بررسی موتورها و سیستم‌های انتقال قدرت در قطارهای واحد چندگانهٔ دیزل تولیدشده در اروپا

حسین محمدطاهری[۱]، شریف قریب[۲]، جواد زارع[۳]

۱ کارشناس، دفتر مهندسی و نظارت ناوگان، راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، تهران، taheri_ho@rai.ir

۲ کارشناس، دفتر مهندسی و نظارت ناوگان، راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، تهران

۳ دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیده

با توجه به پیشرفت‌های اخیر صنعت ریلی و گسترش استفاده از حمل‌ونقل ریلی در مسافت‌های کوتاه، بررسی قطارهای DMU (واحد چندگانه دیزل) و اطلاع از سیستم‌های مختلف تولید توان و انتقال آن در این قطارها ضروری می‌باشد. در پژوهش حاضر، انواع قطارهای DMU، برمبنای سیستم انتقال قدرت کوپل‌شده با موتور، تقسیم‌بندی و بررسی شده، مزایا و معایب هر یک تشریح شده است. مقایسهٔ سیستم‌های دیزل الکتریک، دیزل مکانیک، دیزل هیدرولیک و دیزل هیدرومکانیک، به‌عنوان چهار دستهٔ کلی نحوهٔ کوپلینگ سیستم انتقال قدرت با موتور نشان می‌دهد که صرفه‌جویی بیشتر در مقدار مصرف انرژی سیستم دیزل مکانیک و دیزل هیدرومکانیک نسبت به دیزل هیدرولیک و دیزل الکتریک ناشی از بهره‌وری بالاتر و کاهش تلفات در سیستم انتقال قدرت آنهاست. همچنین، از بعد اقتصادی هزینه‌های ثابت سیستم دیزل مکانیک ۳۳ درصد سیستم دیزل هیدرولیک و هزینهٔ چرخهٔ عمر در دیزل مکانیک کمتر یا برابر با دیزل هیدرولیک است. نهایتاً می‌توان جمع‌بندی نمود که سیستم‌های دیزل مکانیک و دیزل هیدرومکانیک از کارایی بیشتری نسبت به دو سیستم مورد مقایسه دیگر برخوردارند.

واژگان کلیدی

سیستم انتقال قدرت DMU، دیزل الکتریک، دیزل مکانیک، دیزل هیدرولیک، دیزل هیدرومکانیک

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت حمل‌ونقل ریلی پیشرفت‌های چشمگیری داشته است و روش‌های جدید حمل‌ونقل مسافران وارد ناوگان ریلی کشورهای مختلف شده است. این مسئله باعث ایجاد رقابت شدید بین شرکت‌های سازندهٔ واگن مسافری شده است. عموماً وسائل حمل‌ونقل ریلی، که وظیفهٔ انتقال مسافران را برعهده دارند، باید از نظر قابلیت اطمینان، تأمین امنیت مسافر، راحتی و در عین حال قیمت پایین در حد مطلوب باشند. واحدهای چندگانه دیزل[۱] قطارهایی هستند که بدون نیاز به لکوموتیو

می‌توانند حرکت کنند و یا به‌عبارت دیگر هر یک از سالن‌های قطار مجهز به دیزل بوده و نیروی محرکهٔ لازم جهت حرکت قطار را تأمین می‌کنند. از جمله ویژگی‌های DMU سرعت بیشتر، امنیت بالاتر، مصرف سوخت کمتر و قابل استفاده برای مسافت‌های کوتاه می‌باشد. این قطارها بسته به نوع سیستم انتقال قدرتی که با موتور کوپل شده، به چهار دسته کلی تقسیم می‌شوند [۱]:

۱. دیزل الکتریک[۲]: در این سیستم، انتقال قدرت از طریق تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی به‌وسیلهٔ ژنراتور و تبدیل مجدد از الکتریکی به مکانیکی در تراکشن موتور انجام می‌شود.
۲. دیزل مکانیک[۳]: در این سیستم، انتقال قدرت به‌صورت مکانیکی همانند کامیون‌ها بوده و توان موتور به‌وسیلهٔ کلاچ هیدرولیکی، جعبه‌دنده و میل گاردان به محور و چرخ‌ها منتقل می‌شود.
۳. دیزل هیدرولیک[۴]: این سیستم مشتمل بر دو نوع هیدرودینامیک و هیدروستاتیک بوده که در نوع اول سیستم انتقال قدرت از طریق مبدل گشتاور هیدرولیک، جعبه‌دنده و گاردان و در نوع دوم به‌وسیلهٔ هیدروپمپ، هیدروموتور و آکومولاتور هیدرولیکی انجام می‌شود.
۴. دیزل هیدرومکانیک[۵]: در این سیستم انتقال توان به‌صورت هیدرودینامیکی و مکانیکی به‌طور موازی انجام می‌گیرد.

در کشورهای اروپایی عموماً از دو مدل دیزل MAN و MTU در DMU ها استفاده شده که بسته به استفاده از هر کدام، سیستم انتقال قدرت متناسب کوپل می‌شود. سیستم انتقال قدرتی که معمولاً با موتور MAN کوپل‌شده ساخت شرکت VOITH بوده و برای موتور MTU سیستم انتقال قدرت ساخت شرکت ZF ترجیح داده می‌شود. در جدول ۱ مقایسهٔ کلی روی پارامترهای مکانیکی انتقال قدرت بین تعدادی از شرکت‌های سازندهٔ DMU شده است که هر یک از آنها ترکیب متفاوتی از موتور و سیستم انتقال قدرت را استفاده نموده‌اند.

۲. سیستم انتقال قدرت دیزل هیدرولیک

در این بخش به معرفی اجزاء و قطعات اصلی سیستم انتقال قدرت هیدرودینامیک ECOMAT که ساخت شرکت ZF آلمان بوده و در قطار کلاس ۱۷۲ توربو استار شرکت بومباردیر استفاده شده پرداخته می‌شود. وظیفهٔ اصلی جعبه‌دنده تبدیل مومنتوم چرخشی ایجادشده توسط موتور به سرعت و گشتاور مناسب جهت حرکت چرخ‌هاست. موتور احتراقی در اغلب حالات با سرعت بسیار بالا کار کرده که این مسئله در شروع، توقف و حرکت‌های آرام وسیلهٔ نقلیه پیامدهای منفی می‌گذارد. سیستم انتقال قدرت سرعت دورانی بالای موتور را به سرعت‌های آرام‌تر تبدیل کرده و برهمین اساس گشتاور لازم جهت حرکت وسیلهٔ نقلیه در مسیرهای مختلف اعم از شیب و فراز را تأمین می‌نماید. کارخانهٔ ZF سری جدیدی از سیستم‌های انتقال قدرت هیدرودینامیکی خود را تحت عنوان ECOMAT تولید نمود. جعبه‌دنده‌های سری ECOMAT در گریدهای مختلف ساخته شدند که مشخصات برخی از آنها در ذیل آمده است [۳]:

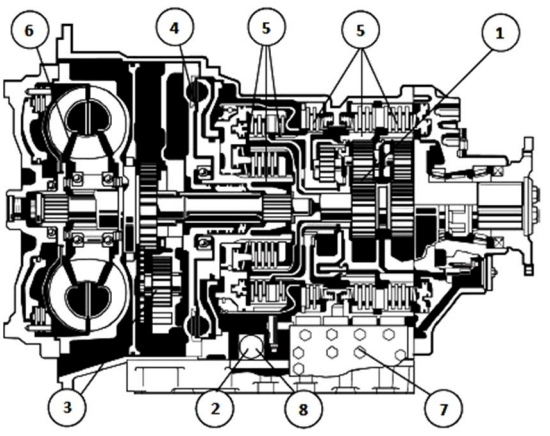
الف) 5HP-504/6HP-504: ۵ یا ۶ دنده و ماکزیمم گشتاور ورودی ۱۱۰۰ نیوتن متر

ب) 5HP-594/6HP-59: ۵ یا ۶ دنده و ماکزیمم گشتاور ورودی ۱۲۵۰ نیوتن متر

ج) 5HP-604/6HP-604: ۵ یا ۶ دنده و ماکزیمم گشتاور ورودی ۱۷۵۰ نیوتن متر

د) 5HP-902R: ۵ دنده و ماکزیمم گشتاور ورودی ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ نیوتن متر

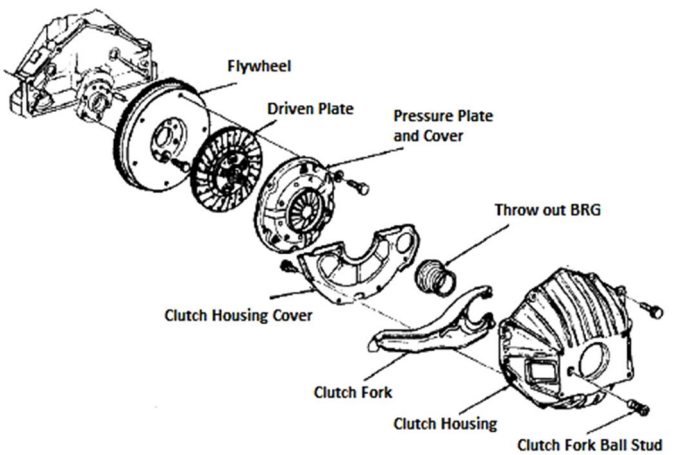
در شکل ۱ سیستم انتقال قدرت ZF-ECOMAT نشان داده شده و در جدول ۲ هر یک از قطعات نشان داده شده در شکل ۱ با ذکر نوع عملکردشان معرفی شده‌اند. گفتنی است اکثر جعبه‌دنده‌های اتوماتیک جدید دارای قطعات مشابه بوده و تنها تفاوت در شکل ظاهری آنها می‌باشد (بستگی به نوع آن دارد).



شکل ۱. شمای کلی سیستم انتقال قدرت ZF-ECOMAT [۱]

جدول۱. مقایسهٔ پارامترهای مکانیکی سیستم‌های انتقال قدرت بین تعدادی از شرکت‌های سازندهٔ DMU [۲]

نوع سیستم انتقال قدرت و شرکت سازنده DMU	نوع موتور	توان خروجی موتور (kw)، سایر مشخصات	حداکثر دور موتور (rpm)	نوع سیستم انتقال قدرت	حداکثر توان ورودی سیستم انتقال قدرت (kw)
هیدرودینامیکی DB Class 628 آلمانی	MAN D3256 BTXU	۲۱۰ ۴ زمانه، ۶ سیلندر خطی	۲۱۰۰	VOITH T320r آلمانی	۲۰۲
هیدرودینامیکی Class 2900 ایرلندی	MAN D2876	۲۹۴ حجم موتور ۱۲/۸ لیتر، ۶ سیلندر خطی	–	VOITH T211re.3 آلمانی	۳۱۰
هیدرودینامیکی CAF Beasin اسپانیایی	MAN D2876 LUH03	۳۳۸ حجم موتور ۱۲/۸ لیتر، ۶ سیلندر خطی	–	VOITH T211re.3 آلمانی	۳۱۰
هیدرودینامیکی Turbostar train Bombardier انگلیسی	MTU	–	–	Hydrodynamic VOITH Final drive ZF با	–
هیدرودینامیکی Class 22000 ایرلندی	MTU 6H1800R83P	۳۶۰	–	VOITH T312bre آلمانی	۶۵۰
هیدرومکانیکی NEWAG S.A 220M لهستانی	MTU 6H1800R85L	۳۹۰	۱۸۰۰	ZF-Ecolife آلمانی	–
هیدرودینامیکی NEWAG S.A 221M لهستانی	MTU 6H1800R84	۳۹۰	۱۸۰۰	Hydrodynamic transmission of ZF آلمانی	–
هیدرودینامیکی British Rail Class 168 clubman	MTU 6H1800R85L	۳۹۰	۱۸۰۰	VOITH T211r آلمانی با Final drive ZF	۳۵۰
هیدرودینامیکی ZF Suggestion	MTU 6H1800R84	۳۹۰	۱۸۰۰	ZF 5HP902R Ecomat آلمانی	گشتاور ورودی: ۱۶۰۰–۱۸۰۰ N.M
هیدرودینامیکی ZF Suggestion	MTU 6H1800R82	۳۳۵	۱۸۰۰	ZF 5HP902R Ecomat آلمانی	گشتاور ورودی: ۱۶۰۰–۱۸۰۰ N.M
هیدرودینامیکی Class 172 Turbostar Bombardier انگلیسی	MTU 6H1800R83	۳۶۰	۱۸۰۰	ZF 5HP902R Ecomat آلمانی با Final drive ZF	گشتاور ورودی: ۱۶۰۰–۱۸۰۰ N.M
هیدرومکانیکی Class 158 GB انگلیسی	Cummins NTA855R1	۲۶۱	۲۱۰۰	Voith T211 آلمانی	–



شکل۲. نقشهٔ انفجاری کلاچ [۱]

جدول۲. قطعات سیستم انتقال قدرت اتوماتیک ZF-ECOMAT

شماره	قطعه	ساختار و وظیفه
۱	سیستم چرخدنده سیاره‌ای	تنظیم نسبت تبدیل‌های مختلف
۲	سیستم هیدرولیک	انتقال وروغن‌رسانی تحت فشار به ادوات سیستم انتقال قدرت
۳	پمپ روغن	پمپ با نیروی موتور حرکت کرده و سیال هیدرولیک را تحت فشار قرار و خنک‌کاری و روانکاری را انجام می‌دهد
۴	کاهنده	نوعی ترمز غیر سایشی
۵	کلاچ و ترمز	امکان تغییر دنده بدون قطع نیروی محرکه
۶	مبدل گشتاور	انتقال سرعت و گشتاور و همچنین اجازه کارکردن موتور در سرعت‌های پایین را می‌دهد
۷	واحد کنترل سیستم انتقال قدرت	کنترل نوع دنده
۸	روغن روانکار و هیدرولیک	روانکاری سیستم به منظور جلوگیری از خوردگی

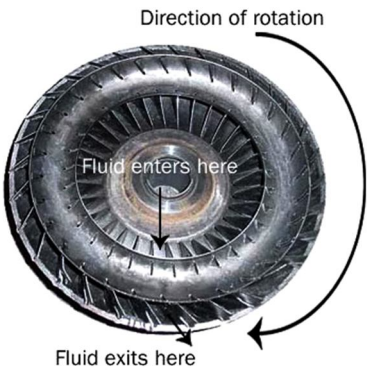
۲-۱. کلاچ

کلاچ وسیله‌ای کاملاً مکانیکی است و وظیفهٔ آن ایجاد ارتباط تدریجی و آرام بین دو قطعهٔ هم‌محور و چرخان با سرعت‌های متفاوت می‌باشد. اغلب کلاچ‌ها از چند دیسک اصطکاکی تشکیل شده که روی صفحه کلاچ به هم پرس شده‌اند. کلاچ‌های اصطکاکی مشتمل بر دو نوع صفحه کلاچ خشک و صفحه کلاچ تر بوده که در نوع دوم عملکرد حرارتی بهتر و تلفات دراگ بدتری دارد. کلاچ توانایی اتصال دو شفت به یکدیگر را داشته که شفت‌ها می‌توانند همزمان با هم قفل شده، یا با سرعت یکسان گردش کرده یا به‌صورت جدا از هم در سرعت‌های متفاوت چرخش داشته باشند. کارکرد کلاچ به این صورت است که نیروی فشاری ایجادشدهٔ فلایویل، صفحه فشار و صفحه رانده شده را در شرایط معمول چرخش به هم متصل می‌کند. کلاچ توسط یک عملگر هیدرولیکی یا مکانیکی آزاد شده و با بیرون آوردن بیرینگ، نیرویی به مرکز صفحه فشار وارد آورده و فشار را از روی پیرامون صفحه کلاچ آزاد می‌نماید. درگیری و آزادسازی صفحه کلاچ توسط پدال با یک واحد کنترل اتوماتیک انجام می‌شود. معمولاً از یک سیستم فنر و دمپر به منظور کاهش ارتعاشات در سیستم نیروی محرکه استفاده می‌شود.

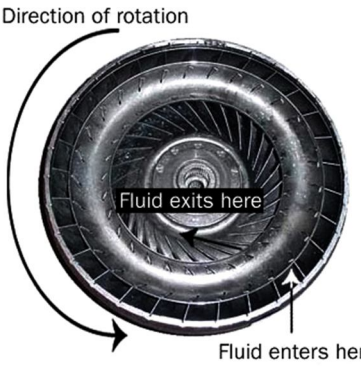
۲-۲. مبدل گشتاور

ساختار مبدل گشتاور شبیه جعبه‌دنده بوده و وظیفهٔ انتقال توان را برعهده دارد. همچنین به‌کمک مبدل گشتاور موتور توانایی کار کردن در دور پایین را داشته و زمان توقف وسیلهٔ نقلیه می‌تواند بدون استفاده از کلاچ با دور پایین روشن بماند. ساختار داخلی مبدل گشتاور از یک کوپلینگ هیدرولیکی تشکیل شده که نه تنها سبب افزایش عمر جعبه‌دنده شده، که تلفات اصطکاکی را با تبدیل آن به حرارت کاهش می‌دهد. این وسیله از سه قطعه چرخان تشکیل شده است: ایمپلر[۶] (پمپ)، چرخ توربین و استاتور (شکل ۶). گشتاور موتور از طریق لینکی متشکل از صفحات انعطاف‌پذیر و فنر و دمپر به مبدل منتقل می‌شود. سیستم کاری به این صورت است که پمپ درون یک مبدل گشتاور یک نوع پمپ گریز از مرکز (پمپ سانتریفیوژ) است. همچنان‌که مبدل می چرخد، سیال به بیرون پرتاب می شود، تقریباً مانند چرخش دورانی یک ماشین لباس‌شویی،که آب و لباس‌ها را به طرف بیرون جدارهٔ ماشین لباس‌شویی پرتاب می‌کند. در صورتی که سیال به بیرون پرتاب شود، خلأ ایجاد می‌شود که سیال بیشتری را به مرکز می‌کشد [۴]. سپس سیال وارد تیغه‌های توربین، که به جعبه‌دنده متصل است، می‌شود. توربین باعث چرخش جعبه‌دنده شده که به‌طور اساسی وسیلهٔ نقلیه را حرکت می‌دهد. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که تیغه‌های توربین کج هستند. این بدان معناست که سیالی که از بیرون توربین (پمپ) به آن وارد می شود، قبل از خارج‌شدن آن از مرکز توربین، یک تغییر مسیر دارد. این تغییر مسیر باعث چرخش توربین می‌گردد. برای تغییر مسیر صحیح یک شئ متحرک، باید نیرویی به آن اعمال شود. مهم نیست که شئ یک خودرو بوده و یا یک قطره سیال. هر نیرویی که باعث تغییر مسیر شئ شود،

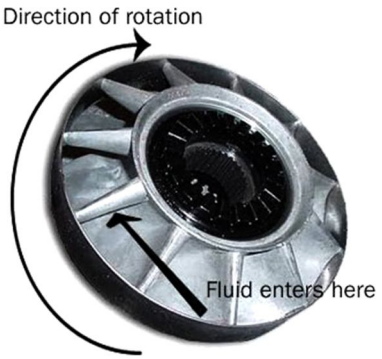
عکس‌العملی دارد که سبب تغییر مسیر منشأ نیرو خواهد شد. لذا توربین باعث تغییر مسیر سیال شده، و سیال باعث چرخش توربین می‌شود. سیالی که از مرکز توربین خارج می‌شود، در یک مسیر متفاوت نسبت به زمانی که وارد شده بود، حرکت می‌کند. اگر به پیکان‌های شکل ۴ دقت شود، می‌توان مشاهده نمود که سیالی که از توربین متحرک خارج شده در خلاف جهتی است که پمپ (و موتور) می‌چرخند. اگر سیال اجازه داشته باشد به پمپ ضربه بزند، باعث اتلاف نیرو و کند کارکردن موتور خواهد شد. این دلیلی است که مبدل گشتاور یک استاتور دارد. استاتور در مرکز مبدل قرار داشته و وظیفهٔ آن هدایت دوبارهٔ سیال خروجی از توربین است قبل از اینکه به پمپ ضربه بزند. این مسئله به‌طور چشمگیری بازده مبدل گشتاور را افزایش می‌دهد.



شکل۳. پمپ (ایمپلر) داخل مبدل گشتاور [۳]

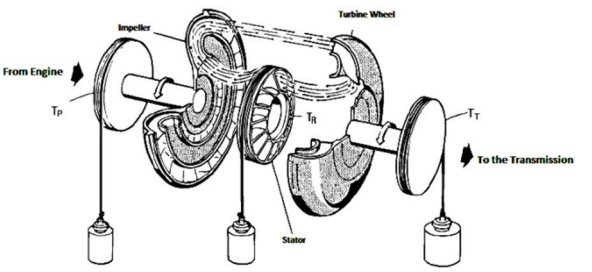


شکل٤. توربین داخل مبدل گشتاور [۳]



شکل٥. استاتور داخل مبدل گشتاور [۳]

استاتور سیال بازگشتی از توربین را به پمپ می‌فرستد. این بازده مبدل گشتاور را بهبود می‌بخشد. هزارخار استاتور به یک کلاچ یک‌طرفه متصل است استاتور یک تیغهٔ طراحی شده تهاجمی داشته که مسیر سیال را تقریباً به‌طور کامل وارونه می‌کند. یک کلاچ یک‌طرفه (داخل استاتور) استاتور را به یک شافت ثابت در جعبه‌دنده ارتباط می‌دهد (مسیری که کلاچ اجازه دارد گردش کند در شکل ۵ ملاحظه می‌شود). به‌خاطر این طرح، وقتی سیال به پره‌های استاتور برخورد می‌کند استاتور نمی‌تواند با نیروی سیال برای تغییر مسیر، بچرخد و فقط می‌تواند در جهت مخالف بچرخد. اثر ضرب گشتاور ایجادشده برای به حرکت درآوردن توربین به نوع طراحی پره‌ها و همچنین ویسکوزیتهٔ روغن بستگی دارد.

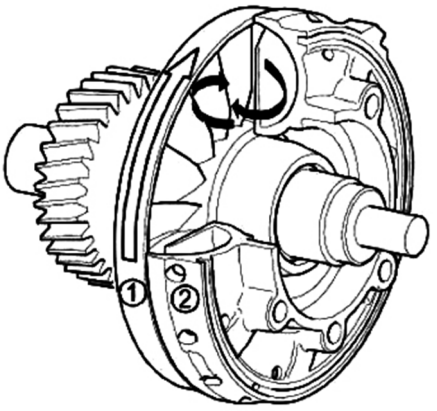


شکل٦. شمای کلی یک مبدل گشتاور [٥]

۲-۳. کاهنده

سیستم کاهنده همان ترمز کمکی غیرسایشی است که باعث افزایش یا جایگزینی برخی از عملکردهای سیستم ترمز اولیه می‌شود. این وسیله به‌نوعی یک کوپلینگ هیدرولیکی بوده و شبیه یک مبدل گشتاور معکوس عمل می‌کند. قطعات آن شامل مجموعهٔ روتور و استاتور بوده که در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانند آنچه در مبدل گشتاور اتفاق می‌افتد، سیال موجود در کاهنده بین روتور و استاتور پرتاب شده و همین امر سبب تغییر گشتاور می‌گردد. کاهنده تحت شرایط ترمزگیری مداوم بار حرارتی روی ترمز چرخ‌ها را کاهش می‌دهد (شبیه ترمز دینامیکی قطار). کاهنده سرعت هم به‌صورت هیدرودینامیکی و هم به‌صورت الکترودینامیکی بوده و قابلیت نصب در سمت ورودی (به‌عنوان کاهنده اولیه) یا سمت خروجی (به‌عنوان کاهنده ثانویه) را دارد. کاهندهٔ اولیه را می‌توان به‌عنوان یک واحد یکپارچه در سیستم‌های انتقال قدرت تک‌مداره که مناسب برای ابعاد محدود و وزن کم بوده نصب کرد. کاهنده‌های اولیه را می‌توان در اتوبوس‌های حمل‌ونقل عمومی، که دارای سرعت پایین و ویژگی‌های طراحی خاص بوده، استفاده نمود؛ در حالی‌که سیستم‌های کاهندهٔ ثانویه بیشتر برای استفاده در وسائل نقلیهٔ سنگین، که مسافت‌های

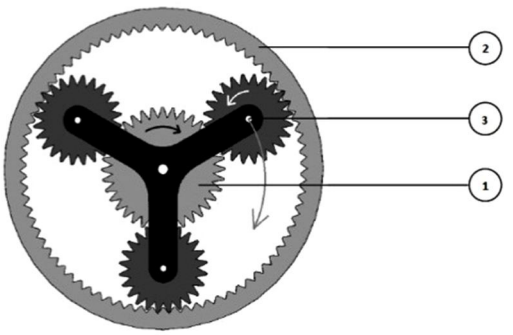
طولانی را طی کرده، جهت تنظیم ترمزگیری در سرعت‌های بالا یا شیب‌روی، مناسب‌اند [۶].



شکل۷. کاهنده، ۱) روتور و ۲) استاتور [۱]

۲-٤. سیستم چرخ‌دندهٔ سیاره‌ای

طرح‌بندی چرخ‌دندهٔ سیاره‌ای جهت استفاده با مجموعهٔ کلاچ یا ترمز اصطکاکی بسیار مناسب است. درگیری دنده‌ها با تغییر در نسبت دنده و بدون قطع گشتاور می‌تواند تغییر نماید. جهت دستیابی به نسبت‌های تبدیل بالاتر، تعداد چرخ‌دندهٔ سیاره‌ای بیشتری می‌توان به مجموعه افزود (شکل ۸).



شکل۸. سیستم چرخ‌دندهٔ سیاره‌ای، ۱) چرخ‌دندهٔ خورشیدی ۲) رینگی، ۳) چرخ‌دندهٔ سیاره‌ای با کریر [۱]

۳. سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیکی

در سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیک میل گاردان از طریق کوپلینگ هیدرولیکی[۷] به موتور متصل می‌شود. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، اساس کار مبدل گشتاور و کوپلینگ هیدرولیکی شبیه هم بوده و هر دو گشتاور موتور را به جعبه‌دنده منتقل می‌کنند با این تفاوت که مبدل گشتاور قادر به افزایش گشتاور موتور بوده، در حالی‌که کوپلینگ هیدرولیکی این توانایی را دارا نمی‌باشد. در شکل ۹ تصویری از سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیک نمایش داده شده است. قطعات اصلی این سیستم شامل کلاچ هیدرولیکی، میل گاردان، جعبه‌دنده و چرخ‌دندهٔ انتهایی می‌باشد.

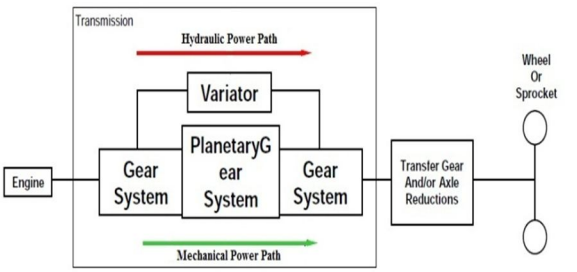
۳-۱. کلاچ هیدرولیکی

کلاچ هیدرولیکی یک کوپلینگ هیدرولیکی شامل یک پمپ (ایمپلر) و یک توربین با پره‌های داخلی بوده که روبروی هم قرار گرفته‌اند. پمپ به‌وسیلهٔ یک صفحه به فلایویل موتور متصل بوده و توربین نیز به شافت ورودی جعبه‌دنده متصل می‌شود. پمپ عضو محرک و توربین عضو متحرک است. پمپ و توربین هر دو در یک محفظهٔ آب‌بندی‌شده قرار دارند. روغن توسط پمپ داخل جعبه‌دنده به داخل محفظهٔ کوپلینگ ارسال می‌گردد. وقتی ایمپلر به‌وسیلهٔ موتور می‌چرخد، پره‌هایش روغن را گرفته و به‌سوی توربین پمپ می‌کند. سیال در داخل کوپلینگ دو مسیر را طی می‌کند: جریان گردابی و جریان دورانی. جریان دورانی سیال، مسیر دایره‌ای است که در نتیجه چرخش ایمپلر ایجاد می‌شود. به‌عبارت دیگر سیال حول دایره‌ای که محور آن میل لنگ و محور ورودی جعبه‌دنده بکس است جریان می‌یابد. از طرفی وقتی سیال در مسیر دایره‌ای حرکت می کند، نیروی گریز از مرکز آن را به‌سوی کناره‌های ایمپلر پرتاب می کند. به‌خاطر انحنای ایمپلر، وقتی سیال به کناره‌های خروجی آن می‌رسد به دور خود چرخیده و به‌سوی توربین جاری می‌شود. سپس سیال در یک مسیر چرخشی ثانویه که با مسیر جریان دورانی اولیه زاویهٔ ۹۰ درجه ساخته جاری می‌شود. جریان روغن در این مسیر را جریان گردابی می‌نامند. سیال در کوپلینگ هیدرولیکی به‌طور همزمان هر دو مسیر دورانی و گردابی را می‌پیماید. جریان دورانی که به‌وسیلهٔ ایمپلر ایجادشده گشتاور چرخشی موتور را حمل می‌کند. گشتاور بدون جریان گردابی که سیال را از ایمپلر تا توربین حرکت می‌دهد نمی‌تواند به جعبه‌دنده منتقل شود. نیروی چرخشی پره‌های ایمپلر به‌صورت ترکیبی از جریان‌های گردابی و چرخشی سیال بر روی پره‌های توربین اعمال می‌شود. سیالی که ایمپلر در حال چرخش را ترک کرده و به‌سوی توربین جاری شده، هنگام خروج تنها دارای حرکت گردابی و یا دورانی نبوده و ترکیبی از هر دو حرکت می‌دارد. مسیر جریان‌های ترکیب‌شده یک نیروی برایند تولید کرده که از ایمپلر تحت زاویهٔ خاصی به‌سوی توربین خارج

می‌شوند. وقتی نیروی سیال پرتاب‌شده به‌سوی توربین به‌قدر کافی باشد، توربین چرخیده و شافت ورودی جعبه‌دنده را می‌گرداند.

٤. سیستم انتقال قدرت دیزل هیدرومکانیکی

در این سیستم انتقال توان به‌صورت هیدرولیکی و مکانیکی به‌طور موازی انجام می‌گیرد (شکل ۱۰). به‌واسطهٔ نوع چیدمان قطعات مکانیکی و هیدرولیکی شتاب اولیه قطار توسط بخش هیدرولیکی تأمین شده و پس از آن با قفل‌شدن سیستم هیدرولیکی قسمت مکانیکی وظیفهٔ انتقال توان را برعهده می‌گیرد. شرکت ZF از این فناوری در ساخت سیستم انتقال قدرت Ecolife استفاده کرده است. در این محصول مصرف سوخت به اندازه ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به سیستم‌های انتقال قدرت هیدرودینامیکی بهینه شده است. همچنین هزینهٔ تمام‌شده به‌واسطهٔ استفادهٔ کمتر قطعات هیدرولیکی کاهش یافته است [۷].



شکل ۱۰. سیستم انتقال قدرت دیزل هیدرومکانیکی

در شکل ۱۰، مبدل[۸]، بخش هیدرولیکی سیستم بوده که وظیفهٔ تبدیل نسبت گشتاور و سرعت را به‌صورت پیوسته انجام می‌دهد. در این قسمت می‌توان از سیستم هیدروستاتیک یا هیدرودینامیک استفاده کرد. در بخش مکانیکی معمولاً از ترکیب‌های مختلف چرخدنده به‌همراه ترمز و کلاچ استفاده می‌شود. همچنین در این سیستم از ترمز هیدرودینامیکی استفاده شده که به مقدار زیادی سایش در ترمز مکانیکی قطار را کاهش می‌دهد.

۵. مقایسهٔ انواع سیستم‌های انتقال قدرت

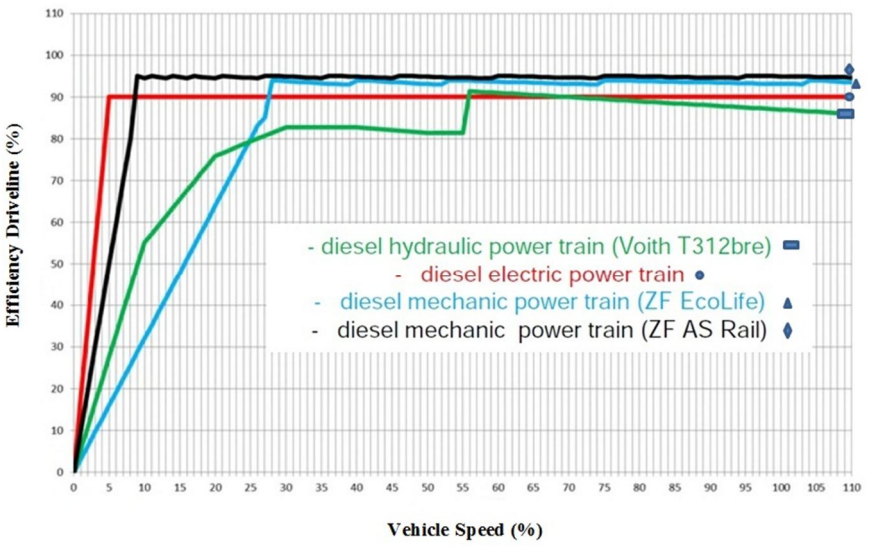
در سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیک میل‌گاردان از طریق کوپلینگ هیدرولیکی به موتور متصل می‌شود. اساس کار مبدل گشتاور و کوپلینگ هیدرولیکی شبیه هم بوده و هر دو گشتاور موتور را به جعبه‌دنده منتقل می‌کنند؛ با این تفاوت که مبدل گشتاور قادر به افزایش گشتاور موتور بوده در حالی‌که کوپلینگ هیدرولیکی این توانایی را ندارد. سیستم‌های انتقال قدرت الکتریکی و هیدرولیکی در صنعت ریلی مدرن بسیار پرکاربرد هستند. با این وجود، به تازگی پیشرفت‌های فنی در سیستم انتقال قدرت مکانیکی توجهات را به استفاده از این سیستم با هدف بهینه‌سازی نیروی کشش در آلات نقلیهٔ ریلی افزایش داده است. در نیمهٔ دوم قرن بیستم سیستم‌های انتقال قدرت دیزل الکتریک و دیزل هیدرولیک به‌طور گسترده جایگزین سیستم انتقال قدرت مکانیکی در آلات نقلیه ریلی شدند. اما با پیشرفت‌هایی که در صنعت چرخدنده و انتقال توان به وقوع پیوست، برخی از سازندگان صنعت ریلی[۹] به‌سبب ویژگی‌هایی چون هزینهٔ پایین‌تر، وزن کمتر و بازدهی بیشتر مجاب به استفاده مجدد از سیستم نیرو محرکه دیزل مکانیک شدند. دلائل هزینه و وزن پایین‌تر دیزل مکانیک نسبت به سایر سیستم‌ها عبارت‌اند از سادگی و وسعت کاربرد[۱۰]. با توجه به استفاده از این سیستم در صنعت حمل‌ونقل جاده‌ای (اتوبوس و کامیون)، می‌توان از راه حل‌های موجود در زمان‌هایی که نیاز به تعمیرات بود استفاده کرد. وزن کمتر سیستم دیزل مکانیک به‌خاطر وزن پایین چرخدنده‌های آن بوده و این ویژگی خصوصاً در مقایسه با سیستم دیزل الکتریک که در آن از موتور کشنده، اینورتر و ادوات دیگر استفاده شده بیشتر نمود پیدا می‌کند. در جدول ۳ معایب و مزایای سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیک نسبت به سایر سیستم‌ها بیان شده است. در شکل ۱۱ مقایسهٔ بین بازده انواع سیستم‌های انتقال قدرت بر حسب سرعت DMU نشان داده شده است. این مقایسه توسط شرکت MTU انجام شده که با نتایج به‌دست آمده برای قطار DSB ساخت شرکت آنسالدوبردا مطابقت دارد. در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران از سیستم‌های انتقال قدرت دیزل - مکانیک و دیزل - هیدرودینامیک به‌ترتیب در لوکوموتیو مانوری SECMAFER و ترن‌ست پردیس استفاده می‌شوند که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قطعات و نحوهٔ اتصال آنها روی دیزل و جعبه‌دنده نمایش داده شده است. در جدول ۴ مقایسهٔ بین بازده سیستم‌های انتقال قدرت مختلف آورده شده است.

جدول۳. معایب و مزایای سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیک نسبت به سایر سیستم‌ها [۸]

مزایا	معایب
صرفه‌جویی در مقدار مصرف انرژی نسبت به دیزل هیدرولیک و دیزل الکتریک ناشی از بهره‌وری بالاتر و کاهش تلفات در سیستم انتقال قدرت سریع‌تر بودن نرخ افزایش بازده در سرعت مشخص نسبت به سایر سیستم‌ها بالاتر بودن پتانسیل بهره‌وری انرژی به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به سایر سیستم‌ها قابلیت حفظ ماکزیمم توان خود در طول مسیر و در سرعت‌های مختلف که این پارامتر در سایر سیستم‌ها با کاهش سرعت به شدت کاهش می‌یابد در دیزل مکانیک‌های ۱۶ دنده‌ای معمولاً موتور در بالاترین نقطه از راندمان خود کار می‌کند وزن کمتر هزینه چرخه عمر کمتر یا برابر با سیستم دیزل هیدرولیک امکان دستیابی به سرعت‌های بالاتر موتور نسبت به سیستم دیزل هیدرولیک (در شرایطی که موتورها یکسان باشند)	پایین‌تر بودن گشتاور ورودی در شروع حرکت به منظور شتاب‌گیری نسبت به دیزل هیدرولیک قابلیت اطمینان پایین‌تر با توجه به استهلاک بالاتر قطعات هزینه تعمیرات و نگهداری بالاتر محدودیت جانمایی قطعات پاورپک روی سقف قطار پایین‌تر بودن ماکزیمم توان ترمز هیدرودینامیکی نسبت به سیستم دیزل هیدرولیک (حدود ۱۰۰ کیلووات کمتر) پایین‌تر بودن پتانسیل بازیابی انرژی در موقع ترمزگیری نسبت به سایر سیستم‌ها

جدول٤. مقایسه بین راندمان سیستم‌های مختلف انتقال قدرت در قطارهای DMU [۹]

	دیزل مکانیک (ماکزیمم)	دیزل الکتریک (ماکزیمم)	دیزل هیدرولیک (ماکزیمم)	دیزل هیدرومکانیک (ماکزیمم)
راندمان موتور	برابر	برابر	برابر	برابر
راندمان سیستم انتقال قدرت	٪ ۹۵	٪ ۹۰	٪ ۸۵–۹۰	٪ ۹۵
امکان دستیابی به ماکزیمم گشتاور موتور	بالا	بالا	پایین	بالا
ماکزیمم توان خروجی موتور براساس مدارک مشاهده‌شده	۶۲۵ کیلووات	نا مشخص	۶۲۵ کیلووات	۵۶۰ کیلووات

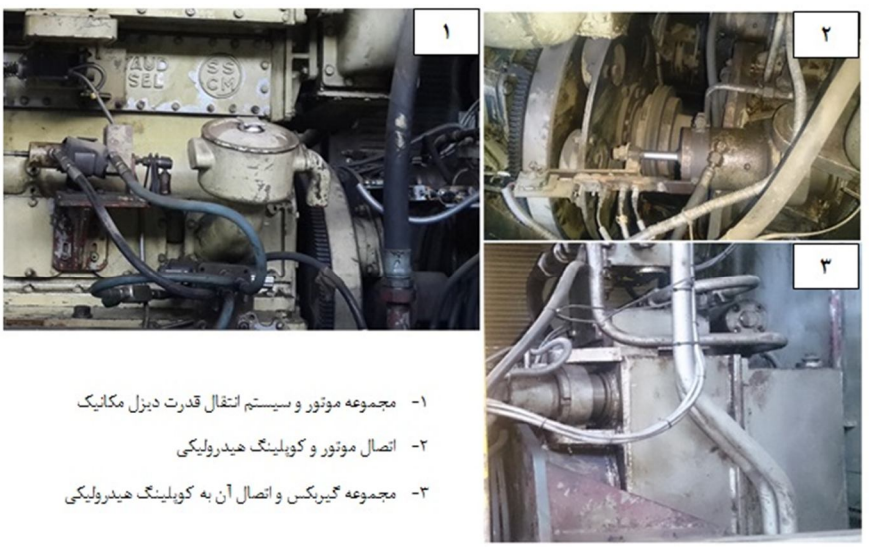


شکل ۱۱. مقایسهٔ بین بازده انواع سیستم‌های انتقال قدرت بر حسب سرعت [۹]

٦. نتیجه‌گیری

اهمیت قطارهای DMU و مزایای آن جهت استفاده در حمل‌ونقل مسافر در مسافت‌های کوتاه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. سیستم‌های دیزل مکانیک، دیزل الکتریک، دیزل هیدرولیک و دیزل هیدرومکانیک به‌عنوان چهار دستهٔ اصلی سیستم‌های موجود کوپلینگ مابین موتور و سیستم انتقال قدرت معرفی و مقایسه

گردید. مشخص شد که سیستم دیزل مکانیک با وجود پاره‌ای از معایب از جمله قابلیت اطمینان پایین، هزینه‌های ناشی از تعمیرات و نگه‌داری و همچنین برخی محدودیت‌ها در جانمایی قطعات، دارای بازده موتور بالاتر، بازده سیستم انتقال قدرت بالا (۹۵ درصد) و همچنین امکان دست‌یابی به ماکزیمم گشتاور موتور بالا می‌باشد. از بعد اقتصادی نیز، هزینه‌های ثابت سیستم دیزل مکانیک و همچنین هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی نسبت به سایر سیستم‌ها کمتر می‌باشد. همچنین سیستم دیزل هیدرومکانیک نیز نسبت به سیستم‌های دیزل الکتریک و دیزل هیدرولیک دارای بازدهی بالاتر (۹۵ درصد) و هزینه‌های پایین‌تری می‌باشد. نهایتاً جمع‌بندی مطالب ارائه‌شده نشان‌دهندهٔ برتری عملکرد سیستم دیزل مکانیک و دیزل هیدرومکانیک نسبت به سایر سیستم‌های ارائه‌شده می‌باشد. در نتیجه، شاهد تغییر رویکرد شرکت‌های سازنده سیستم‌های انتقال قدرت DMU به‌سمت سیستم‌های دیزل مکانیک و دیزل هیدرومکانیک می‌باشیم. همچنین می‌توان بیان کرد که با توجه به اینکه عمده سازندگان قطارهای DMU جزء کشورهای اروپایی بوده و سایر کشورها عمدتاً مصرف‌کننده می‌باشند، این تغییر رویکرد قابل تعمیم به تمامی کشورهای استفاده‌کننده می‌باشد. به‌صورت ویژه می‌توان از پیشنهاد اتحادی بین‌المللی راه‌آهن‌ها جهت استفاده از سیستم‌های ذکرشده نام برد. تعدادی از انواع سیستم‌های انتقال قدرت استفاده شده در قطارهای خودکشش و کشورهای سازنده نیز در جدول ۱ ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به کشورهای آلمان، انگلیس، لهستان و ایرلند اشاره کرد. همان‌گونه که بیان شد شاهد استفاده از سیستم هیدرومکانیک توسط شرکت لهستانی NEWAG و شرکت انگلیسی GB می‌باشیم.



۱- مجموعه موتور و سیستم انتقال قدرت دیزل مکانیک
۲- اتصال موتور و کوپلینگ هیدرولیکی
۳- مجموعه گیربکس و اتصال آن به کوپلینگ هیدرولیکی

شکل ۱۲. مجموعهٔ سیستم انتقال قدرت دیزل – مکانیک در لوکوموتیو مانوری SECMAFER

۱- مجموعه مبدل گشتاور، میل گاردان و گیربکس روی محور در سیستم انتقال قدرت دیزل هیدرولیک
۲- اتصال میل گاردان به مبدل گشتاور
۳- اتصال مبدل گشتاور Voith به موتور دیزل

شکل ۱۳. مجموعه سیستم انتقال قدرت دیزل– هیدرودینامیک در ترن‌ست پردیس

۷. مآخذ

[1] S. Enocksson, modeling in math works simscape by building a model of an automatic gearbox, Uppsala University, 2011.

[2] S. Kowalski, directionsfor modernization and construction of contemporary rail vehicles, technical transactions mechanics, 2014.

[3] Hydrodynamics in Drive Technology, VOITH Power Transmission.

[4] Mohd Anees Siddiqui, Application of hydraulic based transmission system in Indian locomotives-A review, integral university Lucknow.

[5] VOITH Company, Hydrodynamic in drive technology, 2008.

[6] Paul S. Fancher, James Oday, Howard Bunch, Michael Sayers and Retarders for heavy vehicles: evaluation of performance characteristics and in service cost, 1981.

[7] Karl Pettersson, Design Automation of Complex Hydro mechanical Transmissions, 2013.

[8] .MTU company, Power pack comparison-diesel hydraulic power packs vs diesel mechanic power packs, Heimpel, 2016.

[9] Ricardo, *GB rail powertrain efficiency improvements*, 2012.

پی‌نوشت

1. Disel Multiple Units
2. DEMU
3. DMMU
4. DHMU
5. DHMMU
6. Impeller
7. Hydraulic Coupling
8. Variator
9. Ansaldo Breda (IC4 for DSB)
10. Off-The-Shelf