

# امکان‌سنجی هیبرید فلاپویلی کردن اتوبوس‌های تندروی تهران

حسن قنبری قجرلو<sup>۱</sup>، مسعود مسیح طهرانی<sup>۲</sup>

۱ کارشناس ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲ استادیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، [masih@iust.ac.ir](mailto:masih@iust.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۲

## چکیده

در این مقاله امکان‌سنجی هیبرید فلاپویلی کردن اتوبوس‌های تندروی تهران مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، نخست به بررسی انواع اتوبوس‌های درون‌شهری پرداخته و سیکل کاری آنها ارزیابی می‌شود. سپس نزدیکترین سیکل برای اتوبوس تندرو در مسیر مشخصی از شهر تهران انتخاب می‌گردد. در ادامه، انواع سیستم انتقال قدرت و نحوه انتخاب آن برای اتوبوس هیبرید فلاپویلی معرفی می‌شود. یکی از اجزای بسیار مهم و در دست بررسی این اتوبوس‌ها، فلاپویل آنهاست؛ در این مقاله انواع فلاپویل‌ها بررسی شده است. میزان توان مورد نیاز فلاپویل سرعت بالا باید با توجه به کاربرد آن مشخص گردد. در اینجا محاسبات توان با توجه به سیکل رانندگی اتوبوس تندرو مشخص شده است. یکی دیگر از مسائل بسیار مهم روش انتقال و یکنواخت‌سازی انتقال قدرت از فلاپویل به سیستم و بالعکس است که به بررسی دو نمونه از پرکاربردترین آنها پرداخته شده است. بهترین نوع انتقال قدرت از لحاظ قیمت، کاربرد و دسترسی برای اتوبوس تندرو تهران انتخاب شده است. استفاده از یک سیستم هیبرید سبب کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی می‌شود؛ این امر امکان کوچکتر شدن موتور خودرو را نیز فراهم می‌کند. با توجه به شرایط شهر تهران و عملکرد مورد انتظار از اتوبوس به محاسبه توان مورد نیاز موتور و مقایسه آن با حالت قبل پرداخته شده است. امروزه استفاده از سیستم هیبرید الکتریکی رایج‌ترین نوع هیبرید است، بنابراین برای پاسخ به اینکه آیا استفاده از فلاپویل به جای هیبرید الکتریکی مقرون به صرفه است یا نه، مقایسه‌ای بین این دو نوع سیستم از لحاظ قیمت، بازده انرژی، وزن و حجم انجام شده است.

**واژگان کلیدی:** سیکل رانندگی اتوبوس تندرو، خودرو هیبرید فلاپویلی، فلاپویل سرعت‌بالا، سامانه اتوبوس تندرو، سیستم انتقال قدرت هیبرید

## ۱. مقدمه

امروزه رشد سریع جمعیت و در پی آن افزایش وسائل نقلیه سبب آلودگی هوا شده است. آلودگی‌های ناشی از وسائل نقلیه را می‌توان با راهکارهای مناسب از جمله اصلاح قوای محرکه وسائل نقلیه کاهش داد. با اصلاح وسائل نقلیه هم آلودگی هوا

هم مصرف سوخت کاهش می‌یابد. بسیاری از مراکز علمی تمرکز خود را بر اصلاح و ساخت وسائل نقلیه با مصرف سوخت و تولید آلودگی کمتر قرار داده‌اند. یکی از مهم‌ترین وسائل نقلیه در شهرهای بزرگ اتوبوس‌های شهری است. اتوبوس‌ها به چندین نوع مختلف تقسیم می‌شوند که یکی از پرکاربردترین و مقبول‌ترین آنها، اتوبوس‌های تندرو است. این اتوبوس‌ها دارای سیکل رانندگی مشخصی می‌باشند. با توجه به آمار سال ۱۳۹۳، تعداد اتوبوس‌های تندرو شهر تهران ۱۵۱۶ دستگاه بوده است. همچنین ۱۰ خط اتوبوس تندرو مختلف وجود دارد. این اتوبوس‌ها، با مصرف روزانه  $\frac{2}{8}$  میلیون لیتر گازوئیل، ۲ میلیون مسافر را جابه‌جا می‌کنند [۱]. اگر قیمت هر لیتر گازوئیل ۵۰۰ تومان باشد، با حسابی ساده، روزانه مبلغی بالغ بر یک میلیارد و ۴۰۰ میلیون تومان صرف هزینه سوخت اتوبوس‌های تندرو می‌شود. بنا بر گفته‌های شرکت فلائی‌بری<sup>۱</sup> یک اتوبوس هیبرید فلائیویلی تا ۳۵ درصد در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌نماید [۲]. با این حال اگر بدترین حالت ممکن طراحی و حداقل بازه ممکن را در نظر بگیریم و میزان صرفه‌جویی انرژی را برای اتوبوس فلائیویلی شهر تهران فقط ۱۵ درصد فرض کنیم، ۴۲۰ هزار لیتر گازوئیل در روز صرفه‌جویی می‌شود؛ یعنی مبلغی بالغ بر ۲۱۰ میلیون تومان صرفه‌جویی می‌گردد. هرچند مزایای دیگری چون کاهش آلودگی هوا را نیز در پی دارد. برای انجام پژوهش و بررسی دقیق‌تر در این پژوهش خط پنج<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مسیر ۹/۹ کیلومتری دارای ۱۰ ایستگاه و ۷۱ دستگاه اتوبوس است و روزانه ظرفیت جابه‌جایی ۷۰ هزار نفر را دارد [۱].

تاکنون یک اتوبوس هیبرید فلائیویلی برای شهر تهران طراحی نشده است. در این مقاله توضیحی جامع درباره اتوبوس فلائیویلی و مقایسه آن با هیبرید الکتریکی صورت می‌گیرد و امکان‌سنجی فنی و اقتصادی این طرح مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد. هیبرید کردن یک خودرو سبب بازیابی انرژی اتلافی خودرو می‌شود که مقدار زیادی از این اتلافات در اثر ترمزگیر روی می‌دهد [۳]. همچنین این امر باعث کاهش تولید آلایندگی و مصرف سوخت می‌گردد. استفاده از سیستم هیبرید الکتریکی در حال حاضر رایج‌ترین نوع هیبرید است که گران‌قیمت، سنگین و پیچیده است. عمر محدود باتری‌ها سبب زیاد شدن هزینه در هر دوره می‌شود [۴]. تبدیل انرژی از حالت

مکانیکی به الکتریکی و باز تبدیل انرژی الکتریکی به جنبشی باعث اتلاف زیاد انرژی می‌شود. نوع دیگری از هیبریدها، هیبرید هیدرولیک است. این سیستم نیز در بعضی از خودروهای سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. نوع دیگری از هیبریدهای مورد استفاده، هیبرید فلائیویلی است که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نوع هیبرید از یک جسم دوار برای ذخیره انرژی استفاده می‌شود. استفاده از فلائیویلی سرعت بالا در اتوبوس‌ها در مراکز و پژوهشکده‌های مختلف جهان مورد بررسی و طراحی قرار گرفته است. اتوبوس‌های تندرو به علت وزن زیادی در هنگام حرکت انرژی جنبشی زیادی دارد، که در هنگام ترمزگیری مقدار زیادی از این انرژی اتلاف می‌شود [۶]. در هیبرید فلائیویلی مقدار زیادی از انرژی جنبشی اتوبوس به صورت جنبشی ذخیره می‌گردد و در هنگام حرکت باز به اتوبوس پس داده می‌شود. در این روش از تبدیل صورت انرژی خودداری شده است؛ زیرا تبدیل انرژی از صورتی به صورت دیگر اتلاف انرژی زادی را به همراه دارد. فلائیویلی‌ها مدرن مورد استفاده در اتوبوس‌ها دارای وزن کم با سرعت زیاد هستند. کمتر بودن وزن فلائیویلی‌ها سرعت بالا نسبت به تجهیزات الکتریکی خود نیز سبب کاهش مصرف سوخت می‌شود.

اتوبوس ژيروسکوپ<sup>۳</sup> نخستین اتوبوس فلائیویلی است. این اتوبوس توسط شرکت اورلیکون<sup>۴</sup> در دهه ۱۹۴۰ ساخته و توسعه داده شد. در این اتوبوس از یک فلائیویلی بزرگ فولادی با سرعت کم استفاده شده است. وزن این فلائیویلی ۱۵۰۰ کیلوگرم با قطر  $\frac{1}{6}$  بود و ظرفیت ذخیره انرژی حدود  $\frac{6}{6}$  کیلو وات در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه داشت [۷]. اولین اتوبوس فلائیویلی که به دید عموم گذاشته شد، در سال ۱۹۵۰ در سوئیس بود که به مدت ۱۰ سال نیز مورد استفاده قرار گرفت. بعد از آن ۱۲ عدد از این اتوبوس‌ها به کنگو آورده شد و برای سال‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفت. بلژیک کشور بعدی بود که اتوبوس ژيروسکوپ<sup>۳</sup> به آن وارد شد. با شروع دهه ۱۹۶۰ تمام این اتوبوس‌ها از خیابان‌ها جمع شدند. علت این امر نیز مصرف زیاد انرژی به علت وزن زیاد اتوبوس بود [۸].

پس از این، گام‌های نخست برای مطالعه و استفاده از فلائیویلی‌های مدرن کنونی، که سبک و سرعت بالا هستند، با شروع استفاده از مواد کامپوزیتی آغاز شد. اولین بار در دهه ۱۹۹۰ در دانشگاه آستین تگزاس<sup>۵</sup> اقدام به طراحی اتوبوس

هیبرید با استفاده از فلاپویل‌های سرعت‌بالای مدرن کردند. این فلاپویل سرعت بالا می‌توانست ۲ کیلووات ساعت انرژی ذخیره کند و می‌توانست به‌طور پیوسته توان ۱۵۰ کیلووات را بدهد [۹]. یک شرکت هلندی به نام سی. سی. ام.<sup>۶</sup> در زمینه استفاده از فلاپویل سرعت‌بالا در اتوبوس‌های هیبرید تحقیقات و تجربیات زیادی دارد. این شرکت در سال ۱۹۶۰ م یک اتوبوس فلاپویلی را برای شهر آینده‌هون<sup>۷</sup> با موفقیت آزمایش کرد. این اتوبوس ۱۲ متر طول و ۱۸ تن وزن داشت و از یک موتور گازوئیلی با توان ۴۰ کیلووات استفاده می‌کرد. فلاپویل سرعت‌بالا با توان ۲۰۰ کیلووات و ظرفیت ذخیره انرژی ۲ کیلووات ساعت داشت. این اتوبوس از سیستم ترمز بازیاب<sup>۸</sup> برای شارژ فلاپویل سرعت بالا استفاده می‌کرد. این اتوبوس نشان داد که با استفاده از بازیابی انرژی کار می‌توان تا ۳۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد [۱۰].

اتوبوس‌های فلاپویلی که در چند سال اخیر وارد خیابان‌های شهر لندن شده است، به ۵۰۰ دستگاه می‌رسد. فلاپویل سرعت‌بالا مورد استفاده در این اتوبوس‌ها دارای ظرفیت انرژی ۰/۴ کیلووات ساعت است. این مقدار برای شتاب‌دادن اتوبوس از صفر تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت و جذب انرژی ترمزی در این محدوده سرعت را کفایت می‌کند. این سیستم قابلیت صرفه‌جویی در مصرف سوخت بین ۲۰ تا ۲۵ درصد دارد که برای هر اتوبوس در سال حدود ۵۳۰۰ لیتر گازوئیل است [۱]. یک راه‌حل دیگر برای کاهش هزینه، نصب فلاپویل سرعت‌بالا روی اتوبوس‌های موجود است، در این زمینه شرکت جی. کی. ان.<sup>۹</sup> برای اتوبوس‌های شهر لندن این کار را انجام می‌دهد [۱۱].

## ۲. اتوبوس تندرو و قوای محرکه آن

### ۱-۲. تاریخچه اتوبوس تندرو تهران

سال‌های متمادی است که در کشورهای مختلف از روش‌های متفاوتی برای افزایش کیفیت و سرعت خدمات اتوبوس‌ها استفاده می‌شود. از آن جمله می‌توان به روش‌هایی چون اختصاص خطوط ویژه به اتوبوس‌ها و دادن اولویت به اتوبوس اشاره کرد. اتوبوس‌های تندرو، تلفیقی از تمامی روش‌هایی است که تاکنون برای افزایش سرعت اتوبوس‌ها استفاده شده است. سامانه تندرو روشی مدرن در مدیریت ترافیک به‌شمار می‌آید که به‌عنوان تجربه‌ای موفق در بسیاری از کلان‌شهرهای دنیا از

جمله آمریکای جنوبی و شانگهای به اجرا درآمده است [۱۲]. پیمایش سریع مسیر، زمان انتظار کوتاه، در دسترس بودن و دیگر امکانات رفاهی لحاظ‌شده در طراحی اتوبوس، از جمله مزایای سامانه تندرو به‌شمار می‌رود. تقاضای روزافزون مسافران سامانه تندرو، مدیران و دست‌اندرکاران را به توسعه این خطوط در شهر تهران ترغیب کرده است.

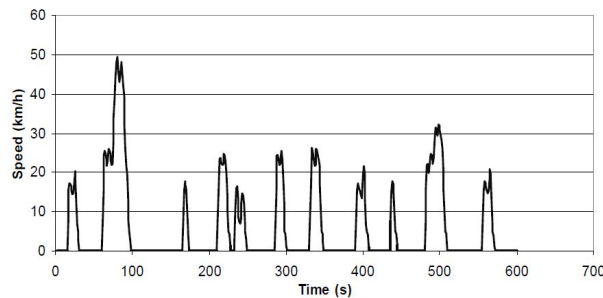
اولین اتوبوس‌های مورد استفاده در خطوط تندروی تهران اتوبوس‌های زرد رنگ و راست‌در بودند که در واقع اتوبوس‌های خط سریع‌السیار نامیده می‌شدند. این اتوبوس‌ها، که از نوع اسکانیا<sup>۱</sup> بودند، تنها در پنج ایستگاه میدان آزادی (مبدأ)، میدان انقلاب، میدان فردوسی، میدان امام حسین (ع) و چهارراه تهران‌پارس (مقصد) اقدام به پیاده و سوارکردن مسافر می‌کردند. هزینه بلیط این اتوبوس‌ها همانند سایر اتوبوس‌ها بود. این نوع اتوبوس حتی در مبدأ و مقصد در ایستگاه‌های مخصوص بی. آر. تی. توقف نمی‌کردند و در میدان‌های نیز در کنار میدان توقف می‌کردند. پنجاه دستگاه از این اتوبوس در سامانه تندرو موجود بود. در حال حاضر به‌دلیل استفاده از اتوبوس‌های دوکابین جدید، سرویس سریع‌السیار این خط برداشته شده است. اتوبوس‌های تندرو تهران دارای سیستم جی. پی. اس. می‌باشند که با استفاده از آن، سامانه سخنگوی داخل اتوبوس می‌تواند ۲۰۰ متر مانده به ایستگاه و در خود ایستگاه نام آن را بگوید تا مسافری را نسبت به موقعیت مکانی آگاه سازد. از دیگر امکانات داخل این اتوبوس‌ها سامانه موقعیت‌یاب جهانی است که به مرکز کنترل خط اجازه می‌دهد تا مکان هر اتوبوس را مشخص و برای رعایت فاصله زمانی رسیدن هر اتوبوس به ایستگاه، که دو دقیقه می‌باشد، اقدام کند. همچنین نقشه‌هایی در اتوبوس که نشانگر مسیر و ایستگاه‌ها و خیابانهای فرعی در اطراف ایستگاه‌ها می‌باشند نیز گذاشته شده است [۱۳].

### ۲-۲. سیکل رانندگی

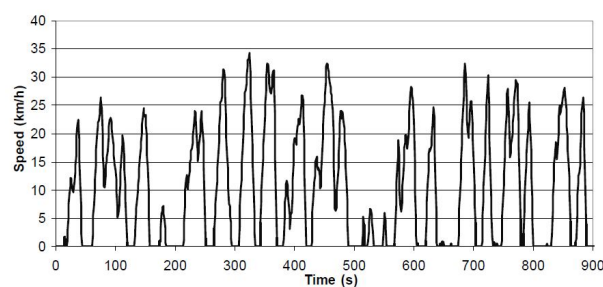
سیکل رانندگی<sup>۱۱</sup> ورودی بسیار مهمی در مدلسازی خودرو است؛ زیرا رفتار و روند حرکتی یک خودرو را در بازه زمانی بیان می‌کند. سیکل رانندگی برای شهرها و مسیرهای گوناگون استخراج شده است [۶]. حتی در یک مسیر مشخص متناسب با نوع رانندگی افراد مختلف متفاوت می‌باشد. سیکل رانندگی یک نمودار سرعت برحسب زمان است که شتاب‌گیری‌ها، ترمزگیری‌ها

و حرکت با سرعت ثابت را نشان می‌دهد. کارکردن در سیکل‌های مختلف سبب عملکرد و بازده‌های مختلف اتوبوس می‌شود. از اینرو انتخاب و دقت در به‌دست آوردن سیکل رانندگی بسیار حائز اهمیت است [۱۴]. در شکل ۱ سیکل رانندگی اتوبوس شهری نیویورک نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه سرعت سیکل ۴۷/۷ کیلومتر بر ساعت است. بیشینه شتاب مثبت آن ۰/۳۵ و بیشینه شتاب

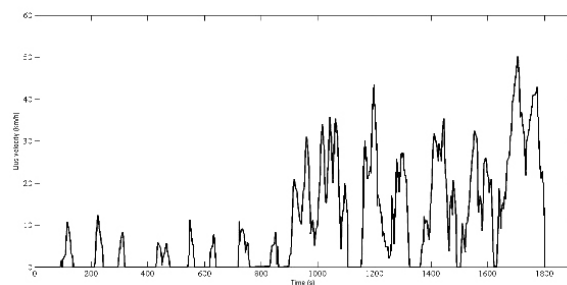
ترمزگیری آن ۰/۴۹ است. در شکل ۲ سیکل رانندگی اتوبوس شهری لندن نمایش داده شده است. در سیکل اتوبوس شهری لندن حداکثر سرعت ۳۳/۷ کیلومتر بر ساعت، بیشینه شتاب مثبت ۰/۲۶ متر بر مجذور ثانیه و شتاب ترمزگیری آن ۰/۶۵ است. این سیکل شتاب‌گیری کندتر اما ترمزگیری‌های تندتر نسبت به سیکل اتوبوس شهری نیویورک دارد. در شکل ۳ نیز سیکل رانندگی اتوبوس شهری تهران نمایش داده شده است.



شکل ۱. سیکل رانندگی اتوبوس درون شهری نیویورک [۱۵]



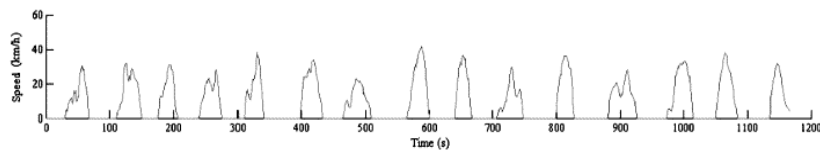
شکل ۲. سیکل رانندگی اتوبوس‌های درون شهری لندن [۱۶]



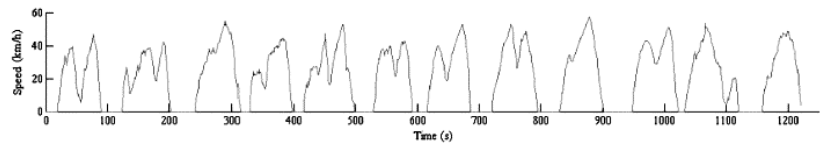
شکل ۳. سیکل رانندگی اتوبوس‌های درون شهری تهران [۱۵]

سیکل اتوبوس تهران نسبت به دو سیکل شهر نیویورک و لندن کمی متمایزتر است. این سیکل تفاوت سرعت‌های بیشتری دارد؛ یعنی دامنه تغییرات سرعت بیشتر است. حداکثر سرعت در این سیکل به ۵۰ کیلومتر بر ساعت می‌رسد. در شکل ۴ سه نوع سیکل رانندگی با میانگین سرعت‌های مختلف برای

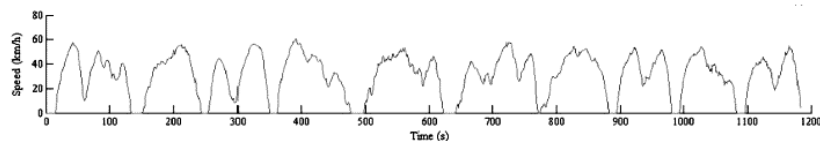
اتوبوس تندروی پکن<sup>۱۲</sup> نمایش داده شده است. تفاوت سیکل اتوبوس‌های تندرو با سیکل‌های دیگر در نظم حرکتی است. در هر سه مورد بیان‌شده در شکل ۴ نظم حرکتی خاصی برقرار است. اتوبوس با شتابی خاص حرکت می‌کند و پس از طی مسیری برای مدت زمان ثابت توقف و باز حرکت می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. نمودار الف) میانگین سرعت بین ۱۵ کیلومتر بر ساعت، ب) میانگین سرعت بین ۱۵ تا ۲۵ کیلومتر بر ساعت، ج) میانگین سرعت بالای ۲۵ کیلومتر بر ساعت [۱۷]

جدول ۱. مقایسه آلاینده‌گی سیکل‌های مختلف [۱۸]

آلاینده‌گی	FTP-75	HFCT	PETIA	SDV
مونو اکسید کربن (g/kg)	۰/۸۱۴	۰/۲۳	۴/۸۲۲	۰/۰۶۳
اکسیدهای نیتروژن (g/kg)	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶	۰/۲۱۷	۰/۰۸۷
THC(g/km)	۰/۰۳۷	صفر	۰/۰۶۲	۰/۱۱
مصرف سوخت (g/km)	۱۵/۶۹	۱۰/۱۳	۲۰/۵۷	۲۱/۲۰
میانگین سرعت سیکل	۳۴/۱	۷۷/۶	۲۱/۶	۱۷/۴

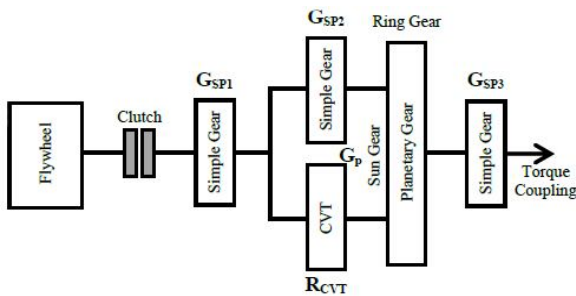
توسط تسمه به هم وصل می‌شوند. فشار زیادی بین این دو مخروط برای انتقال توان بالا ضروری است. اگر زاویه مخروط زیاد باشد، لغزش ناخواسته اتفاق خواهد افتاد [۱۹]. سیستم انتقال قدرت پیوسته نوینسی<sup>۱۸</sup> یکی دیگر از روش‌های انتقال قدرت پیوسته است، که با استفاده از ساچمه‌های فولادی و درگیری آنها با هم (همانند بلیبرنگ) سبب انتقال قدرت می‌شود [۲۰]. انتقال قدرت پیوسته تسمه‌ای، رایج‌ترین سیستم انتقال قدرت پیوسته است. مثلاً در خودروهای برف‌رو<sup>۱۹</sup> از این نوع استفاده می‌شود. در این سیستم نسبت دنده‌ها با تغییر شعاع مخروطها تغییر می‌کند [۲۱]. سیستم انتقال قدرت متغیر<sup>۲۰</sup> نوع دیگری از سیستم انتقال قدرت است. این سیستم ترکیبی از سیستم انتقال قدرت پیوسته و چرخ‌دنده‌های ساده و خورشیدی است که انتقال قدرت را به نرمی و بدون شوک انتقال می‌دهد.

سیکل رانندگی علاوه بر مصرف سوخت بر میزان آلاینده‌گی نیز تأثیر می‌گذارد. در جدول ۱ چهار سیکل معروف FTP-75<sup>۱۳</sup>، HWPCT<sup>۱۴</sup>، PETIA<sup>۱۵</sup> و SDV<sup>۱۶</sup> از نظر آلاینده‌گی مقایسه شده است. با توجه به این جدول میزان تولید آلاینده‌گی سیکل SDV تقریباً ۲/۵ برابر سیکل FTP-75 است، در صورتی که مصرف سوخت تنها ۱/۳۵ برابر است؛ یعنی آلاینده‌گی سیکل SDV نسبت به مصرف سوخت آن زیاد است.

### ۳-۲. سیستم انتقال قدرت

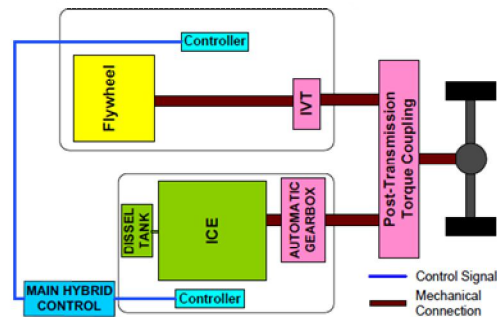
سیستم انتقال قدرت پیوسته<sup>۱۷</sup> در خودروی فرمول ۱ هیبرید فلاپویل سرعت بالا مورد استفاده قرار گرفته است. محور ورودی به یک صفحه مخروطی وصل می‌شود که روبروی یک صفحه مخروطی مشابه اما برعکس قرار دارد. این دو مخروط معمولاً

موجود در بازار از سیستم انتقال قدرت پیوسته بیشتر استفاده شده است؛ زیرا هزینه و سادگی را ملاک طراحی خود قرار داده‌اند. بنابراین برای طراحی اتوبوس فلاپیولی برای شهر تهران پیشنهاد می‌شود از سیستم انتقال قدرت پیوسته استفاده شود. یکی دیگر از مسائل حائز اهمیت در سیستم انتقال قدرت این است که فلاپیول سرعت بالا در کدام قسمت سیستم قرار گیرد و چیدمان این انتقال قدرت به چه شکل انتخاب شود. برای این مسئله در شکل ۷ چهار وضعیت فلاپیول سرعت بالا در سیستم انتقال قدرت نمایش داده شده است. در این شکل وضعیت‌های ۱ تا ۳ روش موازی‌اند؛ یعنی فلاپیول سرعت بالا و موتور درونسوز به‌طور موازی به سیستم انتقال قدرت وصل شده‌اند.

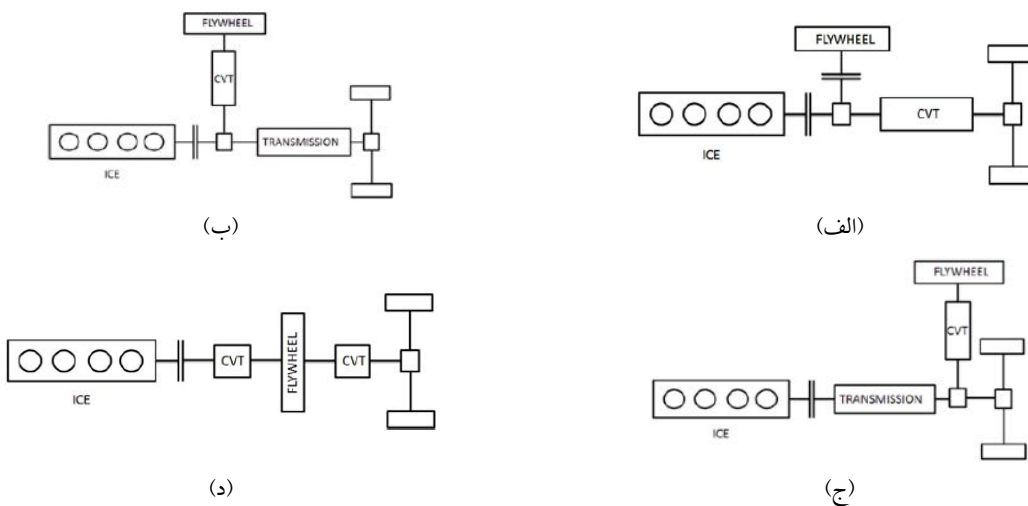


شکل ۶. سیستم داخلی انتقال قدرت متغیر [۲۳]

در شکل ۵ سیستم انتقال قدرت یک اتوبوس هیبرید فلاپیولی نمایش داده شده است. در این خودرو از سیستم انتقال قدرت ترکیبی استفاده شده است. سیستم انتقال قدرت متغیر به کار رفته از دو بخش تشکیل شده است. یک بخش همان انتقال قدرت پیوسته است و بخش دیگر آن چرخ‌دنده ساده است. کلاچ بین دو فلاپیول و یک چرخ‌دنده ساده قرار دارد. در شکل ۶ سیستم داخلی انتقال قدرت متغیر بالا نمایش داده شده است. استفاده از سیستم انتقال قدرت پیوسته شاید در نگاه نخست یک سیستم ساده‌تر و ارزان‌تر است، اما احتمال لغزش در آن وجود دارد. در انتقال قدرت متغیر امکان لغزش بسیار کمتر است و می‌تواند توان‌های بیشتری را انتقال دهد [۲۲]. در اتوبوس‌های طراحی‌شده



شکل ۵. نمایی از سیستم انتقال قدرت ترکیبی [۲۲]



شکل ۷. چهار وضعیت فلاپیول سرعت بالا در سیستم انتقال قدرت [۲۴]

نیست. پس باید از روش موازی (یکی از ۳ روش) استفاده کرد. در وضعیت ۱ هم موتور و هم فلاپیول سرعت بالا هر دو به مستقیماً به سیستم انتقال قدرت، جایی که انتقال قدرت پیوسته

روش ۴ روش سری است. در اتوبوس اتوبوس تندرو شهر تهران با هدف بهره‌گیری از فلاپیول سرعت بالا فقط در زمان‌های شتاب‌گیری و ترمزگیری استفاده از روش سری میسر

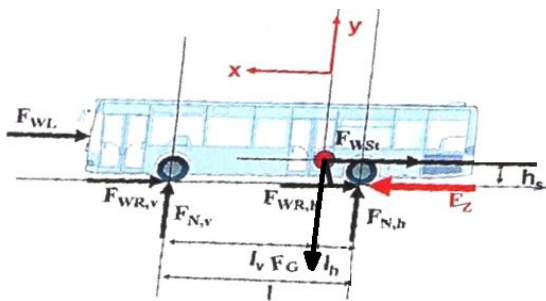
باعث تبخیر روغن می‌شود که اصلاً مطلوب نیست، پس باید از یاتاقان مغناطیسی استفاده کرد.

جدول ۲. مقایسه یاتاقان مکانیکی و مغناطیسی [۲۵]

یاتاقان مکانیکی	یاتاقان مغناطیسی
سختی زیاد در واحد حجم	دارای قابلیت افزایش سختی
فناوری در دسترس	عدم وجود استاندارد صنعتی
نیاز به نیروی بالانس‌کننده در سرعت بالا	اجازه دوران در سرعت‌های بالا بدون نیاز به نیروی اضافه
اتلاف انرژی زیاد در سرعت بالا	اتلاف انرژی بسیار کم
تبخیر روغن به علت ایجاد خلأ	عملکرد بسیار خوب در خلأ
نیازمند خنک‌کاری فعال	نیاز به کنترل فعال

## ۲-۵. محاسبات نیرو و توان

برای محاسبه میزان انرژی لازم، مدلی از دینامیک طولی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه سازمان محیط زیست تهران معادلات حاکم بر اتوبوس تندرو را به دست آورده است، در اینجا نیز از این معادلات استفاده شده است. در شکل ۸ مدل اتوبوس شهر تهران تحت نیروهای اعمالی مشاهده می‌شود. برای حرکت اتوبوس، نیروی جلوبرنده باید بر نیروهای مقاوم غلبه کند [۲۶].



شکل ۸. اتوبوس شهر تهران تحت نیروهای اعمالی [۲۵]

مقاومت غلطشی بر مسافت طی شده خودرو و بر همین اساس بر میزان مصرف خودرو تأثیر می‌گذارد. با استفاده از روابط حاکم بر نیروی جلوبرنده و نیروهای مقاوم حداکثر شتاب، حداکثر سرعت و مصرف سوخت قابل محاسبه است. رابطه ۱ میزان نیروی لازم برای غلبه بر نیروهای مقاوم ( $P_{Demand}$ ) نشان داده شده است. پارامترهای این معادله شامل نیروهای مقاومت

قرار دارد، وصل می‌شوند. موتور و فلاپیول سرعت بالا هر دو کلاچ جداگانه دارند و در صورت نیاز می‌توانند از سیستم انتقال قدرت خارج شوند. مزیت این سیستم این است که موتور می‌تواند در حالت بهینه خود کار کند، فلاپیول سرعت بالا را شارژ نماید و سپس فلاپیول سرعت بالا بر حرکت خودرو تسلط داشته باشد. معایب این سیستم نیاز به کنترل پیچیده و توانایی کوپل سرعت‌های فلاپیول سرعت بالا و موتور است. در وضعیت ۲ فلاپیول سرعت بالا به‌طور مستقیم به انتقال قدرت پیوسته وصل شده است و سپس هر دو فلاپیول سرعت بالا و موتور به سیستم انتقال قدرت وصل شده‌اند. در این طرح سرعت فلاپیول سرعت بالا توسط انتقال قدرت پیوسته به‌طور جداگانه کنترل می‌شود که این امر می‌تواند سبب طراحی انتقال قدرت بیش از اندازه گردد. در وضعیت ۳ سیستم انتقال قدرت پیوسته و فلاپیول سرعت بالا در انتهای سیستم انتقال قدرت وصل می‌شوند. این طرح امکان وجود ترمز بازیاب را فراهم می‌کند، هرچند احتمالاً تبدیل حالت مقداری سخت باشد. با توجه به مطالب بالا، برای اتوبوس تندرو تهران چون استفاده از ترمز بازیاب مورد نظر است، استفاده از حالت وضعیت ۳ معقول و مورد انتخاب قرار می‌گیرد [۲۴].

## ۲-۴. یاتاقان‌های مکانیکی و مغناطیسی

در فلاپیول‌های سرعت بالا دو نوع یاتاقان مورد استفاده قرار می‌گیرد. یاتاقان مغناطیسی به‌وسیله ایجاد میدان مغناطیسی از تماس روتور<sup>۲۱</sup> با بدنه جلوگیری می‌کند. این روش در جلوگیری از اتلاف انرژی بسیار مهم و حائز اهمیت است. از مشکلات این یاتاقان نیاز به تجهیزات پیشرفته برای ایجاد میدان مغناطیسی قوی و کنترل آن است. یاتاقان مکانیکی بسیار ساده و ارزان است. با توجه به اهمیت پارامتر مورد نیاز در هر کاربرد یکی از دو یاتاقان مکانیکی یا مغناطیسی برای فلاپیول سرعت بالا انتخاب می‌گردد. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین این دو یاتاقان انجام شده است.

برای اتوبوس شهر تهران استفاده از یاتاقان مغناطیسی مطلوب است. چون فلاپیول سرعت بالا مورد استفاده باید در سرعت‌های بسیار بالا برای مدت طولانی کار کند پس به یاتاقانی با اتلافات کم نیاز است. همچنین فلاپیول سرعت بالا مورد استفاده باید در خلأ کار کند، استفاده از یاتاقان مکانیکی

غلشی ( $P_R$ )، مقاومت هوا ( $P_L$ )، نیروی لازم برابر شتاب‌گیری ( $P_B$ )، مقاومت به علت لغزش تایر ( $P_{Antiskid}$ )، انتقال نیرو ( $P_{Tr}$ )، تقاضای انرژی برای فعال کردن نیروها ( $P_{Anci}$ ) است.

$$P_{Demand} = P_R + P_L + P_B + P_{Antiskid} + P_{Tr} + P_{Anci} \quad (1)$$

مقدار  $P_R$  لازم برای غلبه بر مقاومت غلشی از فرمول ۲ به دست می‌آید. در این فرمول  $m$  جرم خودرو،  $g$  شتاب گرانش،  $f_r$  ضریب مقاومت غلشی و  $v$  سرعت خودرو است.

$$P_R = m g f_r v \quad (2)$$

مقدار  $P_L$  لازم برای غلبه بر نیروی ائروپویسی از رابطه ۳ به دست می‌آید. در این رابطه  $C_w$  ضریب ائروپویسی خودرو،  $A$  سطح معادل خودرو،  $\rho_L$  چگالی هوا و  $v$  سرعت خودرو است.

$$P_L = \frac{1}{2} C_w A \rho_L v^3 \quad (3)$$

مقدار  $P_B$  لازم برای شتاب‌گیری مورد نیاز از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در این رابطه  $m_{vehicle}$  جرم خودرو،  $m_{load}$  جرم بار،  $m_{Red}$  جرم معادل اجزای گردان،  $a$  شتاب خودرو و  $v$  سرعت خودرو است [۲۶].

$$P_B = (m_{vehicle} + m_{load} + m_{red}) a \quad (4)$$

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مراحل در طراحی یک خودروی هیبرید مشخص کردن میزان توان مورد نیاز خودرو و استراتژی تقسیم بین منابع توان است. در اتوبوس فلاپویلی برای انجام این کار جدول‌هایی در زیر ارائه شده است. جدول ۳ مشخص‌کننده توان مورد نیاز اتوبوس درون‌شهری برای حرکت در حداکثر شیب با سرعت خاص را نشان می‌دهد. همچنین یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم در انتخاب موتور شتاب مورد نیاز است. در اینجا چون فلاپویل سرعت‌بالا در شتاب‌دهی به اتوبوس کمک می‌کند، می‌توان بیان کرد که در جدول ۴ توان مورد نیاز فلاپویل سرعت‌بالا برای شتاب‌دهی اتوبوس نشان داده شده است. با توجه به جدول‌های ۳ و ۴ می‌توان بیان کرد که در بعضی نقاط شهر تهران شیب زیاد بوده و تا حدود ۱۴ درصد نیز می‌باشد، پس موتور اتوبوس فلاپویلی برای شهر تهران باید توان ۱۴۲ کیلووات را داشته باشد. همچنین با توجه به سیکل‌های حرکتی شهر تهران شتاب مورد نیاز این‌گونه است، که اتوبوس بتواند در زمان یک دقیقه سرعت خود را از صفر به ۶۰ کیلومتر بر ساعت برساند. برای رسیدن به این نیاز اتوبوس، فلاپویل سرعت‌بالا باید ۱۰۰ کیلووات داشته باشد.

### ۳. فلاپویل سرعت‌بالا

فلاپویل سرعت‌بالا به‌طور گسترده به‌عنوان ذخیره‌کننده و یکنواخت‌کننده انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مواردی که انرژی برای مدت طولانی نیاز به ذخیره ندارد و در بازه زمانی کم مقدار زیادی انرژی ذخیره و بازپس داده می‌شود، استفاده از فلاپویل سرعت‌بالا یک انتخاب معقول است. فلاپویل سرعت‌بالا را یک ابرخازن مکانیکی می‌نامند [۲۷]. یکی از ملاک‌های مهم در فلاپویل‌های سرعت‌بالای مورد استفاده در اتوبوس‌ها و خودروها، بازه انرژی آن است، که به‌صورت نسبت انرژی ورودی ( $E_{input}$ ) به انرژی خروجی ( $E_{output}$ ) به دست می‌آید.

$$\eta = \frac{E_{output}}{E_{input}} \quad (5)$$

انرژی قابل استفاده ذخیره‌شده در فلاپویل سرعت‌بالا را می‌توان از رابطه ۶ به دست آورد.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{2} \int r^2 dm \quad (6)$$

به‌طوری‌که در این رابطه  $J$  ممان اینرسی حول محور دوران،  $\omega$  سرعت دوران و  $m$  جرم است. همان‌گونه که مشخص است، افزایش جرم سبب افزایش ممان اینرسی فلاپویل سرعت‌بالا و در نتیجه افزایش انرژی قابل ذخیره می‌شود. همچنین انرژی با توان دوم سرعت دورانی رابطه مستقیم دارد. از طرفی، افزایش وزن فلاپویل سرعت‌بالا باعث افزایش وزن کل خودرو و در نتیجه افزایش مصرف سوخت می‌شود. همچنین رابطه توان دوم سرعت با انرژی باعث شده است که بیشتر تمرکز سازندگان فلاپویل بر افزایش سرعت باشد [۲۸].

### ۳-۱. مواد، ایمنی و طول عمر فلاپویل سرعت‌بالا

فلاپویل سرعت‌بالا می‌تواند از مواد بی‌خطر مانند فولادهایی با ترکیبات آلومینیم و تیتانیوم و ترکیبات کامپوزیتی مانند کربن و مواد چسبی<sup>۳۳</sup> نیز ساخته شود. یکی از ضروری‌ترین مواد مورد استفاده در فلاپویل‌های سرعت‌بالای عصر حاضر، کامپوزیت کربن است [۲۹]. به دلیل وظیفه بسیار مهم نگهدارنده‌های<sup>۳۳</sup> فلاپویل، در ساخت و طراحی آن باید توجه زیادی مد نظر باشد؛ زیرا خرابی آن می‌تواند فاجعه‌آفرین باشد. تست‌های بسیار



استفاده باشد. به‌طور کلی خستگی یک قطعه به سیکل بارگذاری آن بستگی دارد [۳۰]. محدودیت انرژی دورانی ذخیره‌شده در یک ماده به‌طور تقریبی از فرمول ۷ به‌دست می‌آید [۲۵].

سخت‌گیرانه‌ای برای آنها نیز باید لحاظ شود. یک فلاپویل سرعت‌بالای خوب و قابل استفاده باید با در نظر گرفتن تعداد دفعات شارژ و تخلیه آن حداقل یک میلیون سیکل کاری قابل

جدول ۳. توان مورد نیاز اتوبوس با توجه به شیب و سرعت آن [۲۳]

شرایط	قدرت مورد نیاز (کیلووات)
سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و شیب صفر درصد	۶۵
سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت و شیب ۷ درصد	۱۵۵
سرعت ۳۵ کیلومتر بر ساعت و شیب ۱۰ درصد	۱۸۴
سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت و شیب ۱۴ درصد	۱۴۲

جدول ۴. توان مورد نیاز برای شتاب‌دهی [۲۳]

شرایط	قدرت مورد نیاز (کیلووات)
۰ تا ۲۵ در ۱۰ ثانیه	۸۹
۲۵ تا ۳۵ در ۵ ثانیه	۱۰۱
۳۵ تا ۴۰ در ۵ ثانیه	۵۹
۴۰ تا ۴۴ در ۵ ثانیه	۵۳
صفر تا ۶۰ در ۶۰ ثانیه	۱۰۰

جدول ۵. مقایسه انواع مواد فلاپویل سرعت‌بالا [۳۱]

جنس فلاپویل	حد نهایی تنش (مگاپاسکال)	چگالی	چگالی انرژی فلاپویل (وات ساعت بر کیلوگرم)
آلومینیوم ۷۰۷۵	۵۷۲	۲۸۱۰	۲۸
استنلس استیل ۱۷-۷	۱۶۵۰	۷۸۰۰	۲۹
تیتانیوم ۳ درصد کروم	۱۳۸۰	۴۷۶۰	۴۰
کامپوزیت آهن و الیاف سیلیس	۱۴۰۰	۲۱۴۶	۹۰
کامپوزیت توری تی ۱۰۰۰ جی	۳۰۴۰	۱۸۰۰	۲۳۴
فیبر توری تی ۱۰۰۰ جی	۶۳۷۰	۱۸۰۰	۴۹۱
کربن بدون الیاف با رشد فاز بخار	۲۹۲۰	۲۰۰۰	۲۰۲
کربن تک ردیفه بدون حلقه (دم کوتاه)	۵۰۰۰۰	۱۳۰۰	۵۳۴۱
کربن تک ردیفه بدون حلقه (دم بلند)	۵۰۰۰۰۰	۱۳۰۰	۵۳۴۱۸
کربن چند ردیفه بدون حلقه (دم کوتاه)	۱۰۰۰۰	۱۷۵۰	۷۹۳
کربن چند ردیفه بدون حلقه (دم بلند)	۶۰۰۰۰	۱۷۵۰	۴۷۶۱

$$e = \frac{E}{m} = \frac{\sigma \theta}{2\rho} \quad (7)$$

به طوری که در رابطه اخیر  $e$  انرژی واحد جرم،  $E$  انرژی،  $m$  جرم،  $\sigma \theta$  تنش مماسی و  $\rho$  چگالی ماده مورد نظر است. این معادله، هرچند رابطه‌ای تقریبی است، اما برای مقایسه مواد مختلف ابزار سودمند و مفیدی به شمار می‌آید. جدول ۵ مقایسه‌ای بین انواع مواد موجود مورد استفاده برای فلاپیول سرعت‌بالا را نشان می‌دهد. هرچند کربن نانوتیب<sup>۲۴</sup>، که آخرین مورد جدول است، کمی ایده‌آل به نظر می‌آید، اما این ماده هم اکنون توسط ناسا و صنایع دفاعی آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به محدوده انرژی مورد نیاز برای اتوبوس شهر تهران نانولوله کربنی<sup>۲۵</sup> و ماده مرکب توری تی-۱۰۰۰ جی در اولویت انتخاب قرار می‌گیرند. یکی دیگر از ملاک‌های مهم برای فلاپیول سرعت‌بالا اتوبوس شهر تهران کمبود وزن آن است، ماده کامپوزیت توری تی-۱۰۰۰ جی دارای چگالی کمتر است، این ماده برای فلاپیول سرعت‌بالا شهر تهران مطلوب به نظر می‌رسد.

### ۳-۲. تخلیه انرژی و کاربردهای فلاپیول سرعت‌بالا

میزان سیکل کاری یک فلاپیول سرعت‌بالا به میزان تخلیه شدن آن ربطی ندارد؛ زیرا این فاکتور تعیین کننده عمر باتری‌هاست. اما این مسئله برای بررسی میزان انرژی قابل ذخیره توسط فلاپیول سرعت‌بالا مهم است. وقتی یک باتری با سرعت زیاد و در دمای بالا تخلیه انرژی می‌شود، سلامتی و عملکرد آن کاهش می‌یابد. برای مثال برای کاربردی با یک میلیون سیکل، باتری تنها می‌تواند تا ۳ درصد تخلیه کامل شود، این امر باعث می‌شود که این کار از باتری، ۳۳ برابر بزرگتر از مقدار مورد نیاز استفاده شود. اما فلاپیول سرعت‌بالا مشکل محدودیت عمر را ندارد [۳۲]. در جدول ۶ شرکت جی. کی. ان. مقایسه‌ای بین سه تأمین کننده باتری‌های لیتیومی، ابرخازن‌ها و فلاپیول‌های سرعت‌بالا که در خودروهای هیبرید مورد استفاده هستند، انجام داده است. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که هر سه سیستم دارای توان یکسان‌اند. ظرفیت انرژی باتری لیتیومی بسیار بیشتر از سیستم‌های دیگر است. اما در اتوبوس تندرو تهران هدف از هیبرید کردن فقط برای شتابگیری و ترمزگیری است، پس نیاز به ظرفیت انرژی زیاد نیست. پارامتر

مهم در شتابگیری توان مخصوص است که با توجه به جدول ۶ توان مخصوص فلاپیول سرعت‌بالا بیش از ۴/۵ برابر هر کدام از سیستم‌ها می‌باشد. پارامتر مهم دیگر وزن سیستم است که به طور مستقیم بر میزان مصرف سوخت تأثیر دارد. با توجه به جدول ۶ وزن فلاپیول از هر سیستم بسیار کمتر است به طوری که وزن هر سیستم بیش از ۴ برابر فلاپیول سرعت‌بالا است. پس استفاده از فلاپیول سرعت‌بالا برای اتوبوس تندرو تهران انتخاب معقولی می‌باشد.

### ۳-۳. کاربرد فلاپیول سرعت‌بالا

از سال ۲۰۰۹ در خودروهای فرمول ۱ اجازه استفاده از تجهیزاتی همچون فلاپیول سرعت‌بالا داده شد. از آن پس تقریباً تمامی خودروهای فرمول ۱ از این سیستم استفاده می‌کنند. شرکت فلاپی برد تأمین کننده سیستم‌های بازیاب انرژی جنبشی گردید. شکل ۹ فلاپیول سرعت‌بالای استفاده شده در خودروی فرمول ۱ در سال ۲۰۰۹ م را نشان می‌دهد. سیستم انتقال قدرت متصل به آن یک سیستم انتقال قدرت پیوسته می‌باشد [۱۹]. مشخصات اولین فلاپیول سرعت‌بالای مورد استفاده در فرمول ۱ را می‌توان در جدول ۷ مشاهده کرد. فلاپیول سرعت‌بالای مورد استفاده در یک خودروی فرمول ۱ چندین بار در دقیقه شارژ و تخلیه می‌شود، پس اتلاف انرژی ذخیره‌ای فلاپیول سرعت‌بالا چندان حائز اهمیت نیست؛ زیرا هدف سرعت و شتاب زیاد است، پس مهم انرژی مخصوص و توان مخصوص است. شرکت فلاپی برد میزان صرفه‌جویی انرژی یک خودروی ۱/۸ تنی با سیکل رانندگی<sup>۲۶</sup> NEDC را برابر ۱۸ درصد بیان کرده است [۲]. شرکت جگوار<sup>۲۷</sup> از سال ۲۰۱۱ م برای خودروهای هیبرید ایکس. اف.<sup>۲۸</sup> از فلاپیول‌های سرعت‌بالا شرکت فلاپی برد استفاده می‌کند. این فلاپیول سرعت‌بالا از جنس کامپوزیت و انتقال قدرت آن از سیستم انتقال قدرت پیوسته متعلق به شرکت توروترک<sup>۲۹</sup> ساخته شده است استفاده می‌کند. وزن این سیستم ۶۵ کیلوگرم است و ظرفیت ذخیره ۱۲۰ وات ساعت در ۶۰۰۰۰ دور بر دقیقه را دارد. بیشترین توان این سیستم ۶۰ کیلووات است. میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت آن حدود ۲۰ درصد است. در شکل ۱۰ سیستم فلاپیول سرعت‌بالا خودروی هیبرید ایکس. اف. مشاهده می‌شود [۳۳].

جدول ۶. مقایسه بین باتری لیتیومی، ابر خازن و فلاپویل سرعت بالا [۳۲]

نوع	فلاپویل سرعت بالا	ابرخازن	باتری لیتیوم - یون
تولیدکننده	جی. کی. ان.	ماکسول پوست کاپ <sup>۳۰</sup>	A123Systems
توان	۱۲۰ کیلووات	۱۲۰ کیلووات	۱۲۰ کیلووات
ظرفیت انرژی	۴۵۶ وات ساعت	۶۴۷ وات ساعت	۲۶،۴۰۰ وات ساعت
طول عمر	$> 10^6$	تا $10^6$	تا $10^6$
انرژی مخصوص	۸/۳ وات ساعت بر کیلوگرم	۱/۷۵ وات ساعت بر کیلوگرم	۱۱۰ وات ساعت بر کیلوگرم
توان مخصوص	۲۲۰۰ وات بر کیلوگرم	۳۲۰ وات بر کیلوگرم	۵۰۰ وات بر کیلوگرم
وزن سیستم	۵۵ کیلوگرم	۳۷۰ کیلوگرم	۲۴۰ کیلوگرم

جدول ۷. مشخصات اولین فلاپویل سرعت بالای مورد استفاده در فرمول ۱ [۱۹]

مشخصات	مقدار
انرژی قابل مصرف	۱۱۱ وات ساعت
ظرفیت توان	۶۰ کیلووات
ماکزیمم سرعت دورانی	۶۴۵۰۰ دور بر دقیقه
وزن فلاپویل	۵ کیلوگرم
وزن کل سیستم	۲۵ کیلوگرم
انرژی مخصوص فلاپویل	۲۲.۲ وات ساعت بر کیلوگرم
انرژی مخصوص سیستم	۴.۴ وات ساعت بر کیلوگرم
چگالی انرژی	۸.۵ وات ساعت بر لیتر



شکل ۱۰. فلاپویل سرعت بالا خودروی هیبرید ایکس. اف. [۳۳]



شکل ۹. فلاپویل سرعت بالای استفاده شده در مسابقات فرمول ۱ [۱۹]

حدود شرکت فایبرد ارتقا داد، اما هیچ‌گاه از آن در مسابقات فرمول ۱ استفاده نکرد. با این حال، از این سیستم در مسابقات خودرو دیگر استفاده شده است. در مسابقه لیمنس<sup>۳۴</sup> که به طول ۲۴ ساعت بود و در سال ۲۰۱۲ م برگزار شد، خودروی آئودی<sup>۳۵</sup> از سیستم فلاپویلی مشابهی استفاده کرد. این فلاپویل سرعت بالا از باتاقان‌های مغناطیسی استفاده کرده بود تا اتلاف انرژی را

شرک ولو<sup>۳۱</sup> نیز در زمینه خودروهای فلاپویلی فعالیت داشته است. این شرکت، فلاپویل سرعت بالای فایبرد را روی ولو اس. ۳۶۰ نصب نمود. این فلاپویل سرعت بالا همانند فلاپویل سرعت بالای مورد استفاده شرکت جگوار است. توان این سیستم ۶۰ کیلووات و مصرف سوخت را حدود ۲۰ درصد کاهش می‌دهد [۳۴]. تیم فرمول ۱ ویلیامز<sup>۳۳</sup> سیستم فلاپویل سرعت بالا را تا

به حداقل برساند. ظرفیت انرژی این فلاپویل سرعت بالا ۱۴۰ وات ساعت و میانگین توان آن ۱۵۰ کیلووات بود. شکل ۱۱ سیستم فلاپویل سرعت بالا ویلیامز را نشان می‌دهد.

### ۳-۴. مقایسه قیمت سیستم فلاپویل سرعت بالا و سیستم الکتریکی

مقایسه بین قیمت باتری و فلاپویل سرعت بالا کاری سخت محسوب می‌شود؛ زیرا سابقه تولید انبوه این محصولات زیاد

نیست. شرکت جی. کی. ان. مقایسه‌ای بین قیمت‌های این محصولات انجام داده است. این شرکت قیمت یک موتور احتراق داخلی با توان ۲۲۰ وات ساعت را برابر ۶۸۵ دلار بیان کرد در حالی که قیمت یک فلاپویل سرعت بالا با انرژی ۳۰ کیلووات و توان کم ۱۱۱ وات ساعت را ۷۲۳ دلار یعنی ۵ درصد بیشتر از موتور احتراق داخلی بیان کرده است. این شرکت در سال ۲۰۰۸ مقایسه‌ای بین سیستم فلاپویلی و الکتریکی انجام داده است که در جدول ۸ مشاهده می‌شود [۲].

جدول ۸. مقایسه‌ای بین سیستم فلاپویلی و الکتریکی [۲]

پارامتر	سیستم فلاپویل	هیبرید الکتریکی
درصد تأثیر در طی مسیر	۷۴ درصد	۳۴ درصد
وزن	۳۵ کیلوگرم	۸۵ کیلوگرم
حجم	۲۰ لیتر	۵۰ لیتر
قیمت هر واحد	۲۰۰۰ دلار امریکا	۸۰۰۰ دلار امریکا



شکل ۱۱. سیستم فلاپویل سرعت بالای ویلیام [۳۴]

در سال ۲۰۱۰ شرکت ولو با کمک فلاپویل<sup>۳۶</sup>، از شرکت اس. کا. اف.<sup>۳۷</sup> خواستند تا درباره صرفه اقتصادی استفاده از سیستم فلاپویلی تحقیق و آزمایش‌های لازم را انجام دهد. پس از بررسی‌های لازم شرکت اس. کا. اف. استفاده از سیستم فلاپویل سرعت بالا برای هیبرید کردن را از دیگر روش‌های موجود کم هزینه‌تر و بهتر بیان کرد [۳۵]. فلاپویل‌های الکترومکانیکی<sup>۳۸</sup> پیشرفته دارای تجهیزاتی هستند که قیمت آنها را بالا می‌برد. فناوری نوین با افزایش بهبود کارکرد فلاپویل سرعت بالای باعث افزایش قیمت شده است. به‌طور مثال حسگرها و عملگرهای مکانی یاتاقان مغناطیسی در سال ۲۰۰۹ برای دانشگاه اوپسالا<sup>۳۹</sup> حدود ۵۰۰۰ دلار هزینه داشته است. اما در سال ۲۰۱۵ سیستم با عملکرد مشابه قبلی قیمتی

کمتر از ۶۰ دلار بود است. این گفته‌ها حاکی از رشد سریع این فناوری دارد [۳۵].

### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان‌سنجی استفاده از اتوبوس هیبرید فلاپویلی برای شهر تهران انجام شد. در ابتدا انواع سیکل رانندگی بررسی و مورد ارزیابی قرار گرفت و استفاده از سیکل راننده اتوبوس تندرو پکن با سرعت متوسط ۱۵ کیلومتر بر ساعت برای اتوبوس تندرو شهر تهران پیشنهاد شد. انواع سیستم انتقال قدرت مورد استفاده در اتوبوس‌ها بررسی گردید و به‌علت ارزان قیمت و ساده‌تر بودن سیستم انتقال قدرت پیوسته، استفاده از این سیستم برای اتوبوس شهر تهران پیشنهاد گردید. یکی دیگر از مسائل

مورد بررسی چیدمان سیستم انتقال قدرت است که انواع چیدمان موجود برای قرار گرفتن فلاپویل سرعت‌بالا در سیستم انتقال قدرت بررسی و مزایا و معایب هر کدام ذکر شد. اتصال فلاپویل به سیستم انتقال قدرت پیوسته و ارتباط مجزای آن با سیستم قدرت برای اتوبوس تندرو تهران پیشنهاد گردد. دو نوع یاتاقان مغناطیسی و مکانیکی برای فلاپویل سرعت‌بالا اتوبوس مورد بررسی قرار گرفت و مزایای هر کدام بیان شد و با توجه به شرایط کارکرد فلاپویل سرعت‌بالای اتوبوس تندرو تهران استفاده از یاتاقان مغناطیسی پیشنهاد شد. مدل نیروی اتوبوس ترسیم و روش محاسبه هر پارامتر بیان شد. با توجه به شرایط کاری اتوبوس تندرو تهران توان مورد نیاز برای موتور احتراق داخلی ۱۴۲ کیلووات و توان فلاپویل سرعت‌بالا ۱۰۰ کیلووات به‌دست آمد. محاسبات انرژی و جنس‌های مورد استفاده فلاپویل سرعت‌بالا بیان گردیده‌است. و استفاده از Toray T1000G

برای فلاپویل سرعت‌بالای اتوبوس تندروی تهران پیشنهاد شده است. با مقایسه انجام‌شده بین باتری لیتیوم - یونی، ابرخازن و فلاپویل سرعت‌بالا برای استفاده در اتوبوس هیبرید مشاهده شده است، استفاده از فلاپویل از نظر وزن و توان مورد انتظار برای شتاب‌دهی ۴ برابر بهتر از دو مورد دیگر می‌باشد. همچنین با مقایسه انجام‌شده بین هزینه دو سیستم هیبرید و الکتریکی مشاهده شده است، هزینه سیستم الکتریکی تقریباً ۴ برابر سیستم فلاپویلی است. لذا استفاده از فلاپویل سرعت‌بالا برای اتوبوس تندرو تهران مقرون به‌صرفه است. استفاده از فلاپویل سرعت‌بالا نسبت به دو سیستم باتری و ابرخازن در اولویت قرار دارد. همچنین استفاده از فلاپویل سرعت‌بالا برای اتوبوس تندروی تهران حداقل ۱۵ درصد در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌کند؛ یعنی برای حمل‌ونقل تهران روزانه بیش از ۴۲۰ هزار لیتر گازوئیل معادل ۲۱۰ میلیون تومان به‌صرفه است.

## ۵. مآخذ

- [۱] سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهرداری تهران، گزیده آمار حمل‌ونقل و ترافیک تهران، تهران، ۱۳۹۳.
- [2] J. Hilton, Flybrid systems-Mechanical hybrid systems, *Proc. Engine Expo*, 2008.
- [3] Y. Gao, L. Chen, M. Ehsani, Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV, No. 1999-01-2910, SAE Technical Paper, 1999.
- [4] N. H. Beachley, A. A. Frank, Flywheel Energy Management Systems for Improving the Fuel Economy of Motor Vehicles, No. DOT/RSPA/DPB/50-79/1Final Rpt, 1979.
- [5] Y. Yan, G. Liu, J. Chen, "Integrated modeling and optimization of a parallel hydraulic hybrid bus." *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 97-104, 2010.
- [6] H. Achour, A. G. Olabi, Driving cycle developments and their impacts on energy consumption of transportation, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 1778-1788, 2016.
- [7] The Oerlikon electrogyro-Its development and application for omnibus service, *Eng*, pp. 559-566, 1955.
- [8] [http://photo.proaktiva.eu/digest/2008\\_g\\_yrobus.html](http://photo.proaktiva.eu/digest/2008_g_yrobus.html), "A Great Idea Takes a Spin, 2016.
- [9] R. J. Hayes, J. P. Kajs, R. C. Thompson, J. H. Beno, Design and testing of a flywheel battery for a transit bus, No. 1999-01-1159, SAE Technical Paper, 1999.
- [10] "<http://www.ulev-tap.org/ulev1/opening.html>," ULEV-TAP Newsletter, 2016.
- [11] M. Hedlund, J. Lundin, J. Santiago, J. Abrahamsson, H. Bernhoff. Flywheel energy storage for automotive applications, *Energies*, Vol. 8, No. 10, pp. 10636-10663, 2015.
- [12] T. Dragičević, S. Sučić, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, Flywheel-based distributed bus signalling strategy for the public fast charging station, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 6, pp. 2825-2835, 2014.
- [13] Tehran bus, accessed August 30, 2016, <http://bus.tehran.ir/>.
- [14] G. Amirjamshidi, M. J. Roorda, Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area, *Transportation research part D: transport and environment*, Vol. 34, pp. 255-266, 2015.

- [15] M. M. Tehrani, D. Bazargan, M. R. Hairi-Yazdi, M. Esfahanian, Performance analysis of hybrid energy storage in different driving cycles, In *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2011 2<sup>nd</sup>*, pp. 330-335, IEEE, 2011.
- [16] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. McCrae, P. G. Boulter, A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, *TRL Published Project Report, 2009*.
- [17] J. Lai, L. Yu, G. Song, P. Guo, X. Chen, Development of city-specific driving cycles for transit buses based on VSP distributions: case of Beijing, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 139, No. 7, pp. 749-757, 2013.
- [18] P. Seers, G. Nachin, M. Glaus, Development of two driving cycles for utility vehicles, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 41, pp. 377-385, 2015.
- [19] Original F1 System, accessed November 1, 2016, <http://www.flybridsystems.com/F1System.html>.
- [20] Fallbrook Technologies, accessed November 1, 2016, <http://www.fallbrooktech.com/nuvinci-technology>.
- [21] USA Nuvinci Technology, accessed November 1, 2016, <http://www.fallbrooktech.com/nuvinci-technology>.
- [22] M. M. Tehrani, M. Esfahanian, H. Nehzati, V. Esfahanian, S. H. Jamali, Design and simulation of a hybrid flywheel bus, 2012.
- [23] M. M. Tehrani, M. Esfahanian, H. Nehzati, V. Esfahanian, S. H. Jamali, Design and simulation of a hybrid flywheel bus, 2012.
- [24] A. Dhand, K. Pullen, Review of flywheel based internal combustion engine hybrid vehicles, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 14, No. 5, pp. 797-804, 2013.
- [25] J. Abrahamsson, Kinetic Energy Storage and Magnetic Bearings: for Vehicular Applications, 2014.
- [۲۵] ر. پوتز، امکان‌سنجی استفاده از اتوبوس برقی در ناوگان اتوبوسرانی سریع تهران، دفتر محیط زیست.
- [27] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, Energy storage systems for advanced power applications, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, No. 12, pp. 1744-1756, 2001.
- [28] K. Takahashi, S. Kitade, H. Morita, Development of high speed composite flywheel rotors for energy storage systems, *Advanced Composite Materials*, Vol. 11, No. 1, pp. 40-49, 2002.
- [29] M. Hedlund, J. Lundin, J. Santiago, J. Abrahamsson, H. Bernhoff, Flywheel energy storage for automotive applications, *Energies*, Vol. 8, No. 10, pp. 10636-10663, 2015.
- [30] S. J. Hooper, Composite Materials: Testing and Design, *ASTM Int. West Conshohocken*, p. 13, 1997.
- [31] M. H. Al-saleh, U. Sundararaj, Composites: Part A Review of the mechanical properties of carbon nanofiber / polymer composites, *Compos. Part A*, Vol. 42, No. 12, pp. 2126-2142, 2011.
- [32] SAFT. Lithium-Ion Battery Life, accessed November 02, 2016, <http://www.saftbatteries.com>.
- [33] Jaguar's Advanced XF 'flybrid, accessed November 02, 2016, <http://www.autocar.co.uk>.
- [34] ExtremeTech. Volvo Hybrid Drive, accessed November 02, 2016, <http://www.extremetech.com>.
- [35] Caoturing Lost energy, accessed November 01, 2016, <http://evolution.skf.com>.

## پی‌نوشت

- |  |  |
|--|--|
| <p>1. flybrid</p> <p>3. gyro-buses</p> <p>4. Oerlikon</p> <p>5. Austin Texas</p> <p>6. CCM</p> <p>7. Eindhoven</p> | <p>۲. پایانه بی‌هقی - پایانه علم و صنعت</p> <p>8. regenerative brake</p> <p>9. GKN</p> <p>10. Scania</p> <p>11. Driving Cycles</p> <p>12. Beijing</p> <p>13. Federal Test Procedure, US</p> <p>14. high frequency current transformer</p> <p>15. Pierre Elliot Trudeau International Airport</p> |
|--|--|

- 
16. Salaberry-de-Valleyfield
  17. CVT
  18. Nuvinci
  19. Snowcat
  20. IVT
  21. rotor
  22. epoxy
  23. containment chambers
  24. nanotube
  25. Vapor grown carbon nanofibers
  26. New European Driving Cycle
  27. Jaguar
  28. XF
  29. Torotrak
  30. Maxwell Boostcap
  31. Volvo
  32. S60
  33. Williams
  34. le mans
  35. Audi
  36. flybrid
  37. SKF
  38. electromechanical flywheels
  39. Uppsala University