یادداشت پژوهشی

کاهش مصرف انرژی در حمل و نقل ریلی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

محمد علی صندیدزاده، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

زهرا پورانیان (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مهران موحدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حمید حسن آبادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

Email: pooraniyan@rail.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۰۲ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۲

چکیده:

روند رو به رشد استفاده از حمل و نقل ریلی، به عنوان یکی از ارکان صنعت جابجایی مسافر و کالا از یک سوی و کاهش روزانه منابع نفتی در دسترس و در نتیجه سوخت مصرفی و همچنین رفع مشکل آلودگی محیط زیست از سوی دیگر، ضرورت مطالعه و تحقیق هر چه بیشتر در حوزه بهینه سازی مصرف انرژی در صنعت حمل و نقل ریلی را روشن می سازد. از جمله الگوریتم های هوشمند و توانمند در حل مسائل بهینه سازی، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO[1]) است. برخلاف روشهای بهینه سازی کلاسیک که اغلب محاسبات پیچیده و زمان‌بری دارند، در این مقاله از یک الگوریتم هوشمند جهت بهینه سازی سوخت مصرفی در حمل و نقل ریلی استفاده شده است که موجب تعیین سریع تر جواب بهینه در عمل برای راهبر می شود. به منظور تبیین هرچه بیشتر روش پیشنهادی و نیز ارزیابی کارایی آن، چندین سناریو مطرح گردیده و شبیه سازی های مربوطه صورت گرفته است که در طی مقاله به تحلیل آنها پرداخته می شود.

واژه های کلیدی: بهینه سازی ازدحام ذرات، حمل و نقل ریلی، کاهش مصرف انرژی.

۱. مقدمه

تا کنون تحقیقات گسترده ای در زمینه کاهش مصرف سوخت در حوزه حمل و نقل ریلی صورت گرفته که از جمله مهم‌ترین آنها می توان به استفاده از شبکه های عصبی، الگوریتم های ژنتیک [Wei, Qunzhan and Bing, 2009] و [Qun-zhan and Bing, 2009] ، کنترل فازی [Khanbaghi and Malhame, 1994]،کنترل بهینه [Howlett, Mil-roy and Pudney, 1994] و ترکیبی از چندین روش کنترلی [Wai, Huang and Chen, 2012] در این زمینه اشاره کرد. سودمندی استفاده از الگوریتم های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، در یافتن استراتژی بهینه حرکت به اثبات رسیده است[Azadi, Mirabadi and Sandidzadeh, 2006]. اما یکی دیگر از الگوریتم های هوشمند و بسیار توانمند در مباحث بهینه سازی، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات است که در ادامه این الگوریتم به عنوان روشی برای بهینه سازی انرژی مصرفی قطار، شرح داده می‌شود.

۲. مدلسازی قطار

به‌منظور مدلسازی انرژی قطار، با استفاده از مفهوم شارش انرژی در سیستم های نیروی محرکه و ترمزی و نیز با در نظر گرفتن «مکان» به عنوان متغیر مستقل، حرکت جرم نقطه‌ای قطار به شکل معادلات زیر بیان می شود:

$$v\frac{dv}{dx}=\begin{cases}\dfrac{Hf(j)}{v}-r(v)+g(x)\\ -K(j)-r(v)+g(x)\end{cases} \qquad (۱)$$

که در آن $j=j(x)$ تنظیمات کنترلی، $f(j)$ نرخ سوخت مرجع برای تنظیمات کنترلی، j و H ثابت سوخت مصرفی و $K(j)$ شتاب ترمزی برای تنظیمات کنترلی j است. $g(x)$ نیروی گرانش وارد بر قطار در مکان‌های متفاوت بر حسب نیوتن و $r(v)$ نیروی مقاوم آیرودینامیک در برابر حرکت قطار بر حسب نیوتن است که بر حسب شیب سطح تعیین می شود و $r(v)$ نیروی مقاوم آئرودینامیک دیویس است که عبارت است از $r(v)=a+bv+cv^2$ که در آن ضرایب ساختاری قطار به صورت $a=0.015$, $b=3\times10^{-5}$, $c=6\times10^{-6}$ در نظر گرفته شده اند. همچنین $j=1$ مربوط به حالت شتابگیری با $f(j)=f$, $k(j)=0$، $j=0$ مربوط به حالت خلاصی با $f(j)=0$, $k(j)=0$ و $j=-1$ مربوط به حالت ترمزگیری با $f(j)=0$, $k(j)=-1m/s^2$ می‌باشند و تابع هزینه به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$J=\int_0^x\frac{f(j)}{v}dx \qquad (۲)$$

قطار با جرم توزیع شده:

در مورد قطار با جرم توزیع شده معادله حرکت برابر است با:

$$v\frac{dv}{dx}=\varphi_j(v)-r(v)+\frac{1}{M}\int_0^s\rho(s)g(x+s)ds \qquad (۳)$$

که در آن $\emptyset_j(V)$ شتاب قطار برای تنظیمات کنترلی j برحسب متر بر مجذور ثانیه، v سرعت بر حسب متر بر ثانیه، M جرم قطار بر حسب کیلو گرم برای فاصله S نسبت به ابتدای قطار است و S طول قطار برحسب متر است.

اگر شتاب گرانشی مؤثر به صورت زیر تعریف شود:

$$\bar{g}(x)=\frac{1}{M}\int_0^s\rho(s)g(x+s)ds \qquad (۴)$$

معادله (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$v\frac{dv}{dx}=\varphi_j(v)-r(v)+\bar{g}(x) \qquad (۵)$$

با توجه به شتاب گرانشی مؤثر به صورت $\bar{g}(x)=-g\sin\bar{\theta}(x)$ ، پروفیل ارتفاع مؤثر عبارت است از :

$$\bar{y}(p)=y(0)+\int_0^p\sin\bar{\theta}(x)dx \qquad (۶)$$

بنابراین معادله موازنه انرژی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\left[\frac{1}{2}Mv^2-\frac{1}{2}Mv_0^2\right]+Mg\left[\bar{y}(p)-\bar{y}(0)\right]= \qquad (۷)$$
$$M\int_0^p\left[\varphi_j(v)-r(v)\right]dx$$

به این معنی که مجموع تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی با کار

انجام شده توسط قطار برابر است.

۳. استراتژی بهینه راهبری قطار

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات(PSO) برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توصیف شد [Kennedy, J. and Eberhart, R,1995]. PSO از جمله الگوریتم‌های جستجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است.در PSO، ذرات[۲] در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است. بنابراین موقعیت ذرات دیگر روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه‌ی مدل‌سازی این رفتار اجتماعی، فرآیند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی مطلوب میل می‌کنند. ذرات از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به دست آمده به سمت بهترین همسایگان خود حرکت می‌کنند.

۳-۱ مدل اولیه الگوریتم PSO

با توجه به اینکه هر ذره در فضا دارای یک موقعیت است x^i و متناظر با این موقعیت می توان معیار مربوط به آن (تابع هدف) را محاسبه کرد، هر ذره علاوه بر موقعیت دارای یک بردار سرعت v^i نیز هست. همچنین بهترین موقعیت تجربه شده برای هر ذره $x^{i,best}$ نیز باید مورد بررسی قرار گیرد و تابع هدف متناظر با آن محاسبه شود. بر این اساس معادله توصیف کننده رفتار ذرات در الگوریتم PSO عبارت است از:

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \quad (۸)$$

$$v^i[t+1] = w\, v^i[t] + c_1 r_1 \left(x^{i,best}[t] - x^i[t]\right) + c_2 r_2 \left(x^{gbest}[t] - x^i[t]\right) \quad (۹)$$

که متغیرهای این روابط در جدول ۱ آورده شده است:

با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات مربوط به یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمعیت، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. پس از انجام حرکت جمعی، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شود تا درنهایت جواب مورد نظر به دست آید.

جدول ۱. متغیرهای مربوط به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

موقعیت ذره i ام	$x^i[t]$
موقعیت بعدی ذره i ام	$x^i[t+1]$
سرعت ذره i ام	$v^i[t]$
سرعت ذره i ام در موقعیت بعدی	$v^i[t+1]$
بهترین موقعیت تجربه شده برای ذره i ام	$x^{i,best}[t]$
بهترین موقعیت تجربه شده در کل جمعیت	$x^{gbest}[t]$
ضریب یادگیری شخصی	$0 \le c_1 \le 2$
ضریب یادگیری جمعی	$0 \le c_2 \le 2$
ضریب اینرسی	$0.4 \le w \le 0.9$
اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت	r_2, r_1

۴. شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله هدف از بهینه سازی، به حداقل رساندن انرژی مصرفی قطار به کمک استراتژی‌های کنترلی راهبری، برای قطاری است که فاصله بین دو ایستگاه را در یک زمان مشخص طی می‌کند، به این منظور از ترتیب‌های مختلف شتاب – خلاص –ترمز در راهبری قطار، استراتژیهای مختلف کنترلی حاصل می‌شود.

اگر فرم کلی این استراتژی ها به صورتی فرض شود که ابتدا یک ناحیه شتاب تا سرعت W، سپس یک ناحیه شامل یک یا چند جفت خلاص – شتاب (خلاص تا سرعت V و سپس شتاب تا سرعت W)،سپس ناحیه خلاص تارسیدن به سرعت U و در نهایت ناحیه ترمز باشد، می توان با انتخاب W،VوU یک استراتژی کنترلی از نوع بهینه برای حداقل کردن مصرف سوخت ارایه کرد.

۴-۱ بیان مسئله از دیدگاه بهینه سازی

در این مقاله به دنبال تعیین سرعتهای مرزی (W: سرعتی که باید در آن قطار خلاص شود،V: سرعتی که باید در آن عمل شتابگیری صورت گیرد وU: سرعتی که باید در آن قطار ترمز بگیرد) هستیم، به گونه ای که مسافت X (فاصله بین دو ایستگاه) در حداکثر زمان T و با هدف حداقل کردن سوخت مصرفی با تابع هزینه‌ی رابطه (۲) طی شود.

مسئله ذکر شده یک مسئله بهینه سازی با شرایط مرزی است که Howlett با استفاده از تحلیل پونتریاگن و لاگرانژ و تعیین متغیرهای لاگرانژ توانستند معادلات کلیدی را برای یافتن W،VوU به منظور رسیدن به یک استراتژی کنترلی از نوع بهینه، به دست آورند [cheng J., Howlett P., 1992].

در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، مسئله فوق تحلیل شده و W،VوU برای رسیدن به یک استراتژی کنترلی از نوع بهینه، به دست آمده‌اند و سناریوهای مختلفی به کمک نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است.

۵. پیاده سازی

در تحقق مسئله بهینه سازی فوق به کمک الگوریتم ازدحام ذرات، جامعه‌ای از ذرات بصورت بردار $[W \quad V \quad U]$ به عنوان بردار موقعیت هر ذره در نظر گرفته شده است که در آن شرایط $U \prec W$, $V \prec W$, $W \leq 100$ برقرار است. خاطره مطلوب و سرعت اولیه هر ذره در ابتدای الگوریتم، بردار صفر هستند وخاطره مطلوب جمعی[۳] پس از یکبار محاسبه تابع هزینه برای ذرات به دست می آید.

پس از این مرحله و با شروع الگوریتم بر اساس معادلات (۸) و (۹) ، موقعیت ذرات در جهت حداقل کردن تابع هزینه (۱۰) تغییر می‌کند.

تابع هزینه نهایی برای دستیابی به یک استراتژی کارآمد و از نوع بهینه به صورت زیر تعریف شده است،

$$\bar{J} = J + (x - X)^2 + (t - T)^2 \qquad (۱۰)$$

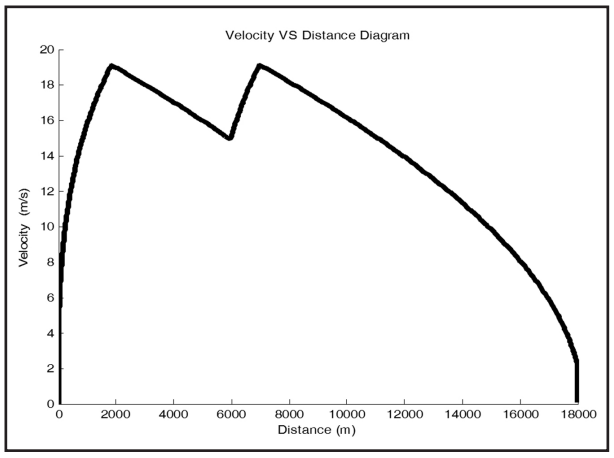
که در آن J تابع هزینه رابطه (۲)، x مسافت طی شده با سرعتهای مرزی $[W \quad V \quad U]$ و t زمان مسافرت هستند. X و T به ترتیب مسافت بین دو ایستگاه و زمان مطلوب برای طی این مسافت با توجه به جدول زمان‌بندی هستند. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، در ادامه چندین سناریو بر مبنای تابع هزینه رابطه (۱۰) آورده شده است که بر اساس مسافت بین دو ایستگاه، مدت زمان طی این مسافت و نرخ سوخت با توجه به تنظیمات کنترلی بیان شده است. که در هر سناریو نتایج شبیه سازی با استفاده از این روش آورده شده است (شکل های ۱-۱ تا ۶-۲). لازم به ذکر است واحد تمامی سرعت ها متر بر ثانیه است.

۵-۱ سناریوی اول: فاصله دو ایستگاه :۱۸۰۰۰ متر

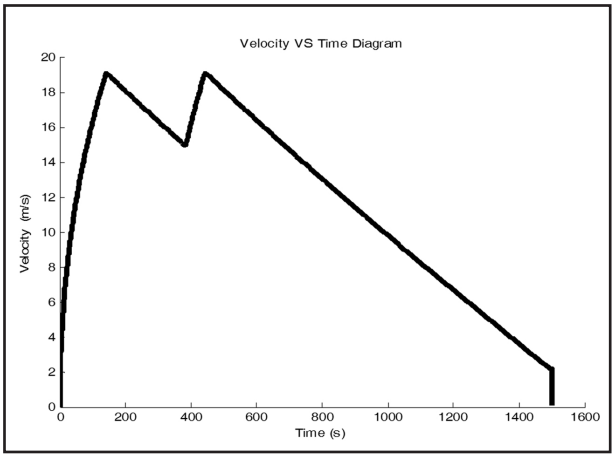
زمان :۱۵۰۰ ثانیه　　سطح:بدون شیب

حالت ۱: در استراتژی کنترلی از یک جفت خلاص – شتاب استفاده شود.

J	W	V	U	X	T
۲۰۱,۰۳۲۸	۱۹,۱۰	۱۵	۲,۲۰	۱۸۰۰۰	۱۵۰۲



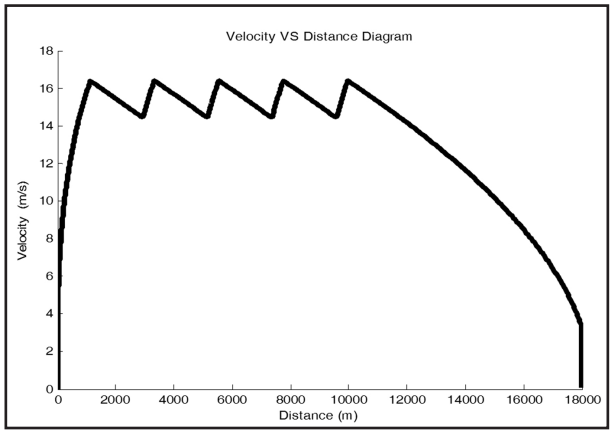
شکل ۱-۱. استراتژی کنترلی با یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب فاصله)



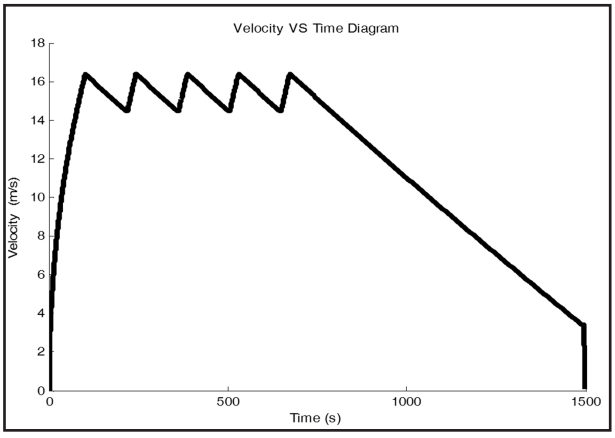
شکل ۱-۲. استراتژی کنترلی با یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب زمان)

حالت ۲ : در استراتژی کنترلی از ۴ جفت خلاص – شتاب استفاده شود.

J	W	V	U	X	T
۲۰۱,۱۱۷۱	۱۶,۳۹۲۶	۱۴,۴۹۲۶	۳,۳۹۱۷	۱۸۰۰۰	۱۴۹۹,۳



شکل ۲-۱. استراتژی کنترلی با چهار جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب فاصله)

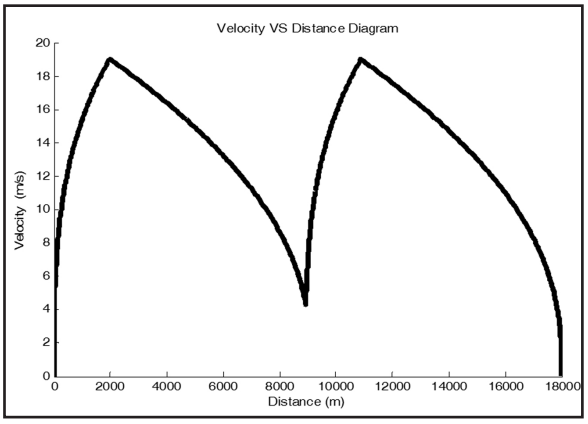


شکل ۲-۲ . استراتژی کنترلی با چهار جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب زمان)

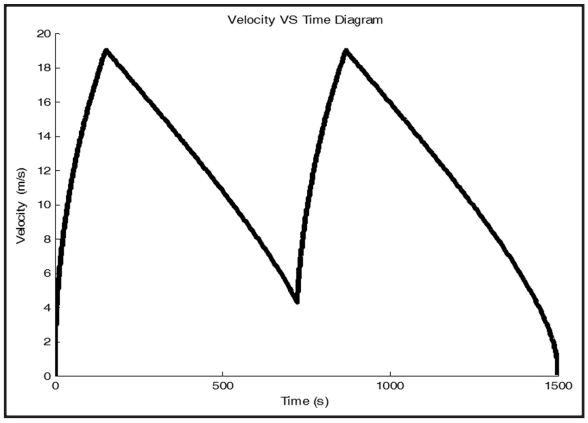
۵-۲ سناریوی دوم: فاصله دو ایستگاه:۱۸۰۰۰ متر زمان:۱۵۰۰ ثانیه سطح: شیبدار با شیب مثبت۱/۱۰۰

حالت ۱: در استراتژی کنترلی از یک جفت خلاص – شتاب استفاده شود.

J	W	V	U	X	T
۲۹۸,۶۸۳۰	۱۹,۰۰۴۳	۴,۳۰۴۳	۰,۹۰۳۴	۱۸۰۰۰	۱۵۰۰



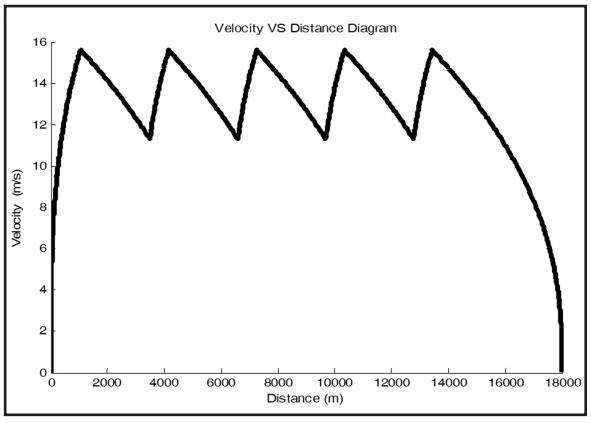
شکل ۳-۱. استراتژی کنترلی با یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب فاصله)



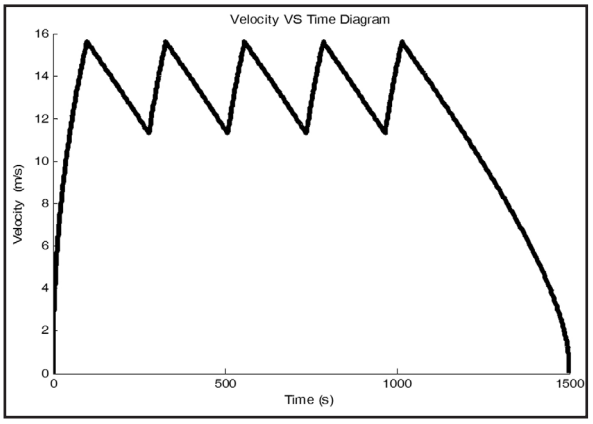
شکل ۳-۲. استراتژی کنترلی با یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب زمان)

حالت ۲: در استراتژی کنترلی از ۴ جفت خلاص – شتاب استفاده شود.

J	W	V	U	X	T
۲۹۵,۹۰۲۳	۱۵,۶۰۸۹	۱۱,۳۰۸۹	۰,۸۰۸۹	۱۸۰۰۰	۱۴۹۹,۹



شکل ۴-۱. استراتژی کنترلی با چهار جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب فاصله)



شکل ۴-۲. استراتژی کنترلی با چهار جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب زمان)

همان طور که از مقدار تابع هزینه مشخص است زمانی که قطار در سطح شیبدار مثبت است، مقدار تابع هزینه افزایش یافته و اگر تعداد جفت کنترلها افزایش داده شوند، مقدار آن تا حدی کاهش می یابد که با توجه به اینکه تعدد جفت کنترل ها برای راهبر دشوار است، می توان از آن صرف نظر کرد.

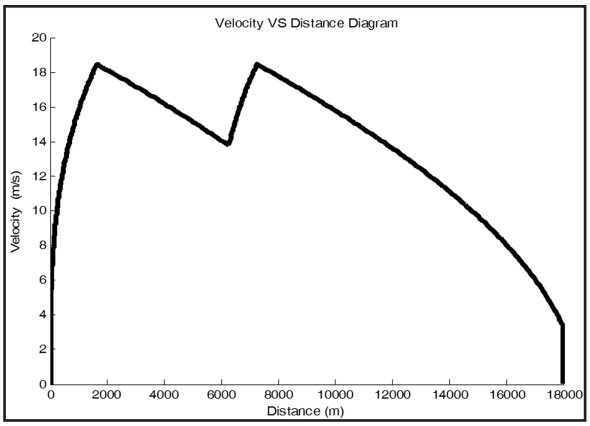
۵-۳ سناریوی سوم: فاصله دو ایستگاه :۱۸۰۰۰ متر

زمان :۱۵۰۰ ثانیه

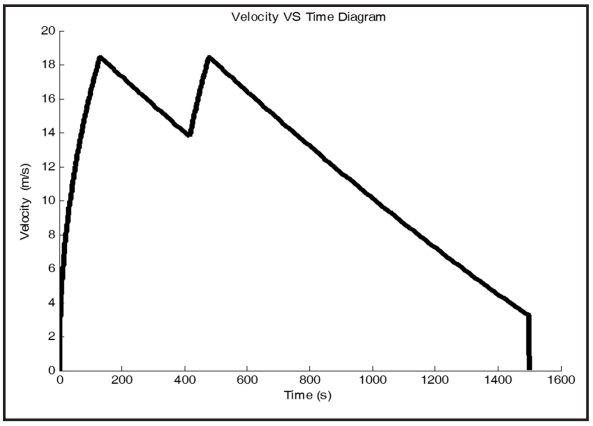
سطح : شیبدار با شیب منفی۱/۱۰۰۰

حالت ۱: در استراتژی کنترلی از یک جفت خلاص – شتاب استفاده شود.

J	W	V	U	X	T
۱۹۲,۱۰۷۱	۱۸,۴۶۵۷	۱۳,۷۶۵۷	۳,۳۰۷۳	۱۸۰۰۰	۱۵۰۰



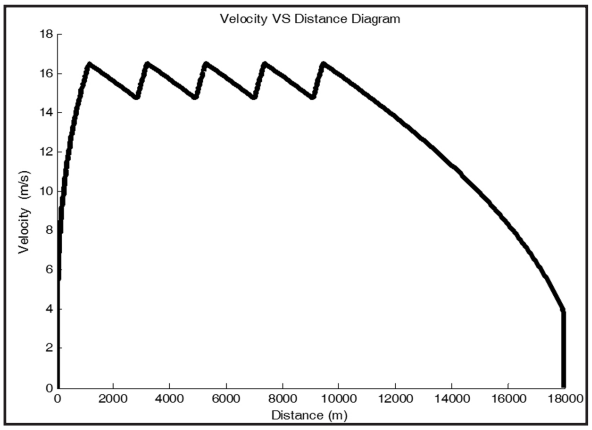
شکل ۵-۱. استراتژی کنترلی در حالت یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب فاصله)



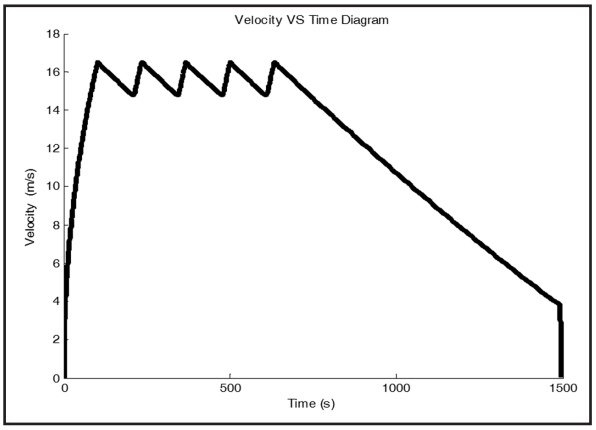
شکل ۵-۲. استراتژی کنترلی در حالت یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب زمان)

حالت ۲: در استراتژی کنترلی از ۴ جفت خلاص – شتاب استفاده شود.

J	W	V	U	X	T
۱۹۲,۳۴۷۰	۱۶,۴۹۰۹	۱۴,۷۸۱۱	۳,۸۱۰۲	۱۸۰۰۰	۱۵۰۰



شکل۶-۱. استراتژی کنترلی در حالت چهار جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب فاصله)



شکل ۶-۲. استراتژی کنترلی در حالت یک جفت خلاص – شتاب (نمودار سرعت بر حسب زمان)

۵-۴ تحلیل نتایج

همان طور که در جداول مقادیر حاصل از شبیه‌سازی سناریوها آورده شده است، مقدار سوخت مصرفی (تابع هزینه) در سناریوی شماره ۲ (حرکت با شیب مثبت: سربالایی)، سناریو شماره ۱ (حرکت بدون شیب)و سناریو شماره ۳ (حرکت با شیب منفی: سرپایینی) به ترتیب کاهش می‌یابد. سناریو شماره ۲ (مسیر سربالایی) نسبت به سناریو شماره ۱ (مسیر مسطح) در مقدار V تفاوت دارد، همان طور که انتظار می‌رفت مقدار V در سناریو شماره ۲ بسیار کمتر از سناریو شماره ۱ است، به این معنی که قطار در سربالایی، بازه سرعتی بیشتری را با حرکت خلاص طی می‌کند تا انرژی کمتری مصرف کند. مقادیر W در هر سه سناریو تقریباً یکسان است که این امر نشان‌دهنده این مطلب است که شیب مسیر در در مقدار سرعت حداکثری که قطار در پروفایل سرعت خود طی می‌کند، تأثیر چندانی ندارد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله مسئله بهینه سازی مصرف انرژی در قطار مورد بررسی قرار گرفت و استراتژی های کنترلی از نوع بهینه به کمک الگوریتم هوشمند بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)، طراحی شد. از مزایای این روش نسبت به روشهای دیگر بهینه سازی، می توان به عدم نیاز به محاسبات ریاضی مربوط به تعیین ضرایب لاگرانژ، یافتن پاسخ برای هر مسافت و زمان منطقی اجرای الگوریتم اشاره کرد.

پاسخ به دست آمده از این روش، همانند روش لاگرانژ لزوماً حداقل مطلق نیست، که این امر یکی از معایب این روش است. ولی به هر حال یک پاسخ از نوع بهینه، با سرعت محاسباتی مناسب در اختیار راهبر قرار می‌دهد. در نهایت پیشنهاد می شود، این روش در حالت محدودیت سرعت نیز بررسی شود که به عنوان موضوعی جهت تحقیقات آتی توصیه می‌شود.

۷. پی نوشتها

1- Particle Swarm Optimization

2- Particle

3- Global best

۸. مراجع

-Cheng J. and Howlett, P. (1992) "Application of critical velocities to the minimisation of fFuel consumption in the control of trains", Automatica, vol 28,pp165-169.

-Howlett, P., Milroy I. and Pudney, P. (1994), "Energy – Efficient Train Control", Control Eng. Practice, Vol.2, No. 2.

-Kennedy, J. and Eberhart, R.(1995) "Particle swarm optimization", IEEE Conference.

-Khanbaghi, M. and Malhame, R.P. (1994) "Reducing travel energy costs for a subway train via fuzzy logic controls", Intelligent Control Symposium.

-Qunzhan, L. and Bing, T. (2009) "Energy saving train control for urban railway train with multi-population genetic algorithm ", Information Technology and Applications, IFITA '09 Conference.

-Wei, L.,Qunzhan, L. and Bing, T. (2009), "Energy saving train control for urban railway train with multi-population genetic algorithm", International Forum on Information Technology and Applications.

-Wai, R. J., Huang, Y.C. and Chen, Y. C. (2012) " Design of intelligent long-term load forecasting with fuzzy neural network and particle swarm optimization", Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), Conference.

۱. آزادی، سامان ، میرآبادی، احمد و صندیدزاده، محمد علی (۱۳۸۵) "بهینه سازی مصرف انرژی قطار با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، هفتمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران.