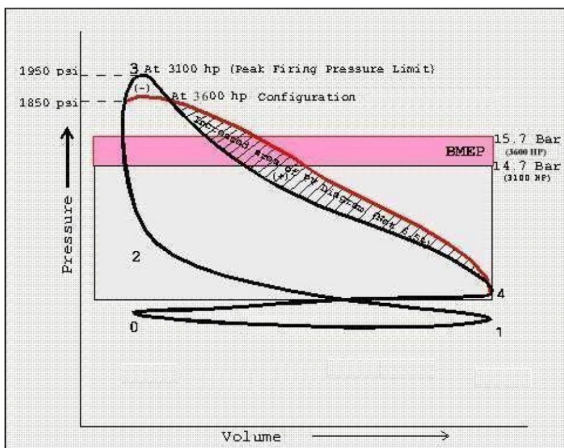
^۳Fuel-efficient ring set

^۴Mono-grade

جدول ۳: مقایسه مشخصات توربوشاژرها در مرحله اول و دوم [۲]

مشخصه	مرحله اول	مرحله دوم
کلاس بندی تکنولوژی توربوشاژرها	کارآمد	بازدهی بالا
مدل های توربوشاژر استفاده شده توسط RDSO	Napier NA295 A720 ABB VTC-304 VG-13	GE 7S1716 ABB VTC-304 VG-15
کارایی عمومی توربوشاژر	۶۰ درصد	۶۴ درصد
دمای دود آگزوز در ورودی توربوشاژر	۵۸۰ °C	۵۰۰ °C
بازه های تعمیر و نگهداری	۲ سال	۴ سال
خصوصیات برجسته	تلرانس انطباق یاتاقان از نوع لق. بوش شناور. یاتاقان تراست در سمت خنک	تلرانس انطباقی یاتاقان از نوع لق. یاتاقان تراست در دو سمت

BMEP را نشان می دهد.



شکل ۱۱: تغییرات منحنی PV سیکل کاری موتور بر حسب تغییرات BMEP [۲]

به لحاظ تئوری، رسیدن به توان اسمی ۳۶۰۰ hp با افزایش سطح زیر نمودار منحنی PV در حالت ۳۱۰۰ hp با فشار پیک احتراق در محدوده مشخص شده با انتخاب پیکربندی مناسب موتور قابل دستیابی می باشد [۸]. همانطور که می دانیم، $p = HP \times K/N$ که در آن p فشار متوسط موثر ترمزی (BMEP)، K عدد ثابت و N دور موتور می باشد. برای توان ۳۱۰۰ hp داریم:

$$p_1 = 3100K/1050 = 2.95K \quad (14.7 \text{ bar})$$

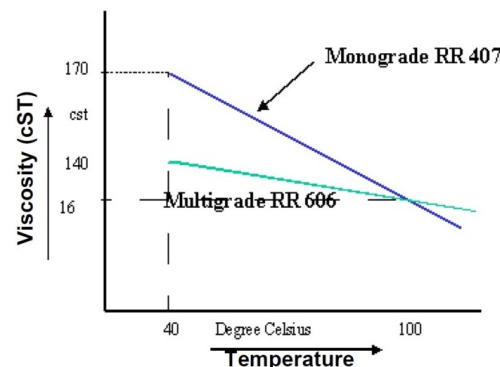
$$p_2 = 3600K/1050 = 3.43K = 1.16p_1 \quad (17.2 \text{ bar})$$

بنابراین برای ارتقا توان تا ۳۶۰۰ hp، BMEP می بایست به میزان ۱۶ درصد افزایش یابد که در نتیجه این افزایش فشار، فشار پیک احتراق و دمای دود خروجی با همان پیکربندی موتور افزایش خواهد یافت. از این رو نیاز به پیکربندی مناسبی است تا این پارامترهای بحرانی محدود گردند.

۱.۳.۴ معرفی توربوشاژرهای جدید

توربوشاژرهای جدید (شکل ۱۲) هوا خنک دارای بازدهی عمومی ۷۰ درصد به جای توربوشاژرهای بازدهی بالا جایگزین گردیدند. دو توربوشاژر جدید، ABB TPR-61 و HS 5800 NGT در سلول تست RDSO برای موتورهای ۳۱۰۰ hp و ۳۶۰۰ hp و موتورهای مشابه بهینه سازی و معرفی گردیدند. فشار هوای بوست در ۳۳۰۰ hp و ۳۶۰۰ hp به ترتیب ۲ و ۲/۲ bar می باشد. سرعت دورانی روتور در این مدل توربوشاژر در موتورهای ۳۳۰۰ hp تا حداکثر ۳۰۰۰۰ rpm می باشد.

۱۹۹۵ به بعد با تصمیم RDSO روغن مورد استفاده دیزل ها به روغن چند درجه 20W40 تغییر یافت. این روغن ها دارای افزودنی هایی با نام بهبود دهنده شاخص لزجت (VII) جهت به حداقل رساندن تغییرات لزجت بر اساس تغییرات دما می باشند. روغن های تک درجه در دماهای کاری بالا خاصیت روانکاری خود را از دست می دهند. با استفاده از روغن های چند درجه، روانکاری قطعات متحرک در دماهای بالا بهتر انجام می شود. این رفتار روغن های چند درجه ای، خواص روانکاری در دماهای کاری را بهبود بخشیده و در نتیجه در کاهش مصرف سوخت بسیار موثرند. در شکل ۱۰ نمودار لزجت بر حسب دمای روغن برای روغن های چند درجه و تک درجه نشان داده شده است.



شکل ۱۰: نمودار لزجت بر حسب دمای روغن [۴]

با وجود اینکه قیمت تمام شده روغن های چند درجه ای بیشتر از روغن های تک درجه ای می باشند ولی از منظر کاهش مصرف سوخت به صرفه تر می باشند. مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن با استفاده از روغن موتور چند درجه به ترتیب حدود ۵/۰ درصد و ۳ درصد تخمین زده شده است.

۳.۴ مرحله سوم

موتور ۳۱۰۰ hp شرکت ALCO با همکاری سیستم حمل و نقل GE در سال ۲۰۰۱ به ۳۳۰۰ hp و در سال ۲۰۰۲ به ۳۶۰۰ hp ارتقا یافت. مصرف سوخت موتور ارتقا یافته همچنین از ۱۵۳ gm/bhp-hr به ۱۵۰ gm/bhp-hr در بالاترین دنده کاهش یافت. بطور مشابه نسبت سوخت به روغن از ۱/۱۲ درصد به ۱ درصد کاهش یافت.

شکل ۱۱ تغییرات منحنی PV سیکل کاری موتور بر حسب تغییرات

¹Multi-grade

شدن سطح تماس و بهتر شدن انتقال حرارت گردید.

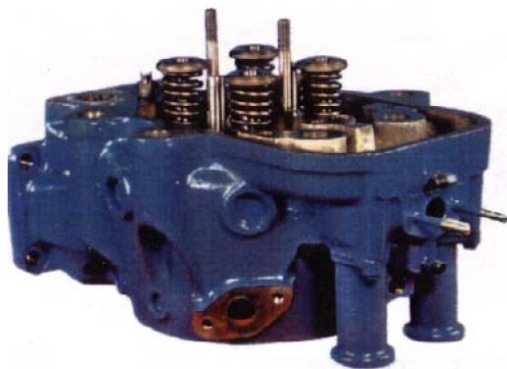


ABB TPR-61

HS 5800 NGT

شکل ۱۲: توربوشارژرهای جدید [۲]

شکل ۱۴: سرسیلندر جدید [۲]

مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن با استفاده از سرسیلندر جدید به ترتیب حدود ۵/۵ درصد و ۳ درصد تخمین زده شده است.

مقایسه مشخصات فنی توربوشارژرها در مرحله ۱ و مرحله ۲ در جدول ۴ آمده است. مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن با استفاده از توربوشارژرهای جدید به ترتیب حدود ۶/۶ درصد و ۲ درصد تخمین زده شده است.

۲.۳.۴ ارتقا میل بادامک

برای تولید توان بالاتر به همراه بهبود راندمان سوخت، نیاز به تغییر طراحی بادامک سوخت بوده تا تزریق سوخت سریعتر انجام گردد [۴]. یک طرح جدید برای میل بادامک با پروفیل بادامک تغییر یافته طراحی و ساخته شد. این طراحی با عنوان Stiffer Unit Camshaft نامگذاری گردید. با استفاده از این میل بادامک فشار پیک خط سوخت تا ۱۱۰۰ bar افزایش یافت. این میل بادامک برای جذب تنش اضافی ناشی از افزایش فشار خط سوخت استحکام بخشی شده است. (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: میل بادامک تقویت شده [۴]

مقادیر محاسبه شده برای کاهش مصرف سوخت و روغن با استفاده از میل بادامک تقویت شده به ترتیب حدود ۵/۵ درصد و ۳ درصد تخمین زده شده است.

۳.۳.۴ ارتقای سرسیلندر

برای حفاظت موتور در مقابل بارهای حرارتی، زاویه سوپاپ هوا از ۴۵° به ۳۰° و نیز درگاه هوا و دود برای بهبود جریان هوا و کمینه کردن مقاومت جریان برای بهبود راندمان تنفسی موتور تغییر شکل پیدا نمود. کیفیت ریخته‌گری سرسیلندر مانند گوشه‌های گرد و کیفیت سطوح داخلی بهبود پیدا نمود. شکل ۱۴ یک نمونه از این سرسیلندر را نشان می‌دهد. نرخ انتقال حرارت مورد نیاز در طراحی جدید، با طراحی جدید شکل سرسیلندر و نازک تر شدن فضای بین محفظه احتراق با راهگاههای آب خنک کاری و رابط سوپاپ‌های^۱ ماشین کاری شده بدست آمد [۲]. محل قرارگیری مسیرهای آب خنک کاری نیز جهت بهتر شدن انتقال حرارت تغییر کرد. اینسرت‌های نشیمن فنر^۲ بدون خار سوپاپ بصورت پرسی جا زده شد که باعث بزرگتر

۴.۳.۴ تغییر ساختار موتور و پارامترهای کاری در ارتقا

آزمایش‌های ذکر شده در بالا نتیجه بهینه‌سازی ساختار موتور دیزل ۱۶ سیلندر آلکو برای رسیدن به توان ۳۶۰۰ hp می‌باشد:

۱. مجموعه میل بادامک سوخت تقویت شده (شروع تزریق در ۲۲° BTDC)
 ۲. توربوشارژر GE 7S1716 (با نازل ۲۶ in^۲) با مجاری تخلیه دوتایی
 ۳. پیستون‌های با کپه فولادی کاسه ای با نسبت تراکم ۱۱/۷۵
 ۴. مجموعه سرسیلندر جدید
 ۵. لوله‌های سوخت رسانی فشار بالا با تحمل فشار ۱۲۰۰ bar
 ۶. پمپ انژکتور با قطر پلانجر ۱۷ mm و ۳۵ دندانه‌ای
 ۷. باقیمانده قطعات و اجزا بدون دستکاری همانند موتور ۳۱۰۰ hp
- دیگر تجهیزات پیشنهادی برای موتور دیزل با توان اسمی ۳۶۰۰ hp عبارتند از:
۱. رادیاتور خنک‌کاری شبکه ای پره دار برای بار حرارتی ۲۰۰۰ kW.
 ۲. دو عدد افترکولر برای بار حرارتی ۴۰۰ kW و راندمان بالای ۹۰ درصد
 ۳. خنک کن روغن صفحه‌ای برای بار حرارتی ۵۰۰ kW
 ۴. پره پمپ آب ۱۰ اینچی
 ۵. شبکه لوله‌کشی خنک‌کاری آب و روغن ساده و موثر
 ۶. مانیفولد دود عایق

موتور ارتقا یافته ۱۶ سیلندر DWL/ALCO تا توان ۳۶۰۰ hp به مدت ۱۰۰ ساعت در سلول تست و بر اساس استاندارد UIC623.2/KTA3702.2 تست و صحت‌گذاری گردید. جزئیات مراحل تست به شرح ذیل می‌باشد:

۱. در توان اسمی (۱۰۰٪) - به مدت ۸۰ ساعت. توان × دور موتور. (۱۰۰۰ × ۳۵۰۰ و ۱۰۵۰ × ۳۶۰۰)
۲. در توان بالاتر از توان اسمی (۱۱۰٪) - به مدت یک ساعت. توان × دور موتور. (۱۰۰۰ × ۳۸۲۵ و ۱۰۵۰ × ۳۹۶۰)

¹Valve bridge ²Valve seat inserts

جدول ۴: مقایسه مشخصات توربوشاژرها در مرحله دوم و سوم [۲]

مشخصه	مرحله دوم	مرحله سوم
کلاس بندی تکنولوژی توربوشاژرها	بازدهی بالا	تولید جدید
مدل های توربوشاژر استفاده شده توسط RDSO	GE 7S1716 ABB VTC-304 VG-15	ABB TPR-61 HS 5800 NGT
کارایی عمومی توربوشاژر	۶۴ درصد	۷۰ درصد
دمای دود آگزوز در ورودی توربوشاژر	$500^{\circ}C$	$500^{\circ}C$
بازه های تعمیر و نگهداری	۴ سال	۴ - ۶ سال
خصوصیات برجسته	تلرانس انطباق یاتاقان از نوع لق. یاتاقان تراست در دو طرف	تلرانس انطباق یاتاقان از نوع لق. یاتاقان تراست در دو طرف - هوا خنک

۳. در بارهای میانی (۱۰۰۰ rpm) - به مدت ۱۰ ساعت.

۳۶۰۰ hp	دو ساعت و نیم ۱۰۰٪
۷۲۰۰ hp	دو ساعت و نیم ۷۵٪
۱۸۰۰ hp	دو ساعت و نیم ۵۰٪
۹۰۰ hp	دو ساعت و نیم ۲۵٪

۴. تست سیکلی - به مدت ۹ ساعت (۱۰۰۰ rpm)

در طول مدت ۱۰۰ ساعت تست انجام گرفته مطابق برنامه جدول ۵، چندین بار موتور تحت بار حداکثری و محدوده سرعت ماکزیمم قرار گرفت و عملکرد و شرایط موتور پایش شده و در تمام وضعیت ها کارکرد موتور بسیار نرم بوده و تمامی پارامترها در محدوده نرمال و تعریف شده قرار گرفتند. هیچگونه حالت غیر عادی در موتور، سیستم ها و اجزا ملاحظه نشد.

جدول ۵: تست انجام گرفته بر روی موتور تحت بار حداکثری و محدوده سرعت ماکزیمم [۲]

۵ سیکل	۲ دقیقه	۱۵٪	۵۴۰ HP
۵ سیکل	۸ دقیقه	۱۰۰٪	۳۶۰۰ HP
۱۸ سیکل	۴ دقیقه	۲۵٪	۹۰۰ HP
۲۶ سیکل	۶ دقیقه	۱۰۰٪	۳۶۰۰ HP
	۴ دقیقه	۵۰٪	۱۸۰۰ HP
	۶ دقیقه	۱۰۰٪	۳۶۰۰ HP
	۴ دقیقه	۷۵٪	۲۷۰۰ HP
	۶ دقیقه	۱۰۰٪	۳۶۰۰ HP

در خلال برنامه بهبود / تغییرات / ارتقا در سه مرحله ذکر شده فوق تلاش گردید تا پارامترهای موتور در شرایط بحرانی اندازه گیری و ثبت گردد. خلاصه ای از مقایسه بین پارامترها در شرایط بحرانی کارکرد موتور در جدول ۶ آمده است.

۴.۴ مرحله چهارم

این مرحله شامل بهبودهای تکنولوژیکی بوده که در آن دستیابی به کاهش مصرف سوخت موتور لکوموتیو انجام گرفته ولی هنوز در حال تکمیل می باشد. با اعمال تغییرات جدید در موتور آکو کاهش در مصرف سوخت و روغن به ترتیب به میزان ۲ درصد و ۶ درصد قابل دستیابی خواهد بود.

۱.۴.۴ سیستم تزریق سوخت الکترونیکی

پمپ سوخت های مکانیکی که در موتورهای اولیه آکو مورد استفاده قرار می گرفت، هیچگونه تنظیماتی جهت تزریق سوخت در دنده های مختلف

نداشت. از آنجایی که بیشترین مصرف سوخت در دنده های هفتم و هشتم می باشد، زمان بندی تزریق در این موتور بهینه گردید تا کمترین مصرف سوخت ویژه در این دنده ها بدست آید. پمپ های انژکتور الکترونیکی دارای مزیت هایی از جمله تنظیمات شروع و پایان تزریق در هر سیلندر بطور جداگانه را دارا بوده و در نتیجه تزریق در مطلوب ترین مقدار برای احتراق در محفظه و در زمان معین انجام می گردد. شکل ۱۵، جایگاه یک پمپ EFI را در یک سیستم تزریق سوخت الکترونیکی نشان می دهد [۹].

جدا از اینکه پمپ های الکترونیکی (شکل ۱۶) مصرف سوخت را در دنده های پایین به مقدار قابل توجهی کاهش می دهند، موجب کم شدن تعداد قطعات مکانیکی شده و در نتیجه موجب کاهش هزینه های نگهداری و بالا بردن قابلیت اطمینان می گردند.

از مزیت های دیگر این سیستم می توان به حذف آلارم های داغ موتور، کنترل و عیب یابی بهتر، طراحی انعطاف پذیر، بالانس اتوماتیک و کاهش آلایندگی ناشی از آگزوز اشاره نمود [۴].

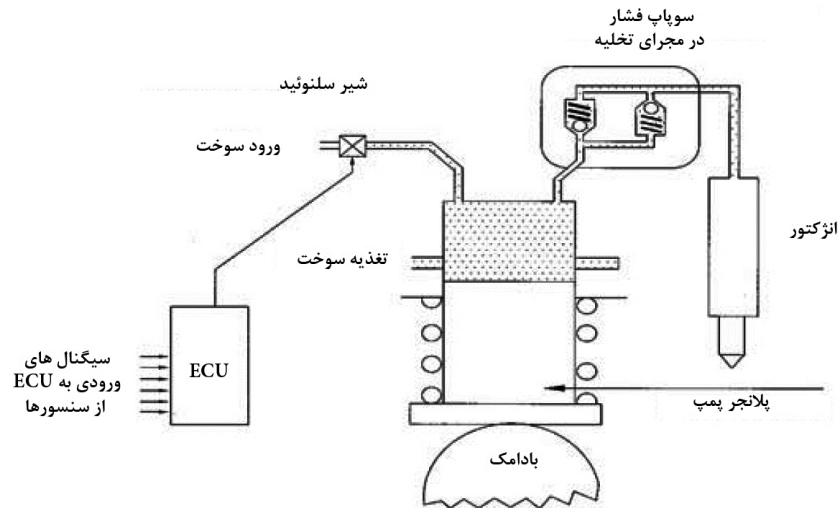
این سیستم موجب کاهش مصرف سوخت به مقدار بیش از ۲ درصد در هر سیکل کاری موتور می گردد.

۲.۴.۴ پمپ انژکتور با ماریپچ دوتایی

در طراحی ماریپچ دوتایی برای پمپ انژکتور، یک ماریپچ در قسمت بالایی و دیگری در گوشه های پایینی پلانجر ایجاد می گردد بگونه ای که درگاه خروجی پمپ نیز بهینه و کنترل شده و در نتیجه شروع تزریق در بارهای میانی به خوبی بهینه سازی می گردد. در شکل ۱۷ نمایی از پلانجر تک ماریپچ و دو ماریپچ نشان داده شده است.

شکل ماریپچ، بصورت تقریب خطی از نتایج بدست آمده سیستم تزریق سوخت الکترونیکی تولید گردیده است. همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است برای هر میلیمتر از جابجایی دندان کنترل سوخت، میل بادامک برای جابجایی 35° بیشتر، جهت بستن پورت طراحی گردیده است. با استفاده از پمپ دو ماریپچه بهینه سازی سوخت به مقدار ۱/۶ درصد در هر سیکل کاری بدست آمد.

بازه زمانی برگشت سرمایه در مورد استفاده از پمپ با سیستم تزریق سوخت الکترونیک در حدود ۱/۵ ماه در مقابل ۳ سال در سیستم قدیمی می باشد. علاوه بر این، این سیستم فاقد دیگر مزیت های سیستم تزریق سوخت الکترونیک می باشد.



شکل ۱۵: نمودار طرح کلی سیستم سوخت رسانی [۹]

جدول ۶: مقایسه بین پارامترها در شرایط بحرانی کارکرد موتور در سه مرحله [۲]

مرحله سوم	مرحله دوم	مرحله اول	پارامترهای کاری موتور
۳۶۰۰ HP	۳۱۰۰ HP	(۲۶۰۰ FE)	
۱۸۷۰	۱۸۵۰	۱۹۰۰	فشار پیک احتراق (psi)
۵۲۵	۵۰۹	۵۰۰	دمای دود آگزوز ($^{\circ}C$)
۲/۲	۲	۱/۶	فشار بوست (bar)
۱۷/۵	۱۵/۷	۱۴/۷	BMEP (bar)
۱۰۴۰	۱۰۱۰	۹۵۰	فشار تزریق سوخت (bar)
۱۰۵۰	۱۰۵۰	۱۰۰۰	دور موتور (rpm)
۱۵۲	۱۵۴	۱۶۶	مصرف سوخت ویژه در دنده ۸ (gm/bhp-hr)

۵ نتیجه گیری

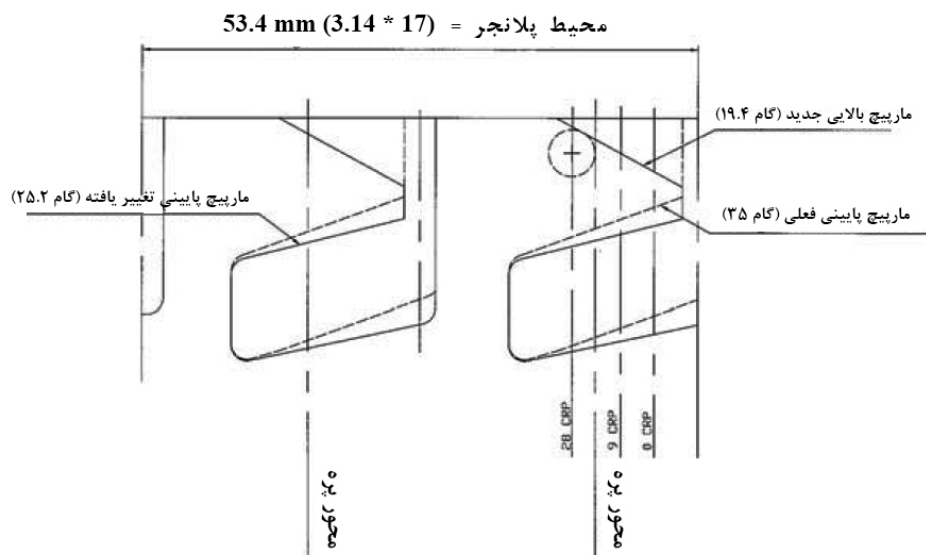
جهت بهینه‌سازی مصرف سوخت و افزایش توان، بدون اعمال تغییرات اساسی در شاکله موتور مراحل مختلفی انجام گردید. در مرحله اول اقدامات متعددی شامل تغییر در توربوشارژرها، خنک‌کن هوا، پمپ انژکتور، میل سوپاپ و ... در راستای کاهش مصرف سوخت و روغن صورت گرفت و کاهش مصرف سوخت ویژه به مقدار بیشتر از ۶ درصد و کاهش مقدار روغن مصرفی ۱۵ درصد گردید و همچنین مصرف سوخت در حالت تمام بار از ۱۶۶ گرم بر توان ترمزی بر ساعت به مقدار ۱۵۶ گرم بر توان ترمزی بر ساعت کاهش یافت. سپس در مرحله دوم، با استفاده از توربوشارژرهای با بازدهی بالا و همچنین استفاده از رینگ پیستون‌های با راندمان بالا توان موتور از ۲۶۰۰ اسب بخار به ۳۱۰۰ اسب بخار ارتقا یافت و مصرف سوخت به میزان ۸ درصد و مصرف روغن به میزان ۲۵ درصد کاهش یافت. در نهایت در مرحله سوم توان موتور به ۳۶۰۰ اسب بخار افزایش یافت و همچنین نسبت سوخت به روغن از ۱/۱۲ درصد به ۱ درصد کاهش یافت. تغییرات انجام گرفته بر روی موتور لکوموتیو با روش بهبود تکنولوژی و ارتقای سیستم‌ها موجب بهبود مقدار BSFC در مقابل افزایش توان هر سیلندر شده که به اختصار در شکل ۲۰ آمده است.



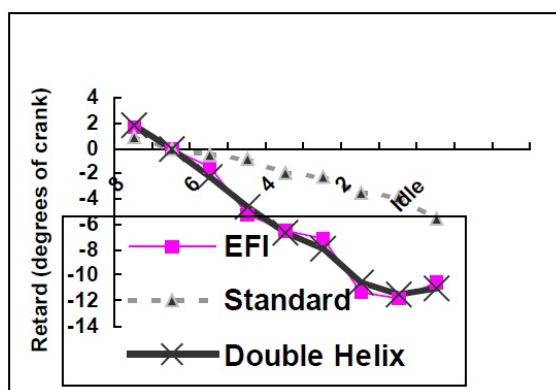
شکل ۱۶: پمپ انژکتور الکترونیکی [۴]



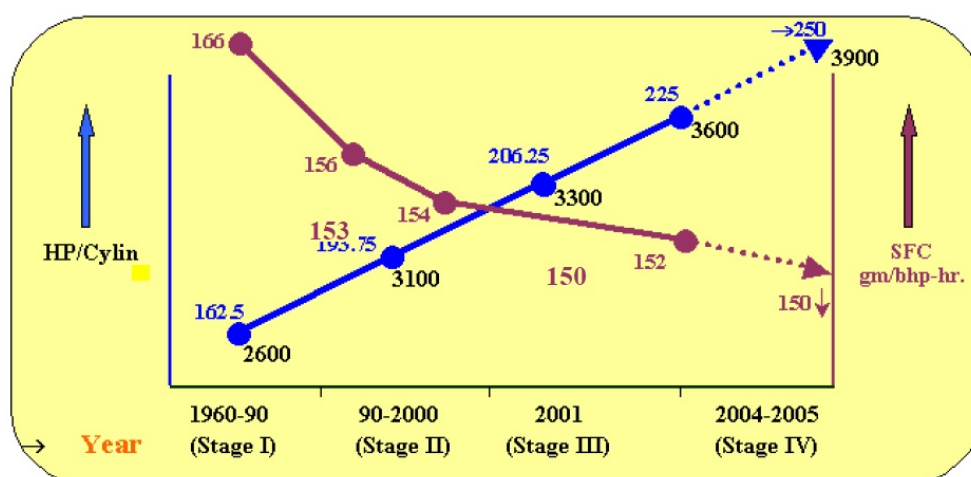
شکل ۱۷: پلنجر با دو مارپیچ و پلنجر تک مارپیچه [۴]



شکل ۱۸: ارتقای طراحی المان [۴]



شکل ۱۹: رویه بهینه‌سازی در تزریق سوخت [۴]



شکل ۲۰: مراحل بهبود در میزان BSFC در عوض افزایش مقدار توان به ازای هر سیلندر [۲]

[2] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals - United States: McGraw-Hill, 1988.

[1] A. J. Martyr, M. A. Plint, Engine Testing Theory and Practice, Second edition, England, Elsevier & Butterworth-Heinemann 1999.

[3] C. Bell, Maximum boost: designing, testing and installing turbocharger systems, USA, Bentley publisher 1997.

- [4] L. House, J. Hill, Diesel Engine Reference Book, Second edition, England, WIP 9HE, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [5] H. Yamagata, The science and technology of materials in automotive engines, England, Woodhead, 2005.
- [6] A. K. Agarwal, A. Gautam, Evaluation of Steel Cap Piston for Upgradation of Diesel Electric Locomotives for Indian Railways, 2004.
- [7] S. D. Mane¹, Technologies adopted in Diesel Locomotive Engines over Indian Railways, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, www.iosrjournals.org, 2005.
- [8] H. Hiereth, P. Prenninger, Charging the Internal Combustion Engine Powertrain, Wien, Springer 2003.
- [9] A. K. Agarwal, A. Gautam, Development of EFI for 4-stroke locomotive diesel engine of Indian railway, 2005.