بهبود سیستم هدایت اتوماتیک قطار با استفاده از بهینه سازی دینامیکی فازی و کنترل چند مرحله ای

محمدعلی صندیدزاده
استادیار
دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

محمدباقر منهاج
دانشیار
دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

در این مقاله روشی جدید بر مبنای کنترل چند مرحله‌ای فازی و بکارگیری تکنیکهای بهینه‌سازی هوشمند جهت کنترل حرکت قطار و بهبود در سیستم هدایت اتوماتیک آن ارائه میشود. در این روش ابتدا تابع انرژی توسط بهینه‌سازی مقید (Constrained Optimization) و استفاده از شرایط کان ـ تاکر (Kuhn-Tucker) با اقتباس از تحقیقات موجود مینیمم شده و نقاط سوئیچینگ تغییرات شگردهای کنترلی از حالت شتاب‌گیری به سرعت ثابت، خلاص و ترمزی با ملاحظه مشخصات خط شامل شیب و قوس و مدل عملی قطار بدست می‌آیند. این نقاط جواب زیر بهینه‌ای از هدایت اتوماتیک قطار را فراهم می‌نماید که مواجه با مشکلات تحقق عملی است. سپس با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی دینامیکی فازی[1] مجموعه‌ای از اهداف کنترلی نظیر دقت در تعقیب سرعت و مسافت و ایمنی که توام با نامعینی می‌باشد در قسمتی از حرکت قطار بهینه می‌گردند. حاصل این بهینه‌سازی که به صورت دستورات شتابگیری و حرکت خلاص در اختیار محرکه‌ها قرار می‌گیرند، امکان تحقق عملی کنترل را نتیجه خواهد داد. مزیت عمده این روش آن است که مدت زمان طی فاصله بین دو ایستگاه به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده و بر اساس این زمان که خواسته مراکز کنترل ترافیک میباشد منحنی و نحوه کنترل بهینه حرکت قطار استخراج می‌شود. شبیه‌سازیهای انجام گرفته با روش پیشنهادی، موثر بودن راه حل را نشان میدهد.

کلمات کلیدی

کنترل اتوماتیک قطار، کنترل هوشمند قطار، کنترل و سیگنالینگ راه آهن

Automatic Train Control Impreovement Using Fuzzy Multistage Dynamic Optimization

M. A. Sandidzadeh
Assistant Professor
School of Railway Engineering,
Iran University of Science and Technology

M. B. Menhaj
Associate Professor
Electrical engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

In this paper a new method based on multistage fuzzy control using intelligent optimization techniques is proposed to optimize the automatic train control system. In this method the energy function which elaborates the train power consumption is first minimized by applying Kuhn-Tucker conditions. As a result the switching points at which the control strategies are changed between acceleration, coasting, constant speed and braking are determined considering the track specifications including gradients and curvatures as well as the practical train model. Since in constant speed strategy the energy optimization leads to infinite changes in control inputs which is not practically possible, a multistage fuzzy control based on fuzzy dynamic programming with fuzzy termination time is incorporated to overcome this difficulty. Multistage fuzzy control will optimize *other significant goals involving safety, traceability in speed and accuracy in distance and limit the number of switching among different strategies. Hence the method will satisfy the practical requirements. This method considers the running time between two stations as independent and controllable variables, therefore the calculated strategies are very useful and appropriate for traffic control which the time regulations make a vital and important role. The simulation results will demonstrate the efficiency of proposed method.*

Keywords
Automatic Train Control, Intelligent Train Control, Railway Signalling Control.

مقدمه

هدایت اتوماتیک قطار به معنی طراحی یک سیستم کنترل برای جایگزینی راننده و انجام کلیه عملیات هدایت قطار از ایستگاه مبدا به ایستگاه مقصد با مشخصات خاص خط می‌باشد تا علاوه بر فراهم کردن دستورات شتاب و ترمز به محرکه‌ها، معیارهای کارآیی مختلف همانند راحتی مسافر، دقت در سرعت گیری، دقت در توقف، ایمنی حرکت و صرفه جویی در انرژی مصرفی و اهداف ترافیکی که اکثرا توام با نامعینی و عدم دقت می‌باشند بهینه گردد[۲-۱]. به بیان ریاضی، ورودیهای کنترلی قطار طوری بدست می‌آیند که مجموعه‌ای از اهداف کنترلی $G_1, G_2, \ldots G_M$ و قیدهای کنترلی $C_1, C_2, \ldots C_N$ که بعضا در مغایرت با یکدیگر می‌باشند بهینه شوند. در نظر گرفتن این اهداف در تولید منحنی حرکت قطار به معنی تصمیم در تغییر ورودی‌های کنترل یعنی میزان شتاب‌گیری و ترمزگیری و نیز تصمیم در محل و زمان تغییر از یک مرحله همانند شتابگیری به مرحله دیگر نظیر سرعت ثابت و غیره می‌باشد با این واقعیت که مشخصات نیروی رانش که از موتورهای تراکشن قطار بدست می‌آیند به صورت گسسته عوض شده و خود تابع سرعت بوده و چگونگی تغییر آن در هر منحنی غیر قابل کنترل است.

دستور صادره از مرکز فرمان یا کنترل ترافیک که وظیفه نظارت بر کل شبکه را برعهده دارد، شامل مدت زمان حرکت قطار از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر است. این دستور بر اساس محاسبات مرکز فرمان و بسته به آلگاریتم‌های تنظیم ترافیک صادر می‌شود[۳]. سیستم کنترل قطار بر اساس این خواسته و اهداف دیگر باید به نحوی منحنی حرکت را تولید کند که تصمیم اتخاذ شده بهینه باشد. ارتباط مرکز فرمان با قطار می‌تواند از طریق واسطه‌های رادیویی بصورت تبادل داده برقرار شود. پس به عبارتی مسئله کنترل این است که قطار با فرض ابلاغ دستور مرکز فرمان مبنی بر مدت زمان حرکت و داده‌های خط شامل شیب و قوس و با توجه به ساختار دینامیکی قطار و محرکه‌های بکار رفته، کنترل کننده‌های مربوط به شتاب، ترمز و حرکت خلاص را در طول مسیر طوری بکار گیرد تا اهداف و قیدهای کنترلی نظیر راحتی مسافر، دقت در سرعتگیری، دقت در توقف و صرفه جویی انرژی نیز بهینه شوند.

هدایت اتوماتیک قطار تاکنون به چند روش بکار رفته است که عمده‌ترین آنها عبارتند از: روش مدار راه و ارسال گسسته، روش ارسال اطلاعات ایستگاهی، روشهای کلاسیک و روش کنترل فازی پیشگو.

در روش مدار راه و ارسال گسسته، دستورات مربوطه توسط فرستنده‌هایی که هریک به بخشی از ریل متصل است به قطار ارسال می‌گردند[۶،۵،۴]. در روش ارسال اطلاعات ایستگاهی حرکت قطار به صورت نرمال، تند و کند با در نظر گرفتن سقف سرعت (حالت تند)، و مقادیر کمتر از سقف برای حرکت نرمال و یا کند انجام میگیرد و دستور مربوطه از طریق واسطه رادیویی در هر ایستگاه به قطار ابلاغ میگردد[۷،۲]. در تمامی روشهای بالا زمان به عنوان متغیر غیر قابل کنترل تعریف میشود و لذا نمیتوان منحنی بهینه‌ای یافت که در زمان تعیین شده و مورد درخواست مرکز کنترل ترافیک، قطار را به ایستگاه بعد برساند. بلکه انتخاب منحنی بهینه، زمان را به صورت غیر مستقیم نتیجه داده و در اختیار کنترل ترافیک قرار می‌دهد. بدیهی است که این محدودیت، قابلیت انعطاف آلگاریتم‌های ترافیکی را که مسئولیت زمان بندی حرکت قطارها را برعهده دارندکاهش می‌دهند. ضعفهای دیگر این روشها نقاط شکست در منحنیهای تولید شده، در نظر نگرفتن ماهیت چند هدفی بودن مسئله، عدم بهینه‌سازی کامل اهداف و مشکل برخورد با نامعینیهای سیستم و پیچیدگی آن است[۸،۲،۱]. در ادامه در بخش ۲ دینامیک قطار و مسئله کنترل انرژی و فرموله شده سپس در بخش ۳ با استفاده از بهینه‌سازی مقید (Constrained Optimization) شرایط لازم برای وجود جواب بررسی و استراتژی بهینه شدنی استخراج میگردد. بخش ۴

کنترل چند مرحله‌ای فازی را برای تصحیح کنترل بکار بسته و بهینه‌سازی دینامیکی فازی را بکار می‌بندد. شبیه‌سازی‌های انجام شده دربخش ۵ ارائه شده و در نهایت بخش ۶ به نتیجه‌گیری میپردازد.

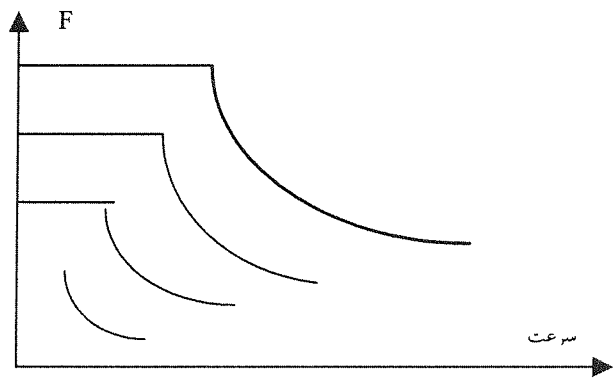
۱ـ فرموله کردن مسئله کنترل قطار و بهینه سازی انرژی

حرکت قطار مواجه با مقاومتهای مختلفی نظیر اصطکاک چرخ با ریل، مقاومت هوا، مقاومت ناشی از شیب و قوس مسیر می‌باشد. در اینجا ذکر این نکته لازم است که تعیین مدل حرکت قطار خصوصا مدل عملی واقعی نیازمند محاسبات مکانیکی سازنده واگن و طراح و مجری ریل‌گذاری می‌باشد و در دنیای صنعتی و سیستم‌های موجود فعلی مهندس کنترل اتوماتیک قطار خود را وارد بحث تعیین مدل مکانیکی نخواهد کرد و صرفا به حل مسئله کنترل بر اساس مدل دریافتی که در شرایط نرمال دارای دقت قابل قبولی است خواهد پرداخت و همین رویه نیز در اینجا استفاده میشود.

با ملاحظه سیستم تراکشن، برق رسانی و موتورهای قطار، این نکته یافت می‌شود که در سیستم‌های فعلی رانش قطار، امکان تغییر نیروی اعمال شده به قطار تنها در مراحل معینی امکان‌پذیر است که توسط مشخصات سیستم موتور و در قالب نمودار نیرو(گشتاور) بر حسب سرعت برای هر قطار داده می‌شود(شکل ۱). به عبارت دیگر میزان شتاب رانش و یا همان منحنیهای تراکشن در سیستمهای عملی به صورت گسسته رفتار مینمایند و با تغییر اهرم کنترلی، منحنی جابجا شده و تغییر ناپیوسته‌ای در نیروی رانش خواهیم داشت. این مسئله در نیروی ترمزی نیز صادق است با این تفاوت که شتاب ترمزی در هر منحنی ثابت بوده و ترمزهای پنوماتیکی و مکانیکی کاهش در نیروی ترمز الکتریکی را جبران می‌نمایند. مطابق شکل ۱ منحنیهای تراکشن شامل دو قسمت گشتاور ثابت و توان ثابت میباشند که در منطقه توان ثابت، گشتاور یا همان نیروی اعمالی متناسب با معکوس سرعت تغییر مینماید. نیروهای مقاوم شیب و قوس وابسته به مسافت بوده و از مشخصات خط بدست می‌آیند. نیروهای مقاوم هوا، اصطکاک و غیره در کل تابعی درجه دو از سرعت خطی قطار خواهند بود که با استفاده از روابط و مدارک سازنده حاصل می‌شوند. فرمول دیویس[۳] یکی از روابط معروف جهت مدل کردن نیروهای مقاوم است که به صورت زیر داده میشود[۹].

$$r = a + bv + cv^2 \qquad (۱)$$

که v سرعت قطار، r نیروی مقاوم و a, b, c ضرایت ثابت هستند.



شکل (۱) تغییرات گشتاور بر حسب سرعت در موتورهای تراکشن قطار.

یکی از توابع هدف که مورد توجه طراحان سیستم‌های راه آهن است تابع انرژی است. یکی از راه حل‌های بدیهی اولیه جهت کاهش مصرف انرژی، طولانی کردن زمان حرکت با کند کردن حرکت و یا ازدیاد حرکت خلاص میباشد اما اگر قرار باشد در مدت زمانی معین فاصله دو ایستگاه طی شود، استراتژی حرکت بهینه باید مد نظر قرار گیرد. در این بخش با فرموله کردن معادلات کنترلی و در نظر گرفتن قیدهایی نظیر محدودیت سرعت در قوس، تاثیر شیب، چند مرحله‌ای و گسسته بودن نیروی

رانش، ابتدا تابع انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با استفاده از روشهای انجام گرفته از طریق تکنیکهای بهینه‌سازی و بکارگیری شرایط کان ـ تاکر (Kuhn-Tucker)، استراتژی اولیه استخراج می‌شود. سپس در بخش‌های بعد با استفاده از بهینه‌سازی فازی سایر اهداف کنترلی راکه بصورت فازی مدل می‌شوند، بهینه می‌نماییم که نتیجه آن تصحیح کنترل خواهد بود. در این روش بر اساس یافتن زمانهای سوئیچینگ و حل بهینه‌سازی فازی میزان کنترل و شگردهای کنترلی تصحیح می‌گردند.

جهت مدلسازی، موقعیت اهرم کنترلی را می‌توانیم با یک متغیر صحیح j نشان دهیم. کنترل j، میزان حداکثر نیروی تراکشن انتخاب شده را نشان می‌دهد. هر مقدار غیر منفی متغیر کنترلی به معنی تراکشن و هر مقدار منفی مقدار ترمز را بیان می‌کند. جهت مدلسازی‌ها ابتدا مشخصه نیروی تراکشن بر حسب سرعت را در منطقه توان ثابت که در آن نیرو متناسب با معکوس سرعت است بیان می‌کنیم، سپس مدل میتواند به کل ناحیه تعمیم یابد. پس با این فرض معادلات حرکت چنین نوشته می‌شوند[۱۰]:

$$
\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= v(t) \\
\frac{dv}{dt} &= \frac{Hf_j}{v(t)} + K_j - r[v(t)] + g[x(t)]
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

که j=j(t) میزان کنترل، f_j توان اعمال شده متناسب با میزان کنترل انتخاب شده، H ضریب ثابت و $K_j \leq 0$ شتاب ترمزی است که میزان آن ثابت بوده و با سرعت تغییر نمیکند. g[x(t)] شتاب ناشی از شیب و r[v(t)] نیروی مقاوم است که از فرمول دیویس (معادله ۱) می‌تواند بدست آید. تابع انرژی چنین بیان می‌شود:

$$
J = \int_0^T f(t)dt \qquad (۳)
$$

که $f(t) = f_{j(t)}$ نیرو (توان) اعمالی و T کل زمان بین دو ایستگاه است.

اگر حالت کلی‌تر بیان شده برای نیروی اعمال شده به موتور را مد نظر قرار دهیم آنگاه می‌توانیم بنویسیم[۱۰]:

$$
\begin{aligned}
& v'(t) = p(f)\theta(v) - r(v) + g(x(t)) \\
& \theta(v) = \begin{cases} \dfrac{1}{v_0} & 0 < v \leq v_0 \\[2mm] \dfrac{1}{v} & v > v_0 \end{cases}
\end{aligned}
\qquad (۴)
$$

که $p(f)$ تابعی وابسته به توان می‌باشد. چون قطار وسیله‌ای با جرم توزیع شده میباشد کل معادلات نوشته شده در بحث بالا میتواند براحتی تعمیم یابد. با در نظر گرفتن قطاری با جرم توزیع شده در حالت کلی می‌توانیم بنویسیم:

$$
v(x)v'(x) = u[x, v(x)] - r[v(x)] + \frac{1}{M}\int_0^S \rho(s)g(x-s)ds \qquad (۵)
$$

که $u[x, v(x)] = u_j(v)$ شتاب کنترل شده قطار در مرحله کنترلی j=j(x) در سرعت v=v(x) بوده، M جرم معادل قطار، $\rho(s)$ جرم بر واحد طول در فاصله s از جلو قطار و S طول قطار می‌باشد. اگر شتاب شیب اصلاح شده برای قطار داده شده با فرمول زیر تعریف شود:

$$\overline{g}(x) = \frac{1}{M}\int_0^S \rho(s)g(x-s)ds \qquad (۶)$$

می‌توانیم بنویسیم: $v(x)v'(x) = u[x, v(x)] - r[v(x)] + \overline{g}(x)$

بدین ترتیب قطار با جرم گسترده نیز می‌تواند بصورت جرم نقطه‌ای تعبیر شود و لذا در ساختار معادلات کنترلی مورد بحث خللی پیش نخواهد آمد.

جهت فرموله کردن مسئله کنترل قطار، فرض می‌کنیم که مجموعه C={-1,0,1,2,…,m} تمامی مقادیر j را نشان دهد و f_j نرخ توان متناظر با کنترل j باشد و داشته باشیم:

$$0 = f_{-1} = f_0 < f_1 < f_2 < \ldots < f_m = 1 \qquad (۷)$$

رشته‌ای از مراحل کنترل را با تعداد مشخص بصورت $\{j(k+1)\}_{k=0,1,\ldots,n}$ در نظر می‌گیریم. مرحله نهایی j(n+1)=-1 مرحله ترمز و مرحله قبل از آن j(n)=0 حرکت خلاص می‌باشد. این کنترل، n مرحله مجزای کنترلی با زمانهای سوئیچینگ $0 = t_0 \le t_1 \le \ldots \le t_{n+1}$ به ما خواهد داد که t_{n+1} زمان توقف قطار بوده و j(k+1) عمل کنترل در بازه (t_k, t_{k+1}) می‌باشد. استراتژی کنترلی با مشخص بودن تعداد مراحل و زمانهای سوئیچینگ می‌تواند بصورت زیر نمایش داده شود:

$$S(\{[\, j(k+1); (t_k, t_{k+1})]\}_{k=0,1,\ldots,n} \qquad (۸)$$

همچنین فرض می‌کنیم $x_k = x(t_k)$ موقعیت قطار در زمان t_k و $\tau_{k+1} = t_{k+1} - t_k$ طول بازه زمانی، $\xi_{k+1} = x_{k+1} - x_k$ مسافت طی شده در زمان (t_k, t_{k+1}) باشد. کل انرژی مصرفی برای این استراتژی بصورت زیر می‌تواند فرموله شود:

$$J = \sum_{k=0}^{n} f_{j(k+1)}\tau_{k+1} \qquad (۹)$$

وقتی $j \ge 0$، فرض می‌شود که توان ثابتی به قطار اعمال و وقتی $j < 0$ شتاب ترمزی ثابتی که مقدار آن منفی است تولید می‌گردد. توان ثابت به معنای کاهش نیرو یا شتاب مثبت در هنگام افزایش سرعت است. با نمایش K_j جهت ترمز می‌توانیم بگوئیم برای $K_j = 0, j \ge 0$ و $K_{-1} = -K$ یک مقدار ثابت منفی است.

حال مسئله می‌تواند چنین بیان شود: فرض کنیم X فاصله دو ایستگاه و T زمان تعیین شده برای طی فاصله باشد، برای تعداد ثابتی از مراحل کنترل $\{j(k+1)\}_{k=0,1,\ldots,n}$ می‌خواهیم زمانهای سوئیچینگ $\{t_k\}_{k=1,2,\ldots,n}$ را طوری تعیین کنیم که $\sum_{k=0}^{n} \tau_{k+1} = T$ و $v(t_0) = 0, v(t_{n+1}) = 0,$ و $\sum_{k=0}^{n} \xi_{k+1} = X$ و تابع هدف انرژی زیر مینیمم گردد:

$$J = \sum_{k=0}^{n} f_{j(k+1)}\tau_{k+1} \qquad (۱۰)$$

یافتن جواب این مسئله ما را به استراتژی بهینه می‌رساند.

۲- شرایط لازم برای یک استراتژی از نوع بهینه

ما خواهان کمینه کردن J با توجه به قیود تساوی $x(\tau) = X, t(\tau) = T$ و قیود نامساوی $\tau_1 > 0, \tau_2 > 0, \ldots, \tau_n > 0$ می‌باشیم. با استفاده از نتایج تحقیقات پودنی و هاولت[۲] برای $\lambda, \mu \in R$ و $v = (v_1, v_2, \ldots, v_n)$ تابع لاگرانژ زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$\ell(\tau,\lambda,\mu,v) = HJ(\tau) + \lambda[X - x(\tau)] + \mu[t(\tau) - T] - \sum_{k=0}^{n-1} v_{k+1}\tau_{k+1}$$

با بکار گیری شرایط کان ـ تاکر (Kuhn-Tucker) داریم:

برای همهk:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \ell}{\partial \tau_{k+1}} = 0 \\ &\lambda[X - x(\tau)] = 0 \\ &\mu[t(\tau) - T] = 0 \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

که ضرایب لاگرانژ v_{k+1} برای همه k غیر منفی می‌باشند.

با محاسبه مشتقات جزئی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} &\lambda V_n - \mu = 0 \\ &\lambda V_k - \mu = V_k r(V_k) \end{aligned} \qquad (۱۲)$$

ایـن دو معادله، سـرعتهای بحرانـی را تعـریف مـی‌کـنـند.جواب معادله $\lambda v_n - \mu = 0$ فقط $v_n = U$ می‌باشد. بنابراین U سـرعتی است که در آن ترمز شروع می‌شود. از آنجا که منحنی y=vr(v) محدب می‌باشد فقط دو جواب برای معادله زیر وجود دارد.

$$\lambda V_k - \mu = V_k r(V_k) \qquad (۱۳)$$

v=V را جـواب کوچکـتر و v=W را جـواب بزرگتر فرض می‌کنیم. برای $k < n$ نتیجه می‌شود که ما باید یا $V_k = V$ و یا $V_k = W$ را داشـته باشـیم. اولیـن سـرعت، سـرعتی اسـت که در آن فاز شتاب منفی کل به فاز شتاب مثبت تغییر می‌یابد و سرعت دوم، سرعتی است که شتاب مثبت کل به شتاب منفی تغییر می‌کند. از آنجا که λ, μ مثبت می‌باشند واضح است که:

$$\begin{aligned} &0 < U < V < W \\ &\mu = \frac{VW[r(W) - r(V)]}{W - V}, \qquad \lambda = \frac{Wr(W) - Vr(V)}{W - V} \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

برای هر رشته یا توالی از مشخصات موتور، پارامترهای λ, μ یک استراتژی از نوع بهینه را تعیین می‌کنند. استراتژی از نوع بهینه در صورت ارضا شدن قیدهای زمان و مسافت با سرعتهای V,W نیز تعریف می‌شود.

بـا تعییـن تعـداد مـراحل کنترلـی سرعتهای بحرانی نیز بدست میآیند. اگر استراتژی بهینه را با n=2q مرحله کنترلی زیر فرض می‌کنیم، خواهیم داشت:

j(1)=j(3)=…=j(2q-1)=m
j(2)=j(4)=…=j(2q)=0

و سرعتهای بحرانی برابر خواهند شد با:

$$\begin{aligned} &V_1 = V_3 = \ldots = V_{2q-1} = W \\ &V_2 = V_4 = \ldots = V_{2q-2} = V \\ &V_{2q} = U(V,W) \\ &U(V,W) = \frac{VW[r(W) - r(V)]}{Wr(W) - Vr(V)} \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

فرض می‌کنیم $\frac{Wr(W)}{H} < f_m$ ، زمان لازم و فاصله برای طی مسافت بین دو ایستگاه چنین خواهد بود.

$$t_q(V,W) = \int_0^W \frac{vdv}{Hf_m - vr(v)} + (q-1)\int_V^W \frac{Hf_m dv}{[Hf_m - vr(v)]r(v)} + \int_{U(V,W)}^W \frac{dv}{r(v)} + \int_0^U \frac{dv}{K + r(v)} \tag{۱۶}$$

$$x_q(V,W) = \int_0^W \frac{v^2 dv}{Hf_m - vr(v)} + (q-1)\int_V^W \frac{Hf_m vdv}{[Hf_m - vr(v)]r(v)} + \int_{U(V,W)}^W \frac{vdv}{r(v)} + \int_0^U \frac{vdv}{K + r(v)} \tag{۱۷}$$

با ارضای قید مسافت و زمان از فرمولهای بالا میتوان سرعتهای بحرانی و در پی آن استراتژی بهینه را یافت.

در کل نتیجه می‌گیریم که برای یک رشته تعیین شده از استراتژیهای کنترل (تعداد مراحل تصمیم‌گیری)، استراتژی بهینه وابسته به دو پارامتر است که سه سرعت بحرانی را تعیین می‌کند. با تنظیم مقادیر سرعتهای بحرانی می‌توانیم مطمئن شویم که استراتژی شدنی است. درکمترین حالت، استراتژی بهینه میتواند شامل پنج مرحله شتابگیری اولیه، یک زوج خلاص و شتاب در حالت نوسان بین سرعتهای بحرانی، یک مرحله خلاص و در نهایت ترمز باشد.

ثابت میشود که استراتژی کلی با هزینه مینیمم باید شامل یک فاز اولیه با ماکزیمم نیرو و بدنبال آن مراحل سرعت ثابت، خلاص و ترمز باشد و تساوی سرعتهای بحرانی که همان حالت سرعت ثابت است دارای کمترین مصرف انرژی است با ادامه استدلال و در نظر گرفتن شیب، قوس و تعمیم مدل، باز نتایج فوق با بکارگیری بهینه‌سازی مقید پابرجاست و میتوان سرعتهای بحرانی و استراتژی بهینه انرژی را استخراج کرد [۱۰].

۳ـ بهینه‌سازی دینامیکی فازی و تصحیح استراتژی

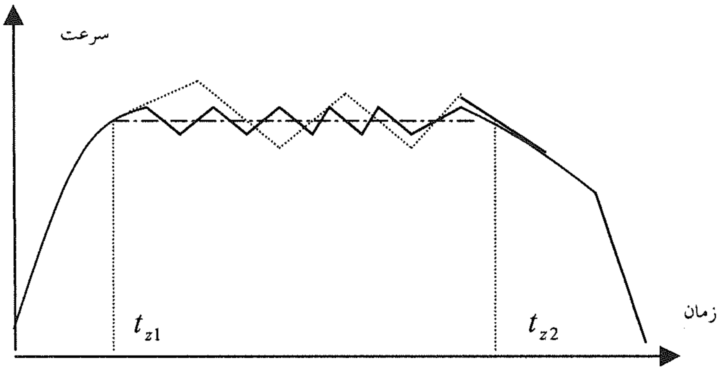
اگر تعداد مراحل کنترلی از قبل مشخص باشند دیدیم که نقاط سوئیچینگ متناظر بدست میآید و این نقاط با تغییر تعداد مراحل کنترلی جابجا میشوند. حال سوال این است که واقعا چه تعداد مراحل کنترلی برای مسئله کنترل قطار با درنظر گرفتن اهداف جانبی دیگر لازم است. با ملاحظه شکل ۲ مشاهده میکنیم که ما دسته‌ای از استراتژیهای بهینه را با توجه به تعداد مراحل کنترلی متفاوت در اختیار داریم. در واقع این استراتژیهای بهینه از حل مسئله بهینه‌سازی انرژی حاصل شده‌اند. اگر فرض کنیم که سرعت بحرانی حالت ایده آل Z، زمان رسیدن به این مقدار سرعت ثابت t_{z1} و موقعیت این نقطه x_{z1} باشد، آنگاه این زمان کمترین زمانی است که به سیستم اجازه میدهد تا شگرد شتابگیری را در این نقطه تغییر دهد. علت این امر آن است که سرعت بحرانی حالت ایده‌آل از سایر سرعت‌های بحرانی مربوط به تغییر شتاب مثبت به منفی کمتر است. طبیعی است که انتخاب تعداد مراحل کنترلی کمتر، دارای سرعت بحرانی بیشتر و در نتیجه زمان سوئیچینگ بزرگتر خواهد بود. این زمان سوئیچینگ بزرگتر را t_{s1} مینامیم.

همچنین اگر در انتهای فاز سرعت ثابت حرکت ایده آل، زمان تغییر از سرعت ثابت به شگرد کنترلی حرکت خلاص را t_{z2} و موقعیت مکانی را x_{z2} درنظر بگیریم. میتوانیم بگوئیم که سرعت بحرانی Z برای تغییر از شتاب مثبت به شتاب منفی در مرحله پایانی یعنی مرحله‌ای که پس از آن با دو مرحله خلاص و ترمز قطار متوقف خواهد شد، کمترین سرعتی است که این تغییر شگرد را امکان‌پذیر میسازد. در پی آن زمان t_{z2} بزرگترین زمانی است که در آن این تغییر رخ میدهد. در اینجا نیز بکارگیری تعداد مراحل کنترلی کمتر باعث خواهد شد تا سرعت بحرانی مذکور بیشتر و در نتیجه زمان سوئیچینگ کوچکتر و یا به تغییر فیزیکی زودتر گردد. این زمان سوئیچیگ غیر ایده ال را t_{s2} مینامیم.

باز هم میتوان گفت که با مشخص شدن بیشترین سرعت بحرانی، زودترین زمان سوئیچینگ نیز مشخص خواهد شد.

جهت نتیجه‌گیری میتوان ادعا کرد که استراتژیهای مختلف بهینه‌سازی انرژی با تغییر دو زمان سوئیچینگ اساسی یعنی زمان سوئیچینگ t_{s2} و t_{s1} تغییر می‌کنند و تعداد مراحل کنترل مناسب کاملا بستگی به این مقادیر دارد. پس مسئله تعیین تعداد مراحل کنترلی بهینه میتواند تبدیل به مسئله انتخاب زمان سوئیچینگ مناسبی از بین زمانهای سوئیچینگ استراتژیهای

بهینه‌ساز گردد. حال این زمان سوئیچینگ مناسب از بین زمانهای سوئیچینگ بهینه چگونه باید انتخاب شود. ما باید زمانی را تعیین کنیم که با انتخاب آن زمان، تعداد مراحل کنترلی که همان تغییرات شگردهای کنترلی و نوسان بین سرعتهای بحرانی است مجموعه‌ای از اهداف و قیدهای کنترلی فازی را که در سیستم کنترل قطار بسیار اهمیت دارند ارضا یا بهینه نمایند. برای این منظور از مفاهیم برنامه‌ریزی دینامیکی فازی استفاده نموده و مسئله‌ای را با ماهیت کنترل فازی چند مرحله‌ای بنا می‌نهیم.



شکل (۲) استراتژیهای بهینه کنترلی.

آنچه که در بحث بالا دارای اهمیت است چگونگی فرموله کردن و بنا نهادن کنترل چند مرحله‌ای فازی به صورتی است که مسئله دارای توجیه و معنای منطقی باشد. به طور آشکار، حفظ بازه سرعت ثابت به طور عملی مشکل بوده و از طرفی این بازه نقش مهمی در حرکت بهینه قطار بر عهده دارد. بنابراین تلاش ما باید این باشد که در درجه اول سعی کنیم که حرکت قطار ازنظرعملی طوری باشد که این بازه را با دقت کافی تقریب بزند و از طرفی اهداف کنترلی مورد نظر را تامین نماید. فاز شتابگیری به سادگی بدون نیاز به بنای چنین کنترلی میتواند تعقیب شود به این ترتیب که قطار در تمامی انواع استراتژیهای بهینه همواره با شتاب ماکزیمم حرکت مینماید و لذا کافی است ما نیز در استراتژی مورد نظر خود همین رویه را دنبال کنیم. بدین ترتیب در فاز اول بدون نیاز به بحث بهینه‌سازی هوشمند، قطار را با محاسبات کلاسیک ریاضی کنترل می کنیم. برای این منظور بایستی مقدار سرعت ثابت از طریق ارضای شرایط زمان و مسافت یافته شود. با توجه به ساختار معرفی شده در بخش ۲ شرط زمان چنین خواهد بود:

$$\int_0^{z} \frac{vdv}{Hf - vr(v)} + \tau_z + \int_{U(Z)}^{Z} \frac{dv}{r(v)} + \int_0^{U(Z)} \frac{dv}{K + r(v)} = T \qquad (۱۸)$$

و شرط ارضای مسافت برابر خواهد بود با:

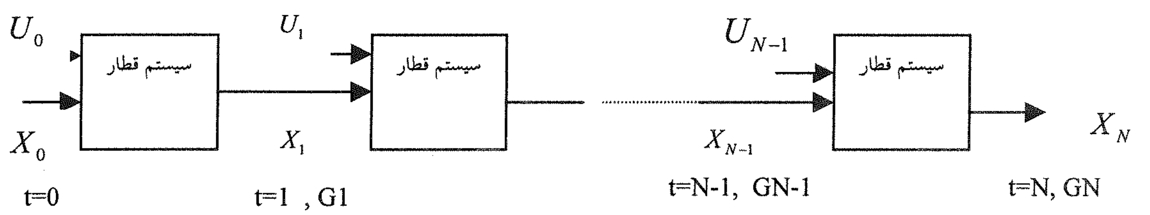
$$\int_0^{z} \frac{v^2 dv}{Hf - vr(v)} + Z\tau_z + \int_{U(Z)}^{Z} \frac{vdv}{r(v)} + \int_0^{U(Z)} \frac{vdv}{K + r(v)} = X \qquad (۱۹)$$

که Z مقدار سرعت ثابت و τ_z مدت زمان سپری شدن سرعت ثابت می‌باشد. با حل معادلات فوق به صورت عددی میتوانیم مقدار سرعت ثابت را درصورت شدنی بودن بیابیم. از روی این مقدار زمان رسیدن به این سرعت برابر خواهد شد با: $tz = \int_0^{z} \frac{vdv}{Hf - vr(v)}$ و مسافت در رسیدن به این

سرعت برابر است با: $xz = \int_0^{z} \frac{v^2 dv}{Hf - vr(v)}$.

حـال بـا توجه به این مقادیر نقطه آغاز بهینه سازی هوشمند حاصل شده است. از اینجا به بعد مواجه با این مسئله خواهیم بـود کـه حرکـت از نقطـه (Z, x_{z1}, t_{z1}) بـا توجه به معادلات دینامیکی قطار طوری انجام پذیرد که در تقریبا زمان $t_{z1} + \tau_z$ سـرعت قطـار برابـر Z و مسـافت برابر $x_{z1} + Z\tau_z$ باشد و همچنین اهداف کنترلی ایمنی و دقت در تعقیب دستورات سرعتی بهیـنه شـوند. فـازی کـردن زمان انتهایی در اینجا نوسان بین سرعتهای حول مقدار سرعت ثابت را توجیه پذیر می‌نماید به این دلـیل کـه تامیـن سـرعت ثابت در قطار به صورت عملی مگر درحالتی که نیروهای مقاوم برابر نیروی تراکشن گردند و آن هم وضـعیت قـابل کنترلـی نخواهـد بـود، ممکـن نیست. جهت فازی کردن زمان انتهایی به یافتن عناصر با توابع عضویت غیر صفر (SUPPORT) نـیاز اسـت. بـا یـادآوری بهیـنه‌سـازی انـرژی در بخش ۳ دیدیم که با حداقل ۵ مرحله استراتژی بهینه بدست مـی‌آمد. زمان سوئیچینگ آخر یعنی تغییر از شتاب به خلاص نهایی را با tsmin نشان می‌دهیم. این زمان میتواند از نظر مسئله ما زودترین زمانی باشد که بهینه‌سازی فازی در آن می‌تواند به پایان برسد. دیرترین زمان نیز زمان انتهای سرعت ثابت است که آن را بـا ts نشـان می‌دهیم. تعداد مراحل کنترلی تفاضل بین ts و tz است با فرض اینکه بین هر دو مرحله کنترلی متوالی یک ثانـیه اختلاف زمانی موجود باشد. جهت کمتر کردن محاسبات می‌توان این تفاضل را بر یک عدد طبیعی کوچک مثلا ۵ تقسیم نمـود و در واقـع تعـداد مـراحل را کمـتر نمـود. در عـوض برای جبران هرگونه خطایی در محاسبه حالتها بین دو زمان متوالی میـتوان فاصـله بیـن ایـن دو مقطـع زمانی را به بازه‌های کوچک‌تر مثلا ۰/۱ ثانیه تقسیم نمود و حالتهای بعدی را بادقت کافی بدسـت آورد. تا اینجا داده‌های لازم برای بنا کردن مسئله کنترل چند مرحله‌ای حاصل شده است. حال آماده هستیم وارد بحث برنامه‌ریزی فازی دینامیکی شویم.

شـکل ۳ نمودار بلوکی کنترل چند مرحله‌ای فازی را برای مسئله کنترل قطار در مرحله تقریب سرعت ثابت نشان میدهد. اهـداف کنترلـی بـه دو گونه کلی تقسیم میشوند که یکی مسافت ودیگری سرعت را مد نظر قرار می‌دهد. هدف کنترلی مسافت در آخریـن مـرحله در نظـر گرفـته میشـود به این معنی که ما خواهان آن هستیم که مسافت طی شده توسط قطار در آخرین مـرحله همانـی باشـد کـه قطـار با سرعت ایده‌آل ثابت طی مینماید. اهداف کنترلی مربوط به سرعت عبارتند از ایمنی به معنی عـدم تجـاوز از سرعت ماکزیمم و مجاز و همچنین دقت در تعقیب سرعت یعنی تا حد امکان نزدیک بودن نوسانات یا سرعتهای بحرانـی بـه مقـدار محاسـبه شـده سـرعت ثابـت است. این اهداف کنترلی با توجه به اهمیت وحیاتی بودن آنها باید در تمامی مراحل کنترلی تامین شوند.



شکل (۳) نمودار بلوکی کنترل چند مرحله‌ای فازی سیستم قطار.

هدف کنترلی مربوط به مسافت را با تابع عضویت μ_{dist}، هدف کنترلی ایمنی را با μ_{safety} و هدف کنترلی دقت در تعقیب سرعت را با $\mu_{tracability}$ نشان میدهیم. بنابراین مطابق فرمولهای بهینه‌سازی فازی خواهیم داشت:

$$G_t = \mu_{safety} * \mu_{tracability}, \quad t = 0,1,...N-1 \qquad (۲۰)$$

در مرحله آخر هدف مسافت نیز اضافه میگردد و لذا خواهیم داشت:

$$G_N = \mu_{safety} * \mu_{tracability} * \mu_{dist} \qquad (۲۱)$$

البته اهداف در مراحل میانی یکسان بوده و همواره ایمنی و دقت در تعقیب سرعت میباشند.

نخست، مجموعه تمامی مراحل کنترلی ممکن را با مجموعه S={0,1,...,K-1,K,K+1,...,N} نشان میدهیم که N در اینجا زمان انتهایی غیر فازی و ثابت می‌باشد که البته محدود می‌باشد. زمان انتهایی فازی این فرایند کنترلی به صورت مجموعه فازی T که در مجموعه مراحل کنترلی S و با تابع عضویت مشخص می‌شود، تعریف میگردد. تابع عضویت نشان می‌دهد که زمان چقدر به عنوان زمان انتهایی قابل ترجیح است. تابع عضویت برابر ۱ به معنی بیشترین ترجیح و تابع عضویت صفر دارای کمترین ترجیح (غیر قابل قبول یا غیر ممکن) است.

بنابراین فرایند کنترلی باید در زمانی مثل $M \in SUPP\,T = \{t \in S : \mu_T(t) \gtrless 0\}$ خاتمه یابد. به علاوه فرض کنید که SUPP T={K,K+1,...,N} به این معنی که زمان خاتمه باید در مراحل کنترلی بعدی اتفاق بیفتد که ما حدود مجموعه فوق را از روی tsmin بدست می‌آوریم.

کنترل اعمال شونده به قطار با توجه به اینکه نتایج بهینه‌سازی انرژی برای ما مشهود است باید یا به صورت شتاب ماکزیمم ویا خلاص باشد و در این حالت قیدی را بر روی آن تعریف نمی‌کنیم و لذا می‌توانیم در فرموله کردن مسئله قیدها را کنار بگذاریم، بنابراین خواهیم داشت:

$$\mu_D(u_0,\dots,u_{M-1}|x_0) = \mu_{G^1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{G^{M-1}}(x_{M-1}) \wedge [\mu_T(M).\mu_{G^M}(x_M)] \qquad (۲۲)$$

این مسئله کنترلی به این صورت ترجمه میشود که زمان انتهای بهینه M^* و رشته کنترلهای بهینه را طوری پیدا کنیدکه:

$$\mu_D(u_0^*,\dots,u_{M-1}^*|x_0) = \max_{M,u_0,\dots,u_{M-1}} \mu_D(u_0,\dots,u_{M-1}|x_0) \qquad (۲۳)$$

سیستم تحت کنترل توسط معادله گذر حالت زیر داده می‌شود:

$$x_{t+1} = f(x_t,u_t), t = 0,1,\dots \qquad (۲۴)$$

که x ها حالات غیر فازی در مراحل کنترلی و u کنترل می‌باشد.

در مورد قطار باتوجه به اینکه در مرحله سرعت ثابت عموما موتورهای تراکشن در مد توان ثابت کار میکنند میتوانیم معادله مطرح شده در بخش ۲ را به عنوان معادلات گذر حالت در نظر بگیریم.

معادلات فوق به سادگی می‌توانند با دقت کافی به صورت گسسته درآیند. در هر مرحله کنترلی t مقدار کنترل مشروط به اهداف فازی میباشد. جهت ساده‌سازی نوشتار هدف فازی اصلاح شده را به صورت زیر تعریف میکنیم:

$$\mu_{\bar{G}^M}(x_M) = \mu_T(M).\mu_{G^M}(x_M) \quad \text{برای هر } x_M \in X \qquad (۲۵)$$

تصمیم فازی اکنون میتواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\mu_D(u_0,\dots,u_{M-1}|x_0) = \mu_{G^1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{G^{M-1}}(x_{M-1}) \wedge \mu_{\bar{G}^M}(x_M) \qquad (۲۶)$$

و مسئله کنترل یافتن زمان انتهایی بهینه و رشته بهینه کنترلها به صورت زیر است:

$$\mu_D(u_0^*\dots,u_{M-1}^*|x_0) = \max_{M,u_0,\dots,u_{M-1}} [\mu_{G^1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{G^{M-1}}(x_{M-1}) \wedge \mu_{\bar{G}^M}(x_M)] \qquad (۲۷)$$

که $x_M \in X$ از روی x_0 و $u_0,\dots,u_{M-1} \in U$ از طریق معادله گذر حالت با لا بدست می‌آید.

برای حل با استفاده از روش Kacprzyk [۱۲،۱۱] نخست یک بار دیگر یادآوری میکنیم که: $T = \{M\} = \{t \in S : \mu_T(t) > 0\} = \{K, K+1, ..., N-1, N\}$ که K زودترین و N دیرترین زمان انتهایی ممکن می‌باشد. به طور آشکار رشته‌های کنترلی میتوانند به دو قسمت تقسیم شوند:

- رشته $u_0, ..., u_{K-2}$ به معنی کنترلهایی که به انتهای فرایند کنترل هدایت نمیکنند.
- رشته $u_{K-1}, ..., u_{M-1}$ به معنی کنترلهایی که به انتهای فرایند هدایت میکنند.

مطابق اصل بهینگی بلمن، در یک رشته بهینه کنترلی که شامل مراحل ابتدایی تا انتهایی یعنی $u_0^*, ..., u_{M^*-1}^*$ می‌باشد، بخشی از آن نیز مثلا از t=K-1 تا مرحله نهایی $t = M^* - 1$ یعنی $u_{K-1}^*, ..., u_{M^*-1}^*$ خود باید بهینه باشد. در این صورت مسئله میتواند به صورت زیر مجددا نوشته شود:

$$\mu_D(u_0^*, ..., u_{M^*-1}^* | x_0) = \max_{u_0, ..., u_{K-2}} \{\mu_{G^1}(x_1) \wedge ... \wedge \mu_{G^{K-2}}(x_{K-2}) \wedge \max_{M, u_{k-1}, ..., u_{M-1}} [\mu_{G^{K-1}}(x_{K-1}) \wedge ... \wedge \mu_{G^{M-1}}(x_{M-1}) \wedge \mu_{\overline{G}^M}(x_M)]\} \quad (۲۸)$$

اکنون اگر برای i=1,...,M-K+1 نشان دهیم:

$$\overline{\mu}_{G^{M-i}}(x_{M-i}, M) = \max_{u_{M-i}} [\mu_{G^{M-i}}(G_{M-i}) \wedge \overline{\mu}_{G^{M-i+1}}(x_{M-i+1}, M)] \quad (۲۹)$$

که $\overline{\mu}_{G^M}(x_M, M) = \mu_{\overline{G}^M}(x_M)$ و روش برنامه‌ریزی پویا را به طور بازگشتی بکار بریم، آنگاه مجموعه معادلات بازگشتی برنامه‌ریزی پویا چنین خواهد شد[۱۲].

$$\begin{aligned} &\overline{\mu}_{G^{M-i}}(x_{M-i}, M) = \max_{u_{M-i}} [\mu_{G^{M-i}}(G_{M-i}) \wedge \overline{\mu}_{G^{M-i+1}}(x_{M-i+1}, M)] \\ &x_{M-i+1} = f(x_{M-i}, u_{M-i}) \\ &i = 1, ..., M-K+1; M = K, K+1, ..., N \end{aligned} \quad (۳۰)$$

با حل این مجموعه معادلات بازگشتی، $\overline{\mu}_{G^{K-1}}(x_{K-1}, M)$ و رشته کنترلهای بهینه متناظر $(u_{K-1}^*, ..., u_{M-1}^*)$ را تعیین میکنیم. آنگاه $\mu_{G^{K-1}}(x_{K-1})$ و زمان انتهایی بهینه متناظر M^* و رشته کنترلی $u_{K-1}^*, ..., u_{M^*-1}^*$ با حل $\mu_{G^{K-1}}(x_{K-1}) = \max_M \overline{\mu}_{G^{K-1}}(x_{K-1}, M)$ تعیین میشوند. قسمت نخست، رشته کنترلی بهینه $u_0^*, ..., u_{K-2}^*$ همانند حالت زمان انتهایی ثابت و مشخص بدست می‌آید. به این معنی که با حل مجموعه معادلات بازگشتی زیر جواب‌ها بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} &\mu_{K-1-i}(x_{K-1-i}) = \max_{u_{K-1-i}} (\mu_{G^{K-1-i}}(x_{K-1-i}) \wedge \mu_{G^{K-i}}(x_{K-i})] \\ &x_{K-i} = f(x_{K-1-i}, u_{K-1-i}), \quad i = 1, ..., K-1 \end{aligned} \quad (۳۱)$$

پس از یافتن جواب که در این مقاله با استفاده از نرم افزار حاصل شده است زمان بهینه انتهایی و رشته کنترلی بهینه با توجه به نقطه آغازین معرفی شده در قبل یعنی (Z, x_z, t_z) بدست می‌آیند. با یافتن این رشته کنترلی میتوان سرعت و مسافت را با حل معادلات گذر حالت قطار بدست آورد که در شبیه‌سازیهای انجام گرفته به آن میپردازیم.

سرعت و زمان رسیدن به نقطه انتهایی خود نقطه شروعی برای مراحل پایانی یعنی حرکت خلاص و ترمز قطار خواهد بود. به سادگی با مراجعه به مباحث بخش ۲و ۳ میتوانیم سرعت آغاز ترمز را با ارضای شرط زمان بیابیم. به عبارت دیگر فرض کنیم در آخرین مرحله پس از حل به سرعت V0 رسیده باشیم. زمان رسیدن به این سرعت از حل مسئله بهینه‌سازی فازی معلوم می‌باشد و زمان کل حرکت نیز برای ما ثابت است. کافی است با ارضای شرط زمانی زیر، مقدار مناسب U را با یافتن ریشه معادله بیابیم.

$$\int_{U}^{V0}\frac{dv}{r(v)}+\int_{0}^{U}\frac{dv}{K+r(v)}=T-Mstar \qquad (۳۲)$$

که Mstar زمان خاتمه عملیات بهینه سازی فازی و T کل زمان حرکت است.

حال شاید این سوال پیش آید که قطار چگونه با این محاسبات پیچیده سرو کار پیدا کند و راه حل عملی چیست. راه حل ارائـه شده راه حلی است که تنها در ابتدای طراحی سیستم کنترل و یا هر بار که مشخصات قطار تغییر نماید، در خارج از قطار به صورت off-line باید اجرا گردد و نتایج حاصله یعنی کنترل‌ها و زمانهای سوئیچینگ در جداول و یا حافظه ذخیره شده و در قطـار بـارگذاری شـود. این جداول می‌توانند برای زمانهای متفاوت و ایستگاه‌های مختلف فراهم گردند و جداول کنترلی متناظر نـیز حاصـل گشـته و در اختیار قطار قرارگیرند. قطار با دریافت دستور ترافیکی، جدول مربوطه را از حافظه فراخوانی کرده و در سیستم کنترل خود قرار می‌دهد. بدین ترتیب سیستم داخل کابین فقط وظیفه اجرای دستورات جدول را برعهده دارد.

٤ـ شبیه‌سازیهای انجام یافته

جهـت انجام شبیه‌سازی ابتدا با استفاده از مباحث مطرح شده در بهینه‌سازی انرژی با استفاده از تکنیکهای غیر خطی اقدام بـه شـبیه‌سـازی راه حـل مذکـور کرده و در نهایت با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی هوشمند نتایج تصحیح شده را که در قالب کنترل چند مرحله‌ای فازی خواهد بود عرضه و سیستم‌های نمونه را شبیه‌سازی می‌کنیم.

جهـت انجـام شـبیه‌سـازی، حرکتـی را بـا مسافت ۱۸۰۰۰ متر و زمان ۱۵۰۰ ثانیه در نظر میگیریم. فرض میکنیم ضرایب نـیروهای مقـاوم حرکتـی فـرمول دیویس و مشخصات تراکشن و ترمزی با توجه به داده‌های واقعی نمونه‌های قطارهای در حال بهره‌برداری به قرار ذیل باشند:

a=0.015 , b=0.00003 ,c=0.000006 , H=1.5 ,K=1

f نیز در حالت شتاب حداکثر برابر با ۱ و در حالت خلاص صفر خواهد بود.

٤-۱ـ استراتژی بهینه با پنج مرحله کنترلی

اگر از پنج مرحله کنترلی استفاده شود، خواهیم داشت: j(1)=j(3)=1, j(2)=j(4)=0,j(5)=1

و استراتژی با کمترین مصرف انرژی را به صورت زیر می‌یابیم:

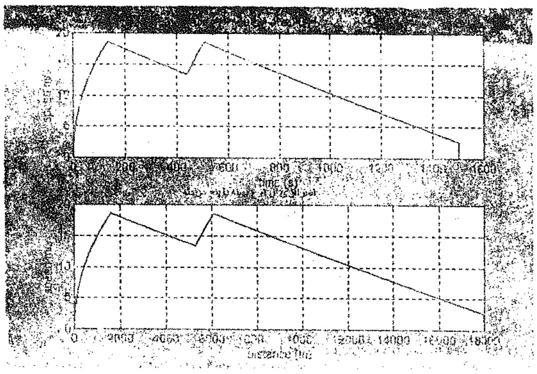
ابـتدا سـرعتهای بحرانـیV وW را انـتخاب کـرده و سـرعت بحرانـی U=U(V,W) را تعییـن میکنـیم. قـرار میدهـیم: $V_1=V_3=W, V_2=V, V_4=U$ و سرعتهای V و W را طوری تنظـیم میکنـیم که قیدهای زمان و مسافت ارضا گردند.

نتایج این تنظیمات برابر خواهد شد با: W=18.59m/s , V=13.37m/s, U=2.68m/s

با انجام شبیه‌سازی، مقادیر انرژی و زمانهای سوئیچینگ برابر خواهند شد با:

J=201.8542 , ts1=133.7 ,ts2=440.6 ,ts3=508.7 , ts4=1498

نمودار سرعت ـ زمان و سرعت ـ مسافت در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: بهینه‌سازی حرکت با ۵ مرحله کنترلی

اکـنون آمـاده هستیم تا براساس شبیه‌سازی انجام گرفته قبلی وارد مرحله بهبود کنترل قطار با استفاده از تکنیک هوشمند بهینه‌سازی فازی شویم.

در مـرحله اول فـرض مـی‌کنیم که مدت زمان مورد درخواست جهت طی فاصله فوق برابر ۱۵۰۰ ثانیه باشد. همان طور که گفـته شـد ابـتدا بایستی حرکت ایده‌آل که معرف مصرف انرژی کمتر است شناخته شود. برای این منظور با حل معادله زمان و مسـافت و ارضای هر دو قید مقدار سرعت ثابت متناظر را بدست می‌آوریم که این عمل در محیط نرم افزاری MATLAB انجام میـپذیرد. یافتن مقدار سرعت ثابت به ما دو زمان سوئیچینگ ایده‌آل که یکی زمان تغییر از شتابگیری به سرعت ثابت و دیگری زمـان تغییر از سرعت ثابت به خلاص است را خواهد داد. زمان سوئیچینگ دوم (ts) میتواند زمانی تلقی شود که در آن اگر فاز سـرعت ثابـت در آن به پایان برسد قابل قبول است. پس این زمان آخرین زمانی است که در آن تابع عضویت مربوطه برابر یک میباشـد. بـرای مشـخص کـردن اعضـای تابع عضویت غیر صفر (SUPPORT) با استفاده از نتایج شبیه‌سازی کنترل انرژی با ۵ مـرحله کنترلی که کمترین مراحل کنترلی از نقطه نظر بهینه‌سازی انرژی بود آخرین زمان سوئیچینگ از شتابگیری به خلاص را مـی‌یابیم (tsmin) برای مشخص کردن محدوده مجاز برای زمان انتهایی فرایند کنترل چند مرحله‌ای کافی است تفاضل بین ایـن دو زمـان را در نظـر بگیریم و تابع عضویت را به صورت عدد فازی بر روی این محدوده بنا کنیم. در شبیه‌سازی انجام شده نتایج زیر برای زمانهای سوئیچینگ بدست می‌آید (واحد کلیه زمانها، ثانیه می‌باشد):

tz=118.7937, ts=527.8512, tsmin=508, ts-tsmin=527.8512- 508=19.8512

با توجه به مطالب گفته شده تعداد مراحل کنترلی به تعبیر کنترل چند مرحله‌ای فازی برابر خواهد شد با:

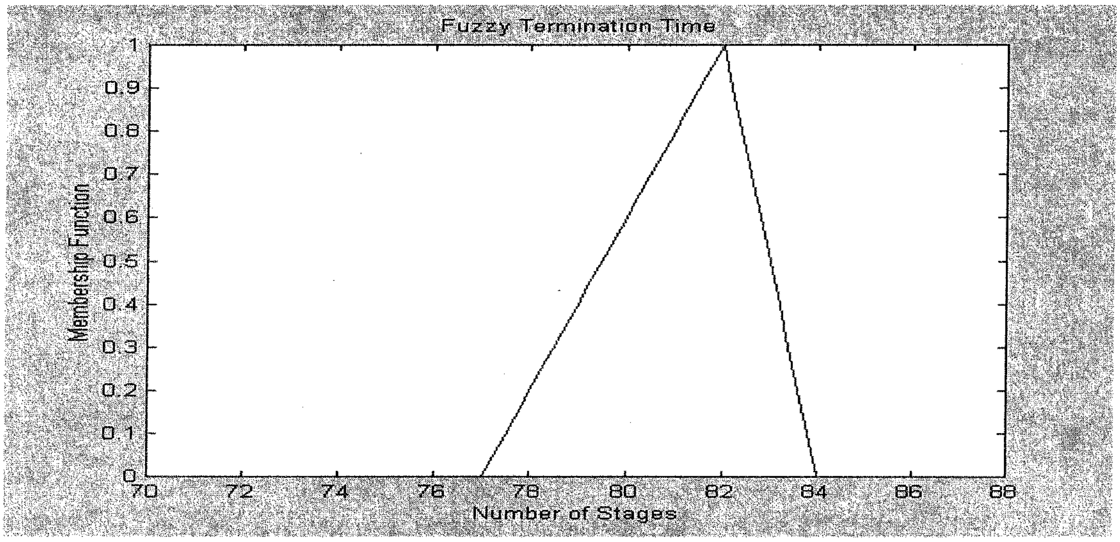
N+1= (ts-tz)/5 = 82

فاصـله زمانـی بیـن هر مرحله کنترلی تا مرحله بعدی برابر ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است ولی در محاسبه حالتهای بعدی هر مرحله از تقسیم زمانی ۰/۱ ثانیه استفاده شده تا دقت محاسبه بالا باشد.

جهـت فـازی کـردن زمـان انتهایـی بـا توجه به تعداد مراحل و نیز زمانهای سوئیچینگ تابع عضویت مثلثی شرایط کافی را فراهم می کند. شکل ۵ تابع عضویت را برای زمان انتهایی نشان میدهد.

مقدار سرعت ثابت ایده آل نیز با توجه به محاسبه برابر خواهد شد با: Z=17.7117

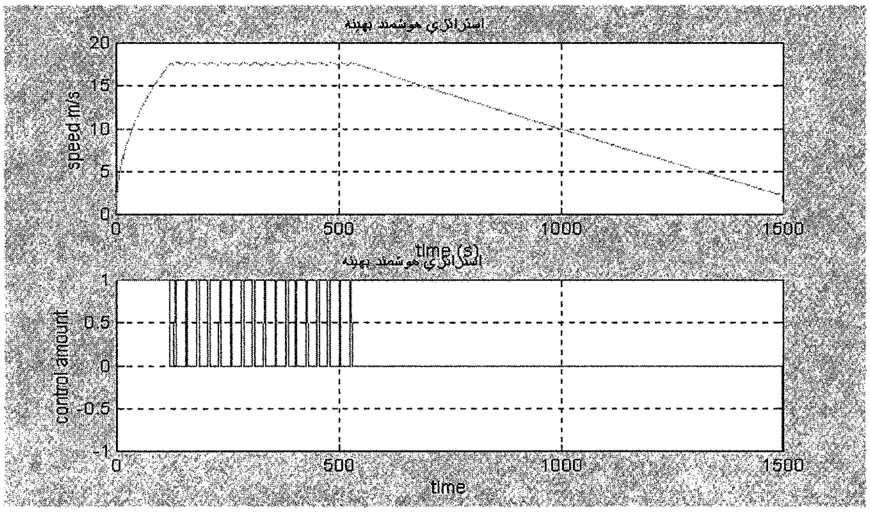
اهـداف کنترلـی بـا توجه به مسئله به سه نوع تقسیم میشود که هدف مسافت به معنی رسیدن فاصله قطار به فاصله انتهای فاز سـرعت ثابت در آخریـن مـرحله مـنظور مـی‌شود و سایر اهداف که شامل ایمنی و دقت در تعقیب سرعت می باشد در تمامی مـراحل در نظر گرفته می‌شوند. برای هدف ایمنی، رعایت حاشیه اطمینان از سقف سرعت مجاز و برای دقت در تعقیب سرعت، نزدیک بودن به سرعت ثابت ایده آل ضروری است که میتواند با توابع عضویت مناسب نمایش داده شود.



شکل (۵) تابع عضویت زمان انتهایی مربوط به شبیه‌سازی بهینه‌سازی فازی.

برنامه نرم افزاری با دریافت اطلاعات سوئیچینگ و بکارگیری آلگاریتم برنامه‌ریزی فازی دینامیکی زمان انتهایی بهینه و نیز کنـترل‌هـای بهیـنه لازم را کـه شتابگیری ماکزیمم و یا خلاص می‌باشد در هر مرحله کنترلی که با فواصل زمانی ۵ ثانیه از هم جدا شده‌اند به همراه سرعت‌های سوئیچینگ فراهم می‌کند. نقطه آغاز بهینه‌سازی فازی نقطه‌ای است که در آن فاز شتابگیری اولـیه بـه فاز سرعت ثابت تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر مقدار سرعت همان Z است و مسافت نیز مسافتی است که فاز سرعت ثابـت شـروع مـی‌شود. انجام شبیه‌سازی با فرضیات فوق مبین آن است که تعداد سوئیچینگ‌ها در ناحیه سرعت ثابت که ما در حـال تقریـب آن میباشـیم برابـر۳۳ خواهـد بـود . این نتیجه نشان میدهد که منحنی بهینه در طول حرکت قطار که برابر ۱۸ کیلومـتر است با ۳۶=۳۳+۳ تغییر کنترلی میتواند تامین گردد. شکل ۶ و ۷ نتایج شبیه‌سازی را به صورت نمودارهای سرعت ـ زمان، ورودی کنترلی برحسب زمان، سرعت – مسافت و مسافت – زمان به ترتیب نشان میدهند.

انرژی مصرفی این حرکت در پایان شبیه سازی انجام گرفته برابر خواهد شد با: ۲۰۲/۰۹۷۷



شکل (٦) نتایج شبیه‌سازی به ازای زمان ۱۵۰۰ ثانیه ـ نمودارهای سرعت و کنترل.

در گام بعدی مدت زمان حرکت فاصله بین دو ایستگاه را عوض کرده و نتایج شبیه‌سازی را یک بار دیگر مرور میکنیم.

۲-٤ـ شبیه‌سازی کنترل هوشمند برای زمان حرکت ۱٤۹۰ ثانیه

ایـن بـار زمـان حرکـت را ۱۰ ثانـیه تقلـیل داده و مسـئله را حل می‌کنیم. معنی این عمل آن است که ما خواهان کنترلی هسـتیم کـه در آن حرکتـی صـورت پذیرد که مدت زمان آن ۱۴۹۰ ثانیه بوده و در عین حال از همه نظر بهینه باشد. در اینجا طبیعـتا به علت اینکه زمان حرکت کوتاه‌تر است باید سرعت ثابت متناظر بیشتر شود. با اجرای شبیه‌سازی و یافتن سرعت ثابت با استفاده از آلگاریتم و ارضای مسافت و زمان خواهیم داشت:

tz=122.6456 , ts=507.7960, Z=17.8708, N+1=77;

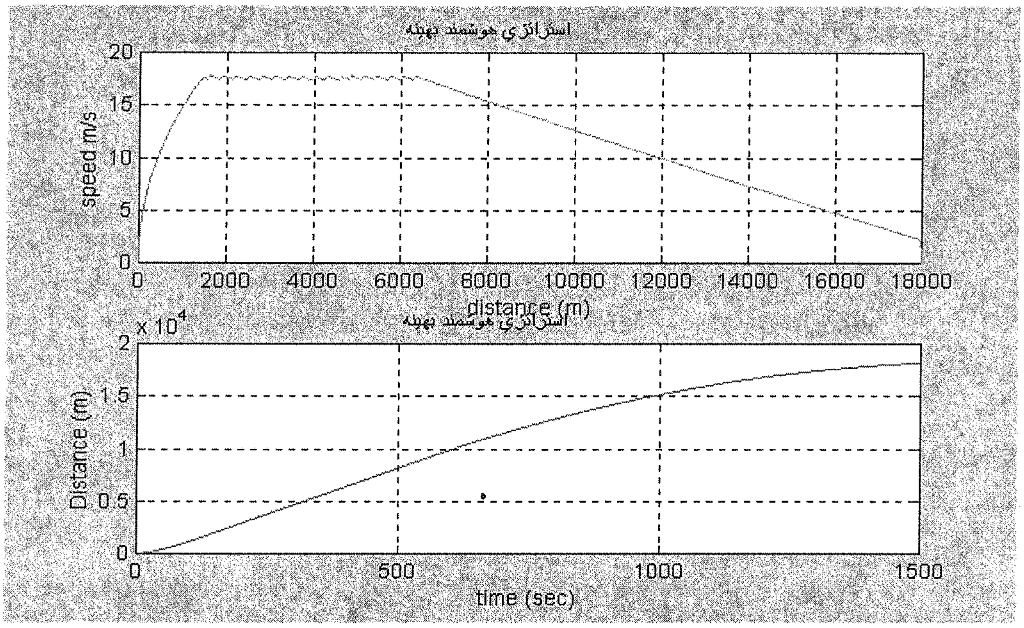
تعـداد تغیـیرات کنترلـی در فاز بهینه‌سازی دینامیکی فازی برابر با ۳۲ بوده و لذا کل مراحل سوئیچینگ برابر با ۳۵=۳+۳۲ خواهـد شد. شکلهای ۸ و ۹ نمودارهای سرعت ـ زمان، ورودی کنترلی بر حسب زمان، سرعت ـ مسافت و مسافت ـ زمان را به ترتیب نشان میدهند. مقدار انرژی مصرفی در این حالت برابر با ۲۰۱/۰۴۹۳خواهد بود.

ملاحظـه میشـود کـه درتمامی شبیه‌سازیهای انجام گرفته با روش بهینه‌سازی فازی تعداد مراحل کنترلی محدود بوده و از نظـر عملـی کنـترل سیسـتم امکـان‌پذیـر میشود. در ضمن منحنی تولید شده بهینه‌ترین منحنی از نظر رعایت اهداف کنترلی میباشد.

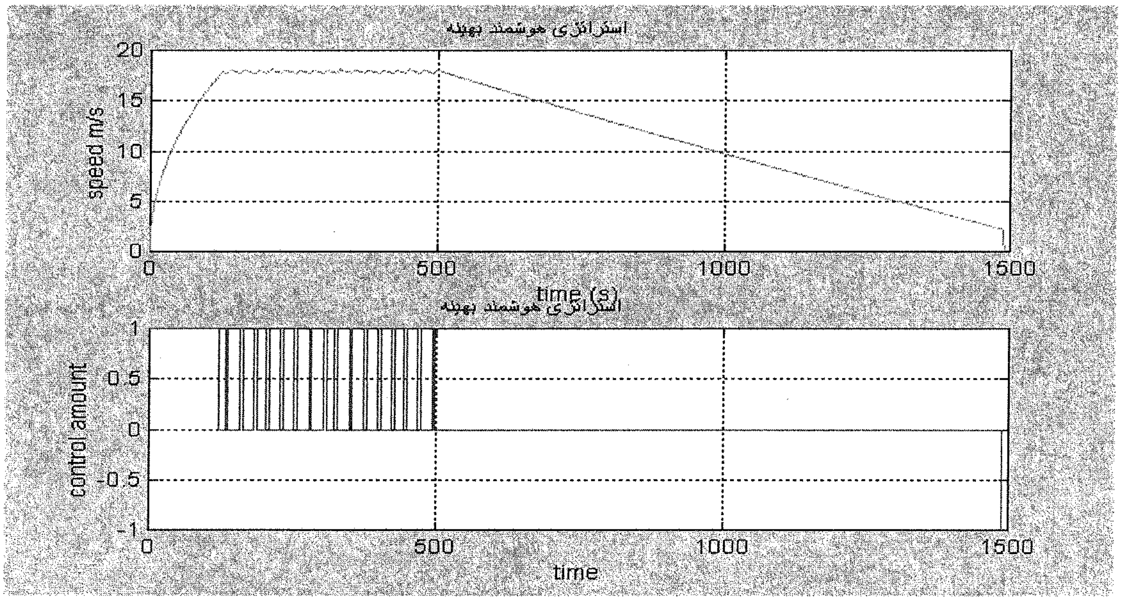
۵ـ نتیجه‌گیری

در ایـن مقالـه ابتدا با درنظر گرفتن مدل دینامیک قطار با استفاده از روشهای بهینه‌سازی مقید و شرایط کان ـ تاکر کنترل

قطار شامل زمانهای سوئیچینگ بین شگردهای شتابگیری، حرکت خلاص و ترمز، با مدنظر قراردادن تابع انرژی به صورت بهینه تعیین شد. سپس با توجه به اینکه از نظر انرژی تامین یا اعمال سرعت ثابت در قطار مطلوب است و لی از نظر عملی به معنای تغییرات بسیار زیاد در ورودیهای کنترلی و لذا غیر ممکن میباشد، با بکارگیری کنترل چند مرحله‌ای فازی عمل تصحیح بر روی استراتژی کنترلی صورت پذیرفت. نتیجه این عمل که با استفاده از بهینه‌سازی دینامیکی فازی همراه با فازی کردن زمان انتهایی پروسه کنترل قطار در قسمت سرعت ثابت انجام گرفت، ضمن بهینه کردن اهداف جانبی دیگر همچون ایمنی، دقت در تعقیب سرعت و دقت در مسافت، تعداد تغییرات مراحل کنترلی را محدودتر نموده و لذا تحقق عملی آنرا ممکن نمود.



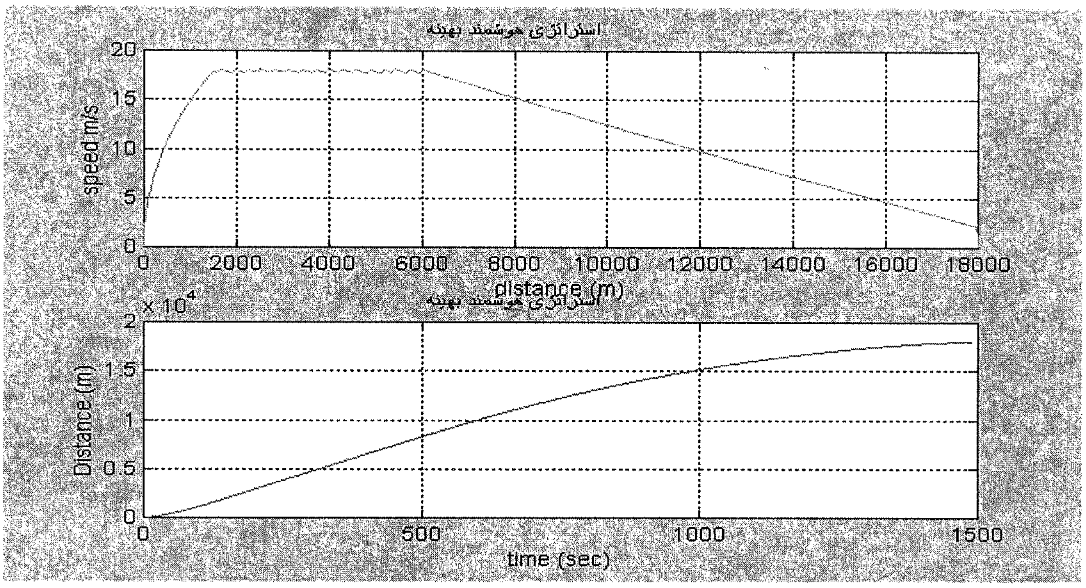
شکل (۷) نمودار سرعت-مسافت و مسافت - زمان در استراتژی هوشمند.



شکل (۸) نمودار سرعت- زمان و کنترل برای زمان ۱٤۹۰ ثانیه.

زیرنویس

1-Fuzzy Dynamic Programming
2-Pudney & Howlett Pudney & Howlett
3- Davis



شکل (۹) نمودار سرعت- مسافت و مسافت- زمان برای استراتژی هوشمند ۱٤۹۰ ثانیه.

مراجع

[1] Jia Li- Min, Zhang Xi-Di, Xie Zhao-Tong "Outline of Fuzzy Cell Mapping Based Methodology For Dealing With Complex Fuzzy Systems", International Fuzzy Syst. and Intelligent Control Conf. , pp228-236,1994.

[2] Asrar U, Sheikh ,et al "ATCS: Advanced Train Control System Radio Data Link Design Considerations.", IEEE Trans. on Vehicular Tech, Vol 39, No 3, August 1990.

[3] Sandidzadeh M., Menhaj M., Ghadrdani S., "Modelling the human operator decision making for railway traffic control based on intelligence of computing techniques", Proceedings of Conference on Railway Eng. (CORE 98), Australia, pp.273-278, Sept. 1998.

[4] Hill R.J. "Modelling Railway Block Signalling Systems", Joint IEEE/ASME Railroad Conf pp1-9,1992.

[5] Minin V. A, "A General Model for Optimization of Track Circuit Parameters", IEEE/ ASME Joint Railroad Conf, pp113-118,1995.

[6] Sandidzadeh M., Menhaj M., Majedi M. "A Model for Command Transfer between Audio Frequency Track Circuits and Train Onboard Equipment", 5th Rail transport conference ,Tehran, Iran,March 2000.

[7] Robert G. Ayers ,. "Selection Of A Forward Error Correcting Code For The Data Communication Radio Link Of The Advanced Train Control System.", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol 38 No 4, p247-255, Nov 1989.

[8] Jia Li - Min - Zhang Xi - Di. "On Fuzzy Multiobjective Optimal Control." Eng. Applic. Artif. Intell. Vol 6 No 2, pp153-164, 1993.

[9] Sandidzadeh M., Menhaj M., et al "Simulation of Chopper Controlled DC Series Traction Machine in Motoring and Braking Modes for Tehran Metro Application", World Congress on Railway Research,Tokyo, Japan, Oct. 1999.

[10] Energy efficient train control, by P.G Howlett, et al., Springer press, 1997.

[11] Fuzzy Optimization, by: M. Delgado, et al, Springer Verlag publishing, 1994.

[12] Multistage Fuzzy Control, by J. Kacprzyk, John Wiley & Sons, 1995