

## فناوری هایپرلوپ، نسل پنجم سیستم حمل و نقل سریع

**چکیده:** استفاده از فناوری‌های مناسب برای حمل و نقل تا حد امکان سریع و در عین حال سفری آرام و بی‌خطر، همواره یکی از درخواست‌ها و دغدغه‌های اصلی بشر در طول تاریخ بوده است. یکی از مهم‌ترین اختراعات سیستم‌های حمل و نقل (نسل پنجم) چند ساله اخیر در جهان، فناوری هایپرلوپ است. هایپرلوپ، یک سیستم حمل و نقل مسافربری یا باربری بسیار سریع است که به عنوان جدیدترین (نسل پنجم) و پرسرعت‌ترین سیستم حمل و نقل در جهان شناخته شده است. بر اساس آخرین گزارش‌های اعلام شده سرعت این سیستم می‌تواند حتی تا ۱۲۰۰ کیلومتر بر ساعت نیز برسد (تقریباً معادل سرعت صوت در هوا) و این به معنای حمل و نقل و سفری بسیار سریع خواهد بود. به دلیل همین سرعت خیلی زیاد مباحث ارتعاشاتی، آکوستیکی و همچنین پایداری این سیستم‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مکانیزم کلی عملکرد این سیستم‌ها به صورت حرکت یک وسیله دارای محفظه حمل مسافر یا به اصطلاح پاد در داخل لوله‌های نزدیک به شرایط خلأ هست. در این مقاله ضمن معرفی و بررسی کامل سیستم هایپرلوپ و تاریخچه و اجزای تشکیل‌دهنده آن، به امکان‌سنجی استفاده، هزینه‌ها و مقایسه عملکرد این فناوری با سایر سیستم‌های حمل و نقل به صورت کمی و کیفی پرداخته می‌شود و در نهایت مشخصات فنی (ابعاد و اندازه‌های) یک نمونه واقعی طراحی شده از این سیستم‌ها بیان می‌شود.

**واژه‌های راهنما:** هایپرلوپ، حمل و نقل، پاد، قطار پر سرعت، لوله خلأ

حامد پتفت

دانشجوی دکتری

عباس رهی

وحید فخاری\*

استادیار، دانشکده مهندسی  
مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید  
بهشتی

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

**Hamed Petoft**  
PhD candidate

**Abbas Rahi**  
Assistant Professor

**Vahid Fakhari**  
Assistant Professor,  
Faculty of Mechanical and  
Energy Engineering,  
Shahid Beheshti  
University, Iran

## Hyperloop technology: the fifth generation of fast transport system

**Abstract:** The use of appropriate technologies for transportation as fast as possible and at the same time, a smooth and safe journey has always been one of the main demands and concerns of human beings throughout history. Hyperloop technology is one of the most important transportation systems (fifth generation) introduced in the world in recent years. Hyperloop is a very fast passenger or cargo transportation system that has been introduced as the newest (fifth generation) and fastest transportation system in the world. According to the latest reports, the system can reach speeds of up to 1,200 Km/hr (approximately equivalent to the speed of sound), which means that transportation and travel will be very fast. Therefore, the vibrational, acoustic, and stability issues of these systems, are very important. The overall operation mechanism of these systems is the movement of a very high-speed capsule shape vehicle (called a pod) with some passengers inside the tubes close to the vacuum conditions. In this article, while introducing and reviewing the hyperloop system and its components, the feasibility of use, costs, and comparison of the performance of this technology with other transportation systems in a quantitative and qualitative manner are discussed. Finally, the technical specifications of a real designed example of these systems are expressed.

**Keywords:** Hyperloop, Technology, Transportation, Performance comparison, High-speed train, Vacuum pipe

## ۱- مقدمه

پروژه به طور همزمان در مورد این سیستم‌ها در حال انجام و اجرا می‌باشد. به عنوان مثال در کشور امارات متحده عربی، پروژه احداث خط لوله‌های انتقال پاد میان شهرهای دبی و ابوظبی در حال انجام می‌باشد و با توجه به شواهد موجود [۱۰-۱۳] ظاهراً قرار است تا پایان سال ۲۰۲۱ افتتاح گردد که ویدئوها و عکس‌های واقعی گرفته شده در مراجع مذکور قابل مشاهده است. ولی به تازگی اولین نمونه واقعی هایپرلوپ به صورت حرکت یک پاد طراحی شده به همراه مسافر در شهر نوادای آمریکا توسط تیم طراحی ویرجین هایپرلوپ وان تحت کنترل و حمایت شرکت‌های اسپیس اکس به رهبری ایلان ماسک به طور رسمی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج موفقیت‌آمیزی داشت. بنا به گزارش‌ها و ویدئوهای منتشر شده [۱۴، ۱۵]، پاد طراحی شده به همراه سه سرنشین توانست درون ۵۰۰ متر خط لوله آزمایشی تخلیه شده از هوا با سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت حرکت کند. ضمناً تکنولوژی به‌کاررفته در طراحی سیستم پیشرانش و تعلیق پاد کاملاً مغناطیسی بوده است. این شرکت امید دارد که بتواند سرعت این سیستم را تا ۱۰۰۰ کیلومتر بر ساعت افزایش دهد. در این سیستم‌ها به دلیل سرعت بسیار بالایی که دارند، مباحث ارتعاشات، آکوستیک (صوت) و پایداری آن‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به جهت تازگی و نوظهور بودن هایپرلوپ، تاکنون تعداد محدودی پژوهش در زمینه بررسی ارتعاشاتی و آکوستیکی این سیستم‌ها صورت گرفته است و محققان در حال مطالعه بیشتر بر روی مباحث مذکور در این سیستم و حل معضلات و مشکلات به وجود آمده از نظر آلودگی صوتی و نویز بالا، ایجاد ارتعاش و ناراحتی سرنشینان و عوامل ایجاد ناپایداری در آن می‌باشند.

## ۲- بررسی مکانیزم عملکرد و اجزای سیستم هایپرلوپ

مکانیزم عملکرد این سیستم‌ها، تا حدودی به سیستم‌های قطارهای پرسرعت مغناطیسی شباهت دارد. اما یکی از تفاوت‌های بارز این سیستم‌ها قرار گرفتن و حرکت آنها در لوله‌های دایره‌ای شکل با شرایط نزدیک به خلأ موضعی است. به عبارت دیگر فشار (حدود ۱۰۰ پاسکال) و مقاومت هوا در این لوله‌ها ناچیز باشد. اجزای اصلی تشکیل دهنده این سیستم‌ها و نحوه عملکرد هر یک به طور خلاصه عبارت هستند از: یک بدنه کپسولی شکل دارای محفظه حمل مسافران که به اصطلاح پاد<sup>۵</sup> نامیده می‌شود، توربین‌های مکنده هوای داخل لوله در جلو و عقب پاد که متصل کمپرسورهای هوای موجود در پاد هستند، برخی دارای تعدادی بالشتک هوایی<sup>۶</sup> برای خروج هوای مکیده شده از کپسول، برخی دیگر مجهز به تعدادی مگنت‌های مغناطیسی دائم در زیر کپسول به همراه یک موتور القاگر خطی<sup>۷</sup> به عنوان روتور، خط لوله‌های دایروی با فشار هوای بسیار کم و قرار گرفته شده بر روی پل‌های نگهدارنده با فواصل مشخص از هم که پاد داخل این لوله‌ها حرکت نماید، صفحات خورشیدی در بالای لوله‌ها به منظور تبدیل انرژی گرمایی خورشید به انرژی الکتریکی که در باتری‌های تعبیه شده موجود در این سیستم‌ها برای تأمین برق مورد نیاز سیستم (اختیاری) ذخیره می‌شود و ریل‌های داخل لوله که دارای مگنت‌های شامل آرایه‌های مغناطیسی به عنوان استاتور با اثر از نوع هالباخ<sup>۸</sup> که در آن جهت قطب‌های میدانی

سفری آسان، ایمن و سریع به سراسر جهان همواره یکی از نیازهای مهم انسان‌ها در گذشته و همچنین دنیای امروز است. بدین منظور فناوری‌های متعدد و متفاوتی تاکنون برای حمل‌ونقل بشر ابداع شده است. از جمله خودروها، قطارهای معمول ریلی، قطارهای برقی و مغناطیسی، هواپیماها، کشتی‌ها و سایر وسایل نقلیه‌ای که بتوانند در عین داشتن امنیت و آرامش، شرایط سفری سریع و در مدت زمان کوتاه را برای مسافران ایجاد کنند. اما یکی از مهم‌ترین اکتشافات در سیستم‌های حمل‌ونقل جهانی، فناوری هایپرلوپ است. هایپرلوپ به عنوان جدیدترین (پنجمین) و پرسرعت‌ترین سیستم حمل‌ونقل در جهان شناخته شده است. این سیستم برای اولین بار توسط فردی به نام ایلان ماسک<sup>۱</sup> [۱، ۲] محقق آمریکایی و بنیان‌گذار شرکت‌هایی همچون تسلا موتورز<sup>۲</sup>، پی‌پل<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۴ معرفی شد. بر اساس آخرین گزارش‌های اعلام شده، قرار است که در سال ۲۰۲۰ در آمریکا تجاری‌سازی شود و به عنوان سیستم حمل‌ونقل بسیار پرسرعت و جایگزین در برخی از شهرها مورد بهره‌برداری قرار بگیرد؛ البته تاکنون کشورهایی همچون امارات متحده عربی و هندوستان نیز به ترتیب امتیاز استفاده از این سیستم را برای شهرهای دبی تا ابوظبی و بمبئی تا پیون از پیش خریداری کرده‌اند. چند مؤسسه و دانشگاه معتبر خارجی نیز همچون شرکت اسپیس-اکس آمریکا، دانشگاه ماساچوست آمریکا و دانشگاه دلفت هلند نمونه‌هایی از این سیستم را طراحی کرده‌اند و مورد آزمایش قرار داده‌اند. این سیستم‌ها به دلیل سرعت حمل‌ونقل بسیار بالایی که دارند، اخیراً مورد توجه بسیاری از شرکت‌های بزرگ صنعتی آمریکا و سایر کشورهای پیشرفته جهان قرار گرفته است. به گونه‌ای که مطابق آخرین آزمایش‌های انجام شده در آمریکا اعلام شده است که این سیستم‌ها می‌توانند تا سرعتی بالغ بر ۱۲۲۰ کیلومتر در ساعت را طی نمایند که سرعت آن برابر با سرعت صوت تلقی می‌شود. با چنین سرعتی برآورد شده است که می‌توان تنها در مدت ۳۵ دقیقه از شهر لس‌آنجلس به شهر سان فرانسیسکو را با مسافت حدود ۶۱۵ کیلومتر نقل مکان کرد! شرکت اسپیس اکس نیز اخیراً مسابقات سالانه‌ای را به منظور طراحی مکانیزم‌های خلاقانه جدید برای سیستم هایپرلوپ و رقابت آنها در پیست‌های دارای خط لوله‌های طراحی شده تدارک دیده است و از دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی و پژوهشی کشورهای مختلف سراسر جهان برای شرکت در این مسابقات و ارائه ایده‌ها و نمونه‌های طراحی شده فناورانه و خلاقانه خود برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها دعوت به عمل می‌آورد [۸-۱]. این فناوری در گروه سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی قرار می‌گیرند و نسل‌های سیستم‌های ریلی مشابه قبل از این فناوری از قرن هجدهم تاکنون به ترتیب پیشرفت فناوری شامل لکوموتیوها، متروها، سیستم‌های برقی ریلی زمینی و هوایی یا ترامواها<sup>۴</sup> (که شامل سیستم‌هایی همچون اتوبوس‌های برقی، قطارهای واگن‌دار برقی، تلکابین‌ها و موارد مشابه دیگر می‌شود) و در نهایت قطارهای پرسرعت مغناطیسی می‌باشند [۹].

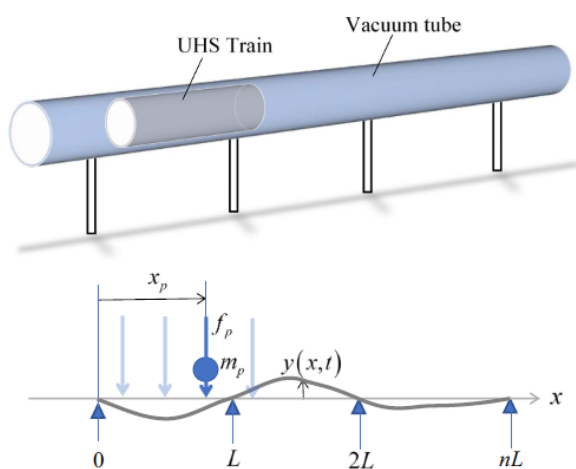
اما در مورد نمونه‌های واقعی طراحی و آزمایش شده تاکنون باید عنوان کرد که همان‌طور که قبل‌تر نیز اشاره شد، چندین

<sup>۱</sup>Elon Musk <sup>۲</sup>Tesla Motors <sup>۳</sup>PayPal <sup>۴</sup>tramways <sup>۵</sup>Pod <sup>۶</sup>air bearing <sup>۷</sup>linear induction motor (LIM) <sup>۸</sup>Halbach arrays



شکل ۳ نمونه‌ای از پاد بدون پره و کمپرسور هوا [۳]

همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص است، این نوع از پاد طراحی شده فاقد هرگونه پره و موتور کمپرسور هوا است و صرفاً از اثر میدان مغناطیسی برای ایجاد نیروی شتاب‌دهندگی و نیروی برآ برای معلق نگهداشتن پاد استفاده می‌کنند. از طرفی دیگر چنان‌که قبل‌تر نیز ذکر شد، مباحث آکوستیکی و ارتعاشاتی سیستم هایپرلوپ برای بررسی تأثیر آن بر میزان امنیت و راحتی سرنشینان نیز اهمیت بالایی دارد. در شکل ۴ از تحقیق الکساندر و کاشانی [۲۱] نمونه‌ای از پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه مدلسازی ارتعاشی سیستم هایپرلوپ مشاهده می‌شود:



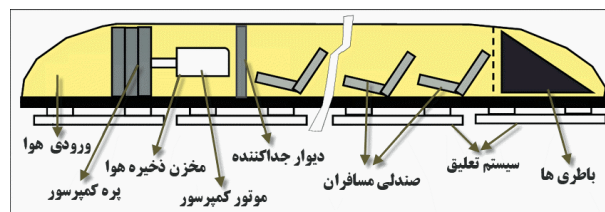
شکل ۴ مدل‌سازی حرکت پاد درون لوله‌های خلأ و تأثیر آن بر ارتعاشات ریل‌های هدایتگر [۲۱]

همان‌گونه که در شکل ۴ نیز مشخص است، مدل حرکت پاد در داخل خط لوله‌ها به صورت یک (یا چند) جرم متمرکز متحرک با سرعت بسیار زیاد در نظر گرفته شده است و مجموعه ریل‌های هدایتگر به صورت تعدادی تیر دو سرلولای اولر-برنولی مدل شده است و پایه‌های نگهدارنده لوله‌ها به فواصل یکسان  $L$  از یکدیگر واقع شده‌اند. بدین ترتیب تأثیر حرکت پاد به صورت جرم متمرکز و همچنین موقعیت قرارگیری پایه‌ها را بر ارتعاش ریل‌های هدایتگر مورد بررسی قرار دادند.

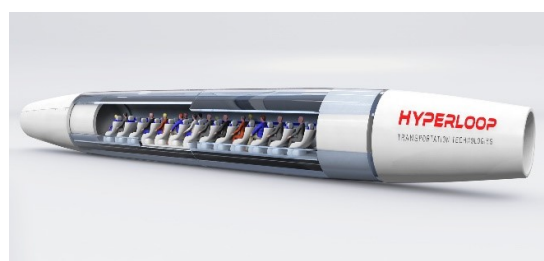
### ۳- امکان‌سنجی و هزینه‌های سیستم هایپرلوپ

ضمن توصیف مقدماتی سیستم هایپرلوپ، در این بخش به بررسی امکان استفاده از این سیستم در سطح شهرها و مقایسه

آرایه‌های دو به دو کنار هم با یکدیگر  $90^\circ$  درجه اختلاف زاویه دارند. مکانیزم نحوه عملکرد و شتاب‌گیری این سیستم‌ها نیز بدین صورت است که با شروع حرکت کپسول یا پاد در داخل لوله، پره کمپرسور موجود در پاد شروع به مکش هوای لوله می‌کند که ضمن کمک به ایجاد نیروی جلو بردندگی و شتاب‌گیری پاد، از هوای داخل شده به درون محفظه پاد برای تأمین اکسیژن مسافران استفاده می‌شود. ضمن آنکه با حرکت مگنت‌های روتوری زیر پاد از مگنت‌های استاتوری ریل، تغییر شار مغناطیسی ایجادشده موجب تولید جریان الکتریکی در موتور القاگر خطی و ایجاد نیروی پیش‌رانش برای شتاب‌گیری و نیروی برآ برای معلق نگهداشتن کپسول در هوا می‌شود [۱۶-۱۹]. بدین ترتیب مشخص است که به دلیل معلق بودن پاد، نیروی اصطکاکی از طرف ریل به آن اعمال نمی‌شود. البته قابل ذکر است که برخی از سیستم‌های هایپرلوپ طراحی شده تاکنون، فاقد توربین و کمپرسور هوا هستند و تنها با استفاده از اثر میدان مغناطیسی عمل می‌کنند [۲۰]. در شکل ۱ اجزای پاد در سیستم هایپرلوپ ملاحظه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشهود است، اجزای اصلی پاد شامل توربین یا پره متصل به مخزن و موتور کمپرسور هوا برای مکش هوای داخل لوله به درون محفظه پاد می‌باشد. تعدادی صندلی برای نشستن مسافران و در انتهای پاد باتری‌های ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی سیستم است. در شکل ۲ نیز یک نوع پاد سه بعدی و واقعی طراحی شده مجهز به پره و موتور کمپرسور هوا را توسط شرکت هایپرلوپ وان نمایش می‌دهد. در شکل ۳ نیز نمونه واقعی دیگر پاد طراحی شده توسط شرکت هایپرلوپ وان مشاهده می‌شود.



شکل ۱ اجزای اصلی پاد در سیستم هایپرلوپ [۲]



شکل ۲ نمونه‌ای از پاد مجهز به پره و کمپرسور هوا [۳]

زده نشده است. بنابر گزارشی از دانشگاه پرینستون آمریکا [۲۲] میانگین هزینه‌های عملیاتی بخش الکتریسیته این سیستم‌ها حدود ۰/۲۱۴ دلار به ازای هر کیلووات ساعت مصرف انرژی می‌باشد. این هزینه‌های عملیاتی را می‌توان با به کار بردن پنل‌های خورشیدی بر روی خط لوله‌ها کاهش داد. به طوری که این پنل‌های خورشیدی در تمام مسیر خط لوله‌ها می‌توانند به طور میانگین سالانه ۵۷ مگاوات توان تولید کنند که این میزان توان تولیدی، حتی از انرژی مورد نیاز برای تأمین سیستم پایش‌رانش و شارژ باتری‌ها و منابع ذخیره‌کننده انرژی نیز بیشتر است و میتوان حدود ۱۰۰ میلیون دلار آمریکا از انرژی اضافه تولید شده حاصل از این پنل‌ها را نیز به فروش رساند. اما به طور خلاصه هزینه عملیاتی (که شامل هزینه تعمیر و نگهداری اجزا نیز می‌شود) به ازای دو سال کارکرد این سیستم با پنل‌های خورشیدی و زیرساخت‌های باتری حدود ۲۶۰ میلیون دلار آمریکا برآورد شده است. در مورد عمر این باتری‌ها هم طبق گزارشی دیگر [۲۳] به ازای استفاده از باتری‌های معمول لیتیوم-یونی برای این سیستم‌ها به طور میانگین قابلیت حدود ۳۰۰ سیکل استفاده مجدد تا میزان ۸۰ درصد دشارژ شدن تخمین زده شده است. ضمناً این نکته قابل توجه است که دمای سلول‌های باتری باید همواره بررسی شود و همچنین نیاز به سیستم خنک کاری برای عدم رسیدن به دماهای بالا و از بین رفتن کارکرد خود دارد.

#### ۴- مقایسه عملکرد هایپرلوپ با سایر سیستم‌ها

در این بخش به مقایسه کمی و کیفی عملکرد فناوری هایپرلوپ با سایر سیستم‌های حمل‌ونقل موجود پرداخته می‌شود. در جدول‌های ۲، ۳ و ۴، نمونه‌هایی از مقایسه عملکرد سیستم هایپرلوپ با سایر فناوری‌های حمل‌ونقل به صورت کمی و کیفی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ قابل مشاهده است، عملکرد سیستم هایپرلوپ را با قطارهای سریع‌السیر معلق مغناطیسی یا مگلو<sup>۱</sup> و قطارهای فرانسوی AGV مقایسه شده است. با توجه به داده‌های جدول ۲ از مرجع [۲۴] ملاحظه می‌شود که سرعت پاد در سیستم هایپرلوپ در مقایسه با قطارهای مگلو و AGV افزایش بسیار قابل ملاحظه‌ای دارد؛ به گونه‌ای که حداکثر سرعت این سیستم‌ها تا حدود ۱۰۰۰ کیلومتر بر ساعت نیز می‌رسد. همچنین میزان مصرف انرژی این سیستم در مقایسه با دو نوع قطار دیگر به ازای شرایط برابر از ظرفیت تعداد حمل مسافر (۴۶۰ نفر) و در شرایط مسیر صاف و وجود شیب‌های مختلف در مسیر حرکت، کاهش قابل توجهی را نسبت به دو مورد مشابه دیگر نشان داده است. در جدول ۳ نیز به مقایسه کیفی عملکرد هایپرلوپ مجدداً با دو سیستم مشابه دیگر از نظر عملکرد کلی و هزینه‌های عملیاتی مختلف پرداخته شده است. پارامترهای مقایسه‌ای شامل هزینه‌های مختلف از جمله تعمیر و نگهداری، محیط زیست، تولید، عملکرد فنی سیستم و هزینه‌های عملیاتی می‌باشند. در جدول امتیازبندی کیفی از امتیاز ۰ به معنای ضعیف، ۱ متوسط، ۲ خوب و ۳ به معنای امتیاز عالی تلقی می‌شود. همان‌طور که مشهود است، ظاهراً مجموع امتیاز کیفی نهایی عملکرد هایپرلوپ نسبت به دو سیستم دیگر از برتری برخوردار است [۲۴].

عملکرد و هزینه‌های آن با سیستم‌های مشابه قبلی پرداخته می‌شود. گروهی از پژوهشگران به بررسی اقتصادی و هزینه‌های تمام‌شده این سیستم‌ها و مقایسه آن با سیستم‌های حمل‌ونقل دیگر همچون هواپیماها، انواع قطارهای پرسرعت مغناطیسی پرداخته‌اند. در بررسی‌های انجام گرفته ملاحظه شده است که هایپرلوپ برتری‌های فراوانی را نسبت به وسایل نقلیه دیگر از جهت‌های مختلفی همچون میزان مصرف انرژی، سرعت حمل‌ونقل، هزینه تمام‌شده حمل‌ونقل برای مسافران، آسودگی سفر، امنیت در برابر خطرات احتمالی طبیعی همچون زلزله را دارا است. اما معایبی هم در این سیستم‌ها وجود دارد. از جمله آن‌که هزینه ساخت آن به مراتب از قطارهای پرسرعت مغناطیسی بالاتر است. از معایب دیگر آن، در هنگام چرخش بدنه در خط لوله انتقال، شتاب گریز از مرکز بالایی به سرنشینان اعمال می‌شود و موجب ناراحتی در سواری می‌شود و لازم است که شعاع انحنای مسیر به اندازه کافی بزرگ باشد که مقدار این شتاب را کاهش دهد. و از مشکلات دیگر این سیستم‌ها می‌توان به ایجاد آلودگی صوتی و نویز شدید آنها به دلیل سرعت بسیار بالایشان اشاره کرد و موجب می‌شود که نتوان آن‌ها را در داخل شهرها یا نزدیک منازل مسکونی احداث کرد [۱-۵]. در جدول ۱، خلاصه هزینه‌های کلی سیستم هایپرلوپ شامل دو بخش کلی هزینه‌های مربوط به ساختار خط لوله‌ها و هزینه‌های تولید اجزای پاد ملاحظه می‌شود:

جدول ۱ هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی اجزای سیستم هایپرلوپ به گزارش ایلان ماسک [۲].

هزینه (میلیون دلار آمریکا)	اجزای سازنده
۵۴ (به ازای ۴۰ کیپسول)	جمع هزینه‌های پاد (یا کیپسول)
۹/۸	ساختمان پاد و درها
۱۰/۲	صندلی‌ها و تجهیزات داخلی
۱۱	کمپرسور و لوله‌ها
۶	باتری‌ها و تجهیزات الکترونیکی
۵	نیروی محرکه
۸	تعلیق
۴	مونتاژ اجزا
۵۴۱۰	جمع هزینه‌های تیوب (خط لوله تقریباً خالص)
۶۵۰	ساختار تیوب
۲۵۵۰	ساختار پایه‌ها
۶۰۰	ساختار تونل
۱۴۰	نیروی محرکه
۲۱۰	پنل‌های خورشیدی و باتری‌ها
۲۶۰	ایستگاه‌ها و پمپ‌های مکند هوا
۱۰۰۰	تصاحب زمین‌ها
۵۳۶	احتساب تغییرات قیمت
۶۰۰۰	جمع کل

همان‌طور که در جدول ۱ مربوط به گزارش مخترع این سیستم یعنی ایلان ماسک نیز مشخص است، بخش عمده هزینه‌های تولید هایپرلوپ، مربوط به هزینه ساختن خط لوله‌ها و بخصوص پایه‌های نگهدارنده لوله‌ها با هزینه تقریبی ۲۵۵۰ میلیون دلار آمریکا است. جمع کل هزینه‌های تمام اجزای سیستم حدود ۶۰۰۰ میلیون دلار آمریکا برآورد شده است. البته قابل ذکر است که در جدول ۱ هزینه‌های عملیاتی زیرساخت‌های سیستم به خصوص در بخش تجهیزات الکترونیکی و باتری‌ها تخمینی

<sup>۱</sup>Maglev

جدول ۲ مقایسه عملکرد هایپرلوپ با قطار پرسرعت فرانسوی AGV و قطارهای پرسرعت مغناطیسی MAGLEV [۲۴].

پارامتر عملکرد	فناوری	قطار AGV	قطار MAGLEV	هایپرلوپ با ۱ پاد	هایپرلوپ با ۱۷ پاد
تعداد مسافران		۴۶۰	۴۶۰	۲۷	۴۵۹
حداکثر سرعت		۳۶۰	۴۳۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
سرعت از صفر تا مقدار حداکثری					
مصرف انرژی (مگاژول) به ازای شیب‌های مختلف		۵۰۰۰	۲۷۷۲	۵۸۵	
بدون شیب (۰ درصد)		۱۰۶۰۰	۳۴۵۷	۶۹۵	
شیب ۲ درصد		۱۴۷۲۰	۳۹۷۱	۷۷۷	
شیب ۳/۵ درصد		—	۶۱۸۲	۱۱۳۳	
شیب ۱۰ درصد		۲۱۲	۱۲۴/۷۳	۱۱۹	
درصد افزایش مقدار انرژی از شیب ۰ درصد به ۲ درصد		۲۹۴/۴	۱۴۳/۲۷	۱۳۳	
درصد افزایش مقدار انرژی از شیب ۰ درصد به ۵.۳ درصد		—	۲۲۳/۱۱	۱۹۳/۷	
درصد افزایش مقدار انرژی از شیب ۰ درصد به ۱۰ درصد		۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۲	
نسبت جرم مسافر به جرم قطار		مجموع جابه‌جایی ۵۰۰ کیلومتر در سطح صاف			
انرژی مصرف‌شده (مگاژول)		۳۵۹۰۰	۲۶۶۰۰	۸۰۶	۱۳۷۱۰
انرژی در هر کیلومتر (مگاژول/کیلومتر)		۷۲	۵۳/۲	۱/۶	۲۷/۴
انرژی مصرفی مسافر (مگاژول/مسافر)		۷۸	۵۶/۶	۹.۲۹	۲۹/۹
انرژی تولیدی (مگاژول)		۱۵۰۰	۱۶۰۰	۳۹۴	۶۷۰۰

جدول ۳ مقایسه کیفی عملکرد سیستم هایپرلوپ با قطار پرسرعت فرانسوی AGV و قطارهای پرسرعت مغناطیسی MAGLEV (از امتیاز ۰ تا ۳ یا عالی) [۲۴].

وضعیت	عملکرد	هزینه تولید	هزینه عملیاتی	هزینه نگهداری	هزینه محیط‌زیست	مجموع امتیاز
فناوری قطار AGV	۱	۳	۱	۱	۲	۸
قطار MAGLEV	۲	۱	۲	۲	۱	۸
هایپرلوپ	۳	۲	۳	۳	۳	۱۴

جدول ۴ مقایسه کیفی عملکرد سیستم هایپرلوپ با سایر فناوری‌های حمل‌ونقل [۲۵].

پارامتر عملکرد	حمل‌ونقل فناوری	خودروها	قطارها	کشتی‌ها	هواپیماها	هایپرلوپ
مصرف انرژی	بسیار کم	بسیار کم	زیاد	بسیار زیاد	بسیار زیاد	کم
حداکثر سرعت (کیلومتر بر ساعت)	۱۲۰	متوسط	۵۰۰	۴۴	۹۲۴	۱۰۰۰
مقاومت در برابر شرایط آب و هوا	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	کم	بسیار زیاد
خطر حوادث	زیاد	سریع	متوسط	کم	زیاد	کم
بارگذاری مسافران	سریع	خوب	سریع	متوسط	آهسته	سریع
سطح آسایش	خوب	خوب	عالی	عالی	ضعیف	خوب
هزینه‌های سفر	کم	کم	متوسط	زیاد	زیاد	کم
ظرفیت حمل‌ونقل	کم	کم	بسیار زیاد	بسیار زیاد	متوسط	کم

آنکه تقریباً تمامی اجزای این سیستم از جمله سیستم پیش‌رانش، تعلیق و همچنین تخلیه‌کننده‌های هوا (پمپ‌های مکنده) از انرژی الکتریکی بهره می‌برند، در صورت خراب شدن یا قطع شدن برق این سیستم‌ها و همچنین با احتمال عدم عملکرد مناسب باتری‌های ذخیره‌کننده انرژی به هر دلیل، حوادث خطرناک و ناگواری به وجود خواهد آمد. به خصوص در حالتی که پاد با سرعت بسیار زیاد نزدیک به سرعت صوت درون لوله در حال حرکت باشد! (خطرناک‌تر از قطارهای پرسرعت) دومین خطر احتمالی وجود پارگی یا نشستی (سوراخ) در لوله‌های انتقال پاد است. این مسئله موجب می‌شود که سرعت هوای ورودی به داخل لوله بیشتر از سرعت تخلیه هوا توسط پمپ‌های مکنده باشد که در این صورت موجب افزایش فشار داخل لوله شده و در نتیجه

در جدول ۴ از مرجع [۲۵]، عملکرد هایپرلوپ با دیگر فناوری‌های حمل‌ونقل شامل خودروها، قطارها، کشتی‌ها و هواپیماها به طور کیفی از جهات مختلف مقایسه شده است. پارامترهای مقایسه‌ای شامل مصرف انرژی سیستم، حداکثر سرعت، مقاومت در برابر شرایط مختلف آب و هوا، میزان خطر احتمال ایجاد حوادث در سیستم، سرعت بارگذاری مسافر، سطح راحتی و آسایش سفر با سیستم، هزینه‌های تمام‌شده سفر برای مسافران و ظرفیت سیستم از نظر تعداد مسافر برای حمل‌ونقل می‌باشند. اما در مورد خطرات و حوادثی که ممکن است برای سیستم هایپرلوپ اتفاق بیفتد باید ذکر کرد که بنابر اعلام گزارشی [۲۶] دو خطر مهم را به عنوان مشکلات اساسی این سیستم عنوان کرده‌اند: اولین خطر از بین رفتن برق این سیستم است. به دلیل

با توجه به اطلاعات جدول ۵، مشاهده می‌شود که این سیستم دارای قابلیت حمل به تعداد ۳۰ مسافر را با جرم مجموع حدود ۲۵۰۰۰ کیلوگرم است. جزئیات جرم هر کدام از اجزای تشکیل دهنده سیستم به صورت جدول ۶ گزارش شده است:

جدول ۶ جرم اجزای تشکیل دهنده پاد هایپرلودز [۲۷].

عنصر	جرم (کیلوگرم)
مسافران	۴۵۰۰
بار و چمدان‌ها	۷۰۰
موتور و کمپرسور	۱۵۰۰
بدنه و ساختار	۴۵۰۰
ابزار سرگرم‌کننده	۷۵۰
سیستم‌های هوا	۱۵۰
روتور موتور خطی	۱۰۰۰
موتورهای مغناطیسی	۳۶۵۵
باتری‌ها	۷۰۰۰
عناصر داخلی	۱۷۰۰
جرم کل (کیلوگرم)	۲۵۴۵۵

مطابق جدول ۶، بیشترین مقدار جرم اجزا مربوط به بخش باتری‌های ذخیره‌کننده توان و انرژی الکتریکی سیستم با جرم مجموع حدود ۷۰۰۰ کیلوگرم و پس از آن جرم بدنه و ساختار پاد با جرم معادل ۴۵۰۰ کیلوگرم است.

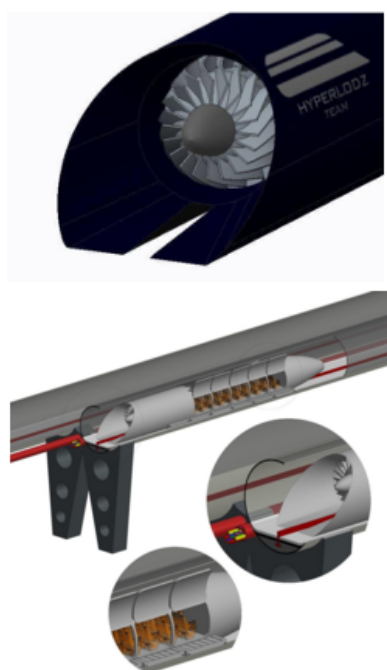
#### ۶- مشکلات و چالش‌های سیستم هایپرلودز و موانع تحقق پیشرفت فناوری

فناوری هایپرلودز چنان‌که در بخش‌های گذشته نیز بررسی شد، مزیت‌های بسیاری همچون پرسرعت بودن و صرفه جویی در زمان سفر، مصرف انرژی کمتر و ایمن بودن آن در برابر حوادث طبیعی مثل سیل و زلزله به دلیل مقاومت بالای پایه‌های نگهدارنده خط لوله دارد. اما با وجود این برتری‌ها، مشکلات و چالش‌هایی نیز در این سیستم‌ها وجود دارد. یکی از مشکلات این سیستم‌ها به خصوص در ابعاد بزرگ صنعتی آن است که اولاً احداث چندصد کیلومتر خط لوله میان شهرها با امکانات مجهز به ایجاد شرایط نزدیک به خلأ (پمپ‌های مکنده و خلأکننده یا وکیوم) هوای داخل لوله، نیاز به هزینه بسیار بالایی دارد که ممکن است مقرون به صرفه نباشد. علاوه بر آن در شرایط اضطراری خاص در صورت کار نکردن پمپ‌های مکنده، لازم است که یک سیستم قفل هوایی<sup>۱</sup> پیشرفته وجود داشته باشد که فشار داخل لوله را کنترل نماید و آن را با فشار معمول یک اتمسفری محیط همانند فشار هوای داخل پاد که مسافران قرار دارند، یکسان کند تا از اختلاف فشار زیاد میان لوله و پاد و خطرات آیرودینامیکی احتمالی جلوگیری شود. یکی دیگر از مشکلات مهم این سیستم، مسئله انبساط گرمایی<sup>۲</sup> لوله‌ها است. بدین صورت که جنس ساختار لوله‌ها فلزی است. سرعت بسیار زیاد پاد تا نزدیک سرعت صوت درون لوله، موجب افزایش فشار و دمای سطح لوله شده و به دلیل ویژگی انبساط گرمایی فلزات در دماهای بالا، لوله میان پایه‌های نگهدارنده دچار انبساط و تغییر شکل و اندازه شده و ممکن است این امر موجب تخریب خط لوله یا ناپایداری پاد و در نتیجه خطر برای سلامتی مسافران درون آن شود. به همین جهت نیاز است که تعداد پایه‌های نگهدارنده را میان لوله‌ها برای مقابله با این مشکل افزایش داد و این به معنای صرف هزینه بسیار

نیروی نامساعد مقاومت آیرودینامیکی بسیار زیاد به پاد اعمال شده و باعث ناپایداری جهتی پاد می‌شود و حتی ممکن است پاد به دیواره لوله اصابت کند. این در حالی است که در هواپیماها چنین مشکلی وجود ندارد. زیرا حتی در صورت نشستی هوا به داخل کابین هواپیما، مسافران می‌توانند با استفاده از تجهیزات مناسب مثل چتر نجات بلافاصله از هواپیما خارج شوند. ضمناً مشکلات دیگری نیز در این سیستم‌ها وجود دارد که در بخش ۶ به طور مفصل‌تر به آنها پرداخته شده است.

#### ۵- مشخصات فنی سیستم هایپرلودز

در این بخش به بررسی مشخصات فنی شامل ابعاد و اندازه‌ها، ظرفیت حمل مسافر و جرم یک نمونه واقعی طراحی شده از سیستم هایپرلودز پرداخته می‌شود. بر اساس گزارشی از اعضای تیم طراحی هایپرلودز دانشگاه لودز لهستان [۲۷] تحت عنوان «هایپرلودز»، ابعاد هندسی پاد و تیوب برای یک نمونه هایپرلودز با ابعاد حقیقی طراحی شده توسط آنها به قرار جدول ۶ عنوان شده است. ابتدا در شکل ۵ هایپرلودز طراحی شده ملاحظه می‌شود. مطابق شکل ۵، نمای از پشت حرکت کپسول (پاد) هایپرلودز طراحی شده مجهز به پره کمپرسور در داخل خط لوله‌های انتقال مشاهده می‌شود.



شکل ۵ نمای پشت کپسول هایپرلودز به همراه پره کمپرسور و نحوه حرکت کپسول در لوله [۲۷].

جدول ۵ مشخصات فنی نمونه هایپرلودز طراحی شده توسط تیم طراحی هایپرلودز لهستان [۲۷].

پارامتر	مقدار
طول پاد	۲۳ متر
عرض پاد	۲/۸ متر
ارتفاع پاد	۲/۵ متر
قطر لوله	۳/۶ متر
جرم مجموعه پاد	۲۵ تن
ظرفیت مسافر	۳۰ نفر

<sup>1</sup>air lock      <sup>2</sup>thermal expansion



[۸] شرکت برنیکا. تکنولوژی هایپرلوپ، ۲۰۱۷.

- [9] Rodrigue, Jean-Paul. Evolution of transport technology since the 18th century, 2020.
- [10] News, Arirang. World's first hyperloop to be built in dubai by 2021, 2019.
- [11] Ruptly. Abu Dhabi to Dubai in under 12 minutes - virgin unveils high-speed hyperloop pod, 2019.
- [12] Bayut. All about the Dubai-Abu Dhabi Virgin Hyperloop One project, 2020.
- [13] Team, Virgin Hyperloop. Dubai, 2020.
- [14] McFarland, Matt. Virgin hyperloop completes first test with actual passengers, 2020.
- [15] News, CTV. Virgin hyperloop completes first test with actual passengers, 2020.
- [16] Smith, David. The fifth mode. *Construction Research and Innovation*, 7(1):12-15, 2016.
- [17] Ross, Philip E. Hyperloop: no pressure. *IEEE Spectrum*, 53(1):51-54, 2015.
- [18] Dudnikov, EE. Advantages of a new hyperloop transport technology. in *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*, pp. 1-4, 2017.
- [19] Dudnikov, EE. Advantages of a new hyperloop transport technology. in *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*, pp. 1-4, 2017.
- [20] Opgenoord, MMJ, Merian, C, Mayo, J, Kirschen, P, O'Rourke, C, Izatt, G, et al. Mit hyperloop final report. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*, 2017.
- [21] Alexander, Nicholas A and Kashani, Mohammad M. Exploring bridge dynamics for ultra-high-speed, hyperloop, trains. in *Structures*, vol. 14, pp. 69-74. Elsevier, 2018.
- [22] Hallin, Brooks. The hyperloop: A top-down systems engineering evaluation of the technical and economic feasibility. 2014.
- [23] et al., Will Kasper. Batteries of the future: Powering the hyperloop transportation system, 2020.
- [24] Riviera, Matteo and Carpignano, Andrea. High-speed trains comparison to hyperloop: energy and sustainability hyperloop safety analysis and integrations to reach the noah concept. Master's thesis, 2017.
- [25] fast destiny fernandi website. hyperloop-faqs-hyperloop-one-test-mit-team-pros-cons-more, 2017.
- [26] iansutton. hyperloop-generic-safety study and hazards, 2020.
- [27] Team, Hyperloopz University. Design hyperloopz, 2019.
- [28] et al., Andrew Allum. Hyperloop: Coming soon to a station near you?, 2019.

بیشتر است. همچنین باید تا حد امکان مسیر خط لوله‌ها مستقیم باشد و دارای پیچ و خم نباشد که پاد بتواند با سرعت ثابت در آن حرکت کند. زیرا در صورت وضعیت خم بودن بخشی از لوله، هنگام پیچیدن پاد درون لوله با سرعت بسیار زیاد، یک نیروی اینرسی و شتاب جانب مرکز بسیار بالایی به پاد اعمال شده و موجب ناراحتی مسافران می‌شود. همچنین تأمین اکسیژن مورد نیاز مسافران و ایجاد فضای باز کافی در داخل کابین پاد را نیز می‌توان از چالش‌های دیگر این سیستم‌ها محسوب کرد [۲۸-۳۳]. چنانکه ملاحظه شد، با وجود مزایای متعدد سیستم هایپرلوپ نسبت به سیستم‌های مشابه دیگر، اما همچنان مسائل و مشکلاتی نیز در این سیستم‌ها وجود دارد که به طور کامل هنوز حل نشده است. اما محققان و صنعتگران امید دارند که تا چند سال آینده این مشکلات نیز برطرف شوند و این فناوری به عنوان مناسب‌ترین و سریع‌ترین سیستم حمل‌ونقل در بسیاری از کشورهای جهان اجرایی شود.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به معرفی سیستم هایپرلوپ پرداخته شد. پس از بیان تاریخچه اختراع این سیستم توسط ایلان ماسک، اجزای مختلف تشکیل دهنده سیستم معرفی شدند. پس از آن به امکان‌سنجی استفاده از هایپرلوپ در سطح شهرها و هزینه‌های تمام شده ساخت و تولید اجزای آن پرداخته شد. سپس عملکرد این سیستم‌ها از جنبه‌های مختلفی چون میزان مصرف انرژی، سرعت، هزینه‌های تولید و سفر و موارد دیگر با سایر فناوری‌های حمل‌ونقل مورد مقایسه قرار گرفت. مشخصات فنی یک نمونه از این سیستم‌ها بررسی شد و در نهایت چالش‌ها و موانع پیشرفت عملی شدن استفاده از این سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفته شد. تاکنون با توجه به گزارش‌های ارائه‌شده درباره هایپرلوپ، می‌توان بیان کرد که این سیستم‌ها جدیدترین و سریع‌ترین سیستم حمل‌ونقل در جهان خواهند شد و همچنین از لحاظ میزان مصرف انرژی و ایمنی سفر در وضعیت مناسبی نسبت به سیستم‌های حمل‌ونقل دیگر قرار دارند؛ اما هنوز مسائلی فنی متعددی در این خصوص وجود دارد که یکی از آنها ایجاد شتاب گریز از مرکز بالا هنگام چرخش پاد داخل خط لوله‌های انتقال و همچنین نویز و آلودگی صوتی زیاد این سیستم‌ها به دلیل سرعت زیادشان است.

## مراجع

- [1] wikipedia. Wiki/Hyperloop hyperloop, 2020.
- [2] Musk, Elon. Hyperloop alpha. *SpaceX: Hawthorne, CA, USA*, 2013.
- [3] virgin hyperloop company. Virgin hyperloop, 2020.
- [4] spaceX company. spacex/hyperloop, 2020.
- [5] HyperloopTT company. the first breakthrough transportation in a century, 2020.
- [6] youtube/Tech-Insider company. the science behind the hyperloop, 2015.

[۷] صیاد، حسین. اولین آزمایش واقعی هایپرلوپ وان، با موفقیت انجام شد، ۲۰۱۷.

- [32] Hawkins, Andrew J. Virgin hyperloop hits an important milestone: The first human passenger test, 2020.
- [33] (BTS), British Tunelling Society. Bts hyperloop challenge: Tunnels for hyperloop, 2020.
- [29] interesting engineering. Biggest challenges stand in the way of hyperloop, 2017.
- [30] (by Gareth Dennis), Railway Gazette. Don't believe the hype about hyperloop, 2018.
- [31] Hyperloop), Hyperloopconnected Company (Delft. Challenges for the hyperloop, 2019.