

## (یادداشت پژوهشی)

### شبیه‌سازی دینامیک حرکت قطار در راه آهن شهری\*

محمد علی صندیدزاده، استادیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
شیرین صفرخانی تبریزی، کارشناس ارشد، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
احمد میرآبادی، استادیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
E-mail: sandidzadeh@iust.ac.ir

#### چکیده

امروزه فناوری رایانه‌ای راه‌های مختلفی را به منظور توجیه اقتصادی و فنی پروژه‌های تغذیه سیستم‌های ترکشن DC فراهم کرده است. این امر کاملاً امکان‌پذیر است که ترافیک و تردد وسائط نقلیه ریلی بر پایه برنامه بهره‌برداری، همچنین محاسبات مربوط به جریانها و ولتاژها و نیز تعیین خروجی‌های مربوط به یکسوسازها و اینورترها (مبدل‌ها) در هر لحظه و در هر مکانی شبیه‌سازی شود و مکانهای پیشنهادی و در نظر گرفته شده برای پستهای یکسوساز کنترل شوند. تخمین تعداد مسافران، برنامه بهره‌برداری و همچنین چگونگی راحتی مسافران همگی در انتخاب وسیله نقلیه ضروری هستند، توسط برنامه نرم‌افزاری، تعیین خروجی یکسوساز در دو حالت سرویس نرمال و در هنگام خرابی یکی از یونیت‌های ترانسفورمر یکسوساز امکان‌پذیر است. همچنین محاسبات، اطلاعات مربوط به انرژی مصرفی و ولتاژ ریل نسبت به زمین را در اختیار قرار می‌دهند. به منظور توانایی در انجام شبیه‌سازی و محاسبات، داده‌های مربوط به وسیله نقلیه مورد نیازند، به عنوان مثال دانستن مشخصات موتور در حالت موتوری و ترمزی، وزن آن و همچنین داده‌های خط از قبیل: شیب، قوس و سرعت بیشینه لازم است. داده‌های مربوط به خط تماس و مدار برگشت جریان، محل پستها و برنامه بهره‌برداری همگی بایستی مشخص شوند. مرحله اول در شبیه‌سازی شبکه تغذیه ترکشن، شبیه‌سازی دینامیکی حرکت قطار است تا در هر لحظه، مکان، سرعت، شتاب و توان مصرفی وسیله نقلیه مشخص شود. به این منظور موضوع این مقاله به مطلب اخیر اختصاص یافته است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی دینامیک، حرکت قطار، گراف حرکت

#### 1. مقدمه

در داخل کشور موجود نبود. شبیه‌سازیهای انجام شده در دنیا به صورت بحث تجاری مطرح‌اند و چند شرکت مشاور بزرگ و به ویژه شرکت‌های تولید کننده تجهیزات ترکشن DC هر یک نرم‌افزاری را که خود طراحی و نوشته‌اند مورد استفاده قرار

از آنجا که بحث طراحی خطوط مترو و قطارهای سبک شهری که با سیستم تغذیه DC کار می‌کنند، در کشور ما بحثی نو است و طراحی‌های انجام گرفته تماماً توسط شرکت‌های خارجی انجام شده‌اند. بنابراین با بررسیهای انجام شده، طراحی و تحقیق مشابهی

همچنین در زمان حرکت واگنهای موتوردار و تریلرها نیروهای مقاوم دیگری نیز به شرح زیر در طول خط به آنها وارد می‌شود [1]:

- نیروی مقاوم در شیب و فرازاها
- نیروی مقاوم در قوس‌ها
- نیروی مقاوم در سوزنها
- نیروی مقاوم در تونلها

از آن جا که مقادیر مربوط به مقاومتها به پارامترهای گوناگون بستگی دارند و استخراج فرمولهای منطقی ریاضی برای آنها مشکل است، در عمل به منظور مشخص کردن این مقاومت، آزمایش‌هایی انجام می‌شود که نتیجه آنها به صورت فرمولها و جداولی منعکس می‌شود. همان طور که یادآوری شد کلیه مقاومتهای مؤثر به دو دسته تقسیم می‌شوند.

## 2-1 نیروهای مقاوم اصلی

از آنجا که مقاومت هوا، اصطکاک بین چرخها و ریلها، اصطکاک موجود در یاتاقانها و سر محورها و مقاومت حاصل از ضربه چرخها در درزها دائماً در قطارهای در حال حرکت وجود داشته و به صورت نیروهای مقاوم اثر می‌کند، به این جهت برآیند این مقاومتها را مقاومت اصلی می‌نامند. برای تعیین نیروی مقاومتهای اصلی آزمایشهایی در شرکت سازنده وسیله نقلیه ریلی انجام می‌گیرد و ضرایب مربوطه در رابطه (1) مشخص می‌شوند. معروفترین رابطه که برای محاسبه نیروی مقاومت اصلی به دست آمده است، رابطه دیویس (DAVIS) به شرح زیر است [2]:

$$R_{av} = M \left( a + b \frac{v}{10} + c v^2 \right) \quad (1)$$

که در آن:

$R_{av}$  = نیروی مقاوم اصلی (نیروی مقاوم وابسته به سرعت) (N)

$M$  = جرم وسیله نقلیه ریلی (kg)

$V$  = سرعت (km/h)

$a$  و  $b$  = ضرایب تجربی

$c$  = ضریب آیرودینامیکی

در رابطه (1)، مقدار  $a$ : معرف نیروی مقاوم ناشی از سرمحورها، مقدار  $\frac{bv}{10}$  معرف نیروی مقاوم ناشی از خط و  $c v^2$  معرف نیروی مقاوم ناشی از هوا و باد است. یادآوری می‌شود که ضریب

می‌دهند و چند شرکت بسیار محدود نیز با قیمتهای بسیار کلان نرم‌افزار خود را به فروش می‌رسانند.

از جمله شرکتهای فعال در این زمینه که در طراحی این نرم‌افزار با آنها نیز مکاتبه شده است، شرکتهای "Secheron" کشور سوئیس، "Enotrac" کشور انگلستان، همچنین شرکتهای "Metropolitan Milanese (MM)" و "SciroIdea" واقع در کشور ایتالیا هستند که از تجارب بلندمدت آنها بهره گرفته شده است. یادآوری می‌شود که کلیه شرکتهای نام برده تجارب ارزشمندی در انجام شبیه‌سازی پستهای یکسوساز مترو در سراسر دنیا دارند که از جمله آنها می‌توان به شبیه‌سازی خطوط 6، 7 و 8 متروی سئول و خط 2 متروی پوسان و خط 1 متروی تهران توسط شرکت Secheron و شبیه‌سازی خط متروی کپنهاک دانمارک، اپرتوی پرتغال و خط 3 متروی میلان توسط شرکت MM اشاره کرد.

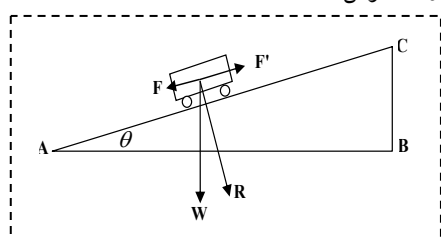
نیروهای وارد بر وسیله نقلیه شامل نیروهای مقاوم و محرک‌اند. در بحث دینامیک قطارها، نیرویی که از طرف لکوموتیو تأمین می‌شود، نیروی محرک است. نیروهای مقاوم که در برابر حرکت قطار مؤثرند نیز بر دو دسته تقسیم می‌شوند که به اولین آنها نیروهای مقاوم اصلی و به دیگری نیروهای مقاوم مربوط به ساختمان خط گفته می‌شود. در ادامه، معادله حرکت و فلوچارتی مبنی بر نمایش محدودیتهای موجود که بایستی در برنامه نرم‌افزاری مدنظر قرار گیرند آورده می‌شود. داده‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار، نکات اساسی در حل معادلات مکانیکی و نتایج خروجی اخذ شده از نرم‌افزار ارایه می‌شود.

## 2. نیروهای مقاوم در برابر حرکت

زمانی که واگنهای موتوردار و تریلرها در مسیری موازی سطح افق (شیب برابر با صفر) و بدون قوس حرکت می‌کنند، نیروهای بازدارنده زیر بر آنها مؤثر بوده و برآیند آنها را نیروهای مقاوم اصلی می‌نامند [1]:

- نیروی اصطکاک بین چرخها و ریلها.
- نیروی اصطکاک در یاتاقانها و سرمحورها
- نیروی اصطکاک هوا
- نیروی مقاومت حاصل از ضربه چرخها در درزها.

مقاومت قوس می شوند. اگر چه این نظریه منطقی به نظر می رسد ولی آزمایش های انجام شده آن را تأیید نمی کنند. نظریه چرخ در گردش ارایه شده توسط Sullivan بیان می دارد که یک چرخ متحرک همواره تمایل دارد که در امتداد مسیری عمود بر محور دوران حرکت کند. این تمایل در حرکت چرخ های قطار در قوس، باعث برخورد چرخ های بیرونی قطار با ریل بیرونی و ایجاد فشار شدید از طرف فلانچ چرخ به ریل می شود که باید آن را عامل ایجاد مقاومت قوس دانست. آزمایش های Sullivan نشان داده است که عواملی نظیر سرعت حرکت قطار، تناژ قطار، شعاع انحنای مسیر و وضعیت محیطی چرخها و ریل ها را نباید بی تأثیر در ایجاد مقاومت قوس انگاشت.



شکل 1. نمایش نیروی مقاومت شیب

## 2-2-3 مقدار مقاومت شیب و قوس

مقدار مقاومت در مقابل حرکت قطار در قوس ها از طریق روش های اندازه گیری به دست می آید، زیرا روش ها و نظریه های تئوریک و تحلیلی اغلب متضاد و غیر قابل اعتمادند. نیروهای مقاوم یاد شده به شرح زیر محاسبه می شوند [۲]:

$$R_{par} = \left[ \frac{750}{r} + 10P \right] \cdot M \quad (3)$$

که در آن:

$R_{par}$  = مقاومت خط [N]

$r$  = شعاع قوس [m]

$P$  = شیب [0/00]

$M$  = جرم مؤثر وسیله نقلیه [tone]

یادآوری می شود که فرمول فوق در مورد راه آهن های زیرزمینی کاربرد دارد و نیروی مقاوم خط برای ترامواها از فرمول زیر قابل محاسبه است [۲].

$$R_{par} = \left[ \frac{4000}{r - 20} + 10P \right] \cdot M \quad (4)$$

آیرو دینامیکی (c) در این رابطه هنگام حرکت قطار در داخل تونل به منظور انعکاس افزایش مقاومت دیده شده توسط قطار افزایش می یابد.

## 2-2-2 نیروهای مقاومت مربوط به ساختمان خط

حال به نیروهای مقاوم مکانیکی می پردازیم که به سرعت حرکت قطار وابسته نیستند. این نیروهای مقاوم نتیجه شیب و فراز و قوس موجود در طول خط هستند.

## 2-2-1 مقاومت شیب<sup>1</sup>

شکل 1 حرکت ماشین ریلی به وزن  $W$  روی سطح شیب داری که با سطح افقی زاویه  $\theta$  می سازد را نشان می دهد. در این شکل مؤلفه های نیروی وزن در امتداد عمود بر سطح و در امتداد سطح به ترتیب با  $R$  و  $F$  نشان داده شده است. می توان نوشت [3]:

$$F = W \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = W \cdot \sin \theta \quad (2)$$

که در آن  $\sin \theta = \frac{BC}{AC}$  است.

از رابطه (2) مشخص است که برخلاف مقاومت هایی که قبلاً بررسی شدند (مقاومت های ناشی از چرخش چرخ، یاتاقانها و هوا) مقاومت شیب به سرعت حرکت قطار بستگی ندارد.

می توان این گونه نتیجه گیری کرد که به ازای هر یک هزارم شیب مسیر به هر تن وزن قطار، یک کیلوگرم نیروی مقاومت در اثر شیب وارد می شود. به طور قراردادی این نیروی مقاومت در صورتی که حرکت به طرف بالای شیب باشد مثبت و در حالتی که به طرف پائین باشد منفی در نظر گرفته می شود.

## 2-2-2 مقاومت قوس<sup>2</sup>

یکی از مهم ترین و پیچیده ترین مقاومت ها در مقابل حرکت قطار مقاومت ناشی از وجود قوس در خط است که بخشی از توان لکوموتیو باید صرف جبران آن شود. این مقاومت معمولاً به ازای یک تن وزن قطار و به ازای یک درجه قوس، اندازه گیری و معرفی می شود. ساز و کار و چگونگی پیدایش مقاومت در قوس بسیار پیچیده است. در این رابطه نظریه های مختلفی وجود دارد که صرف نظر از جنبه های عام مشترک، در جزء با یکدیگر تشابهی ندارند. نظریه نیروی گریز از مرکز مبین آن است که چرخهای خارجی تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به سمت خارج حرکت کرده باعث تماس سخت فلانچ چرخ با ریل و بنابراین عامل

### 3. جرم مؤثر

بیشینه نیروی کشنده

حد سرعت مجاز

در طول انجام محاسبات، کنترل می‌شود که آیا نیروی کشنده  $Z_j$  به مقداری بیشتر از داده‌های مربوط به موتور افزایش می‌یابد یا خیر. این بررسی در طول محاسبات مربوط به سرعت با توجه به مشخصه موتور  $Z_j = f(v)$  صورت می‌گیرد. در محاسبات مربوط به مسیر طی شده بایستی این موضوع مد نظر قرار گیرد که آیا طول مسیر باقی مانده تا توقف بعدی کافی است یا خیر. اگر پاسخ مثبت بود، نیروی کشنده برای توالی بعدی نیز حفظ می‌شود. سرعت در محل و زمان مورد نظر و همچنین مکان طی شده؛ زمان و فاصله ترمزی محاسبه می‌شوند. در این فلوچارت، اگر جواب به شرط  $S < S_{max}$  منفی بود، به معنی رسیدن به محل ایستگاه است و منظور از stop توقف قطار در محل ایستگاه به اندازه dwell time (pause) است. سپس وجود فیدبک در فلوچارت طی مسافت بین دو ایستگاه بعد را بیان می‌کند که طبعاً در این فیدبک، فاصله بین دو ایستگاه بعد، محدودیتهای سرعتی در این فاصله و سرعتهای مربوط مد نظر قرار خواهد گرفت. این عمل توسط فرمولهای فیزیک دینامیک به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$v_m = at + v_{m-1} \quad (7)$$

$$x_m = \frac{1}{2} a t^2 + v_{m-1} t + x_{m-1}$$

$$v_m^2 - v_{m-1}^2 = 2ax$$

- در حالت حرکت مستقیم و یکنواخت

$$x_m = vt + x_{m-1} \quad (8)$$

تعیین سرعت و مسافت طی شده به عنوان تابعی از زمان، منجر به رسم نمودارهای سرعت و نیروی کشنده به عنوان تابعی از مسافت طی شده و محل وسیله نقلیه می‌شوند.

### 5. داده‌های ورودی مورد نیاز نرم‌افزار

#### 5-1 داده‌های مربوط به وسیله نقلیه

تعداد واگنهای تریلر و موتوردار

جرم وسیله نقلیه ریلی و جرم مسافین

ضریب اجرام دوار

طول قطار

ضرایب فرمول دیویس به منظور محاسبه نیروهای مقاوم

حد بیشینه شتابهای مثبت و منفی و بیشینه سرعت قطار

هنگامی که قطار در طول مسیر شتاب می‌گیرد، کل جرم قطار (جرم خالص و جرم بار یا مسافر) به طور خطی شتاب می‌گیرد. اما قسمتهای چرخنده به صورت چرخشی نیز دارای شتاب می‌شوند. این قسمتها معمولاً شامل مجموعه چرخها، دنده‌ها و موتورها هستند. معمول است که اثر اینرسی چرخشی به صورت افزایش در جرم خطی مؤثر قطار به نام "Rotary allowance" بیان می‌شود و به عنوان کسری از جرم خالص قطار در نظر گرفته می‌شود. مقدار "Rotary allowance" بین 5٪ تا 15٪ بسته به تعداد محورهای موتوردار، نسبت چرخ‌دنده‌ها و نوع ساختار وسیله نقلیه متفاوت است [4].

$$\begin{aligned} \text{Effective mass} = & \\ \text{actual tare mass} \times & \\ (1 + \text{rotary allowance in p.u.}) + & \\ + \text{passenger or freight} & \end{aligned} \quad (5)$$

### 4. معادله حرکت

برنامه رایانه‌ای، سرعتهای لحظه‌ای در هر محل را در نظر می‌گیرد، در طول حالت موتوری، حرکت وسیله نقلیه توسط فرمول زیر نشان داده می‌شود [2].

$$Z_j - [R_{par} + R_{av}] = M\rho \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

که در آن:

$M$  = جرم مؤثر وسیله نقلیه

$\rho$  = ضریب جرمهای چرخنده

$v$  = سرعت

$Z_j$  = نیروی کشنده در لبه چرخها

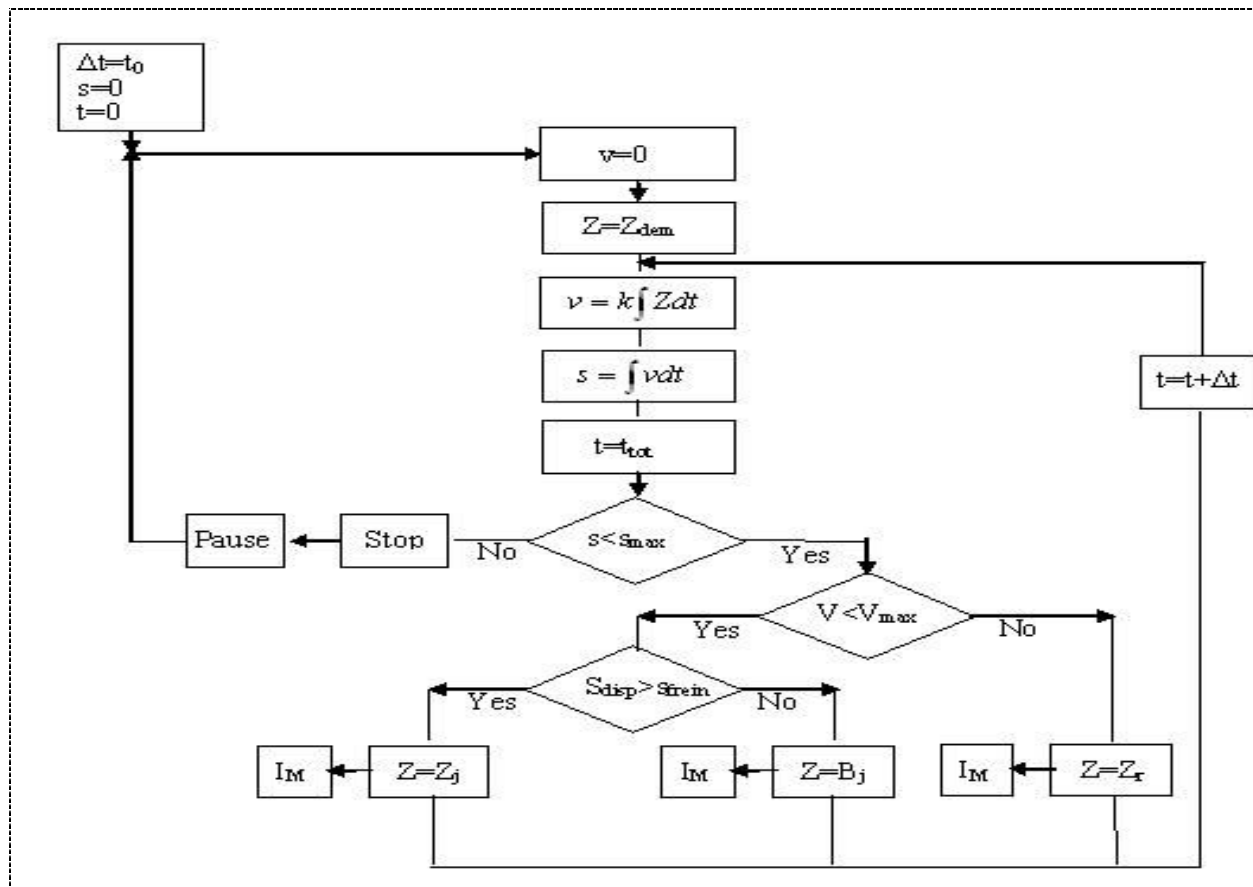
$R_{par}$  = نیروهای مقاوم مستقل از سرعت

$R_{av}$  = نیروهای مقاوم وابسته به سرعت

با در نظر گرفتن فواصل زمانی کوتاه و حل متوالی معادلات حرکت دینامیکی در هر لحظه، سرعت حرکت قطار به عنوان تابعی از زمان و مسافتی که قطار از نقطه شروع حرکت طی کرده است، حاصل می‌شود. فلوچارت موجود در شکل 2 محدودیتهای موجود را که بایستی در برنامه نرم‌افزاری مدنظر قرار گیرند در بر می‌گیرد [2].

بیشینه شتاب در طول حرکت (شتاب مثبت و شتاب ترمزی)

بیشینه تغییر شتاب در زمان راه اندازی



شکل 2. فلوچارت محاسبات

جدول 1. نمایش سرعت تجاری در دو مسیر رفت و برگشت

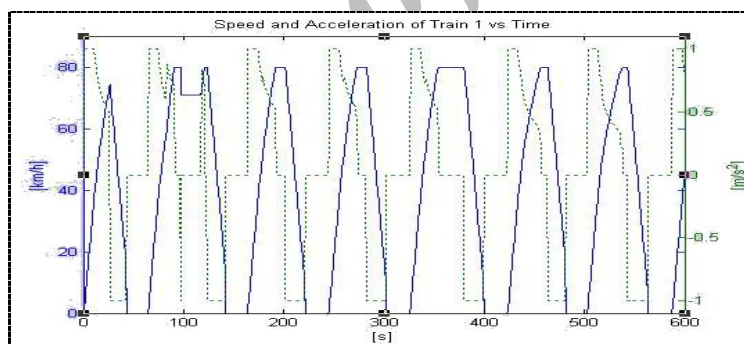
$K$ = عدد ثابت	$B_j$ = نیروی ترمزی در چرخ
$S$ = فاصله طی شده بین دو ایستگاه	$I_M$ = جریان موتور
$S_{disp}$ = فاصله باقیمانده تا ایستگاه	$Z$ = نیروی کشنده
$S_{max}$ = فاصله بین توقفها	$Z_{dem}$ = نیروی کشنده راه اندازی
$t$ = زمان	$Z_j$ = نیروی کشنده در لبه چرخ
$v$ = سرعت	$Z_r$ = نیروی مورد نیاز برای حفظ سرعت
	$S_{frein}$ = فاصله ترمزی

جدول 2. نمایش متوسط سرعت حرکت بین ایستگاهها در مسیر رفت

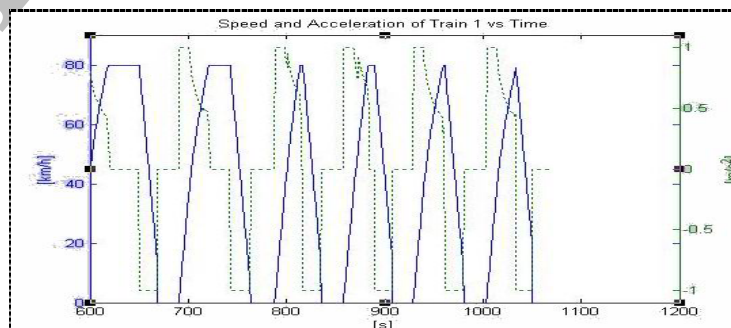
Train	From	To	Commercial Speed (km/h)
Train 1	Parking-Area	14	36.9
Train 2	14	Parking-Area	36.9

From	To	Average Speed(Km/h)	Dx(m)	Dt (s)
Parking-Area	A4-3	40.7	509	45
A4-3	A4-2	44.2	1228	100
A4-2	A4-1	50.2	810	58
A4-1	A4	50.2	810	58
A4	B4	56.4	1176	75
B4	C4	51.2	840	59
C4	D4	49.7	843	61
D4	E4	59.2	1349	82
E4	F4	41.2	1122	98
F4	G4	46.1	615	48
G4	G4-13	48.8	678	58
G4-13	H4	46.6	674	52
H4	14	46.2	616	48

در شکل های 3 و 4 نمودارهای سرعت و شتاب- زمان و سرعت و شتاب- مکان به عنوان نمونه آورده شده است.

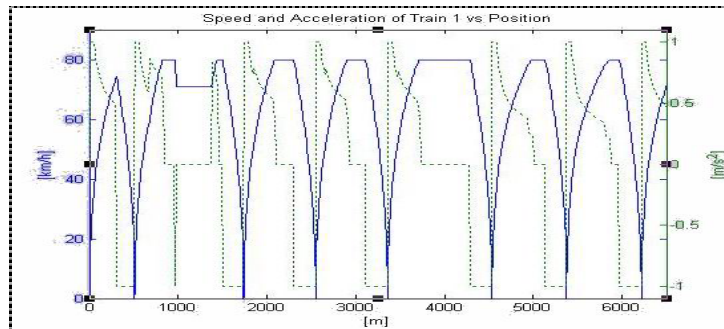


شکل 3. الف) نمودار سرعت و شتاب- زمان مربوط به قطار رفت

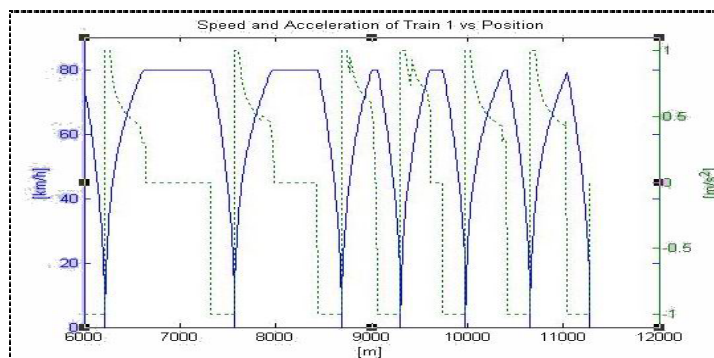


شکل 3. ب) ادامه نمودار سرعت و شتاب- زمان مربوط به قطار رفت

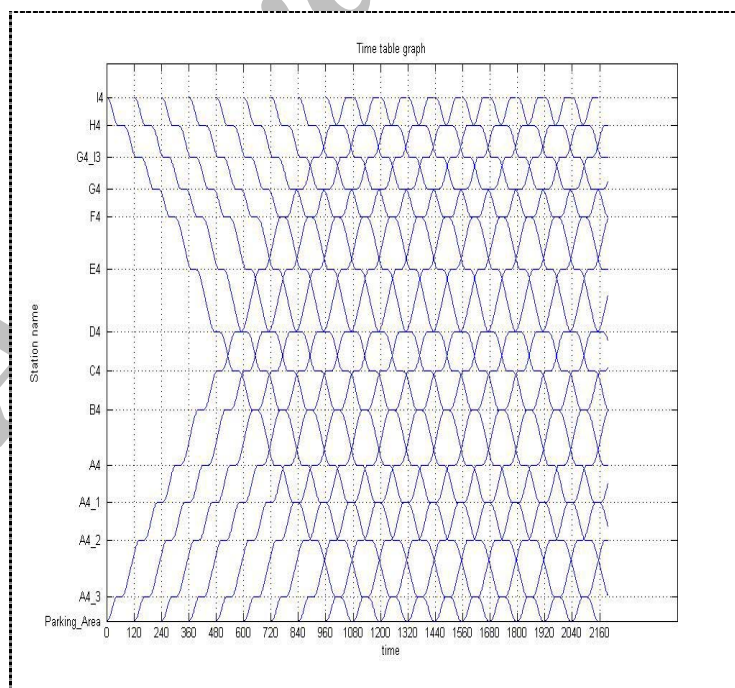
## شبیه سازی دینامیک حرکت قطار در راه آهن شهری



شکل 4. الف) نمودار سرعت و شتاب- مکان مربوط به قطار رفت



شکل 4. ب) ادامه نمودار سرعت و شتاب- مکان مربوط به قطار رفت



شکل 5. گراف حرکت

## 9. مراجع

1. آذری، خسرو (1382) "مهندسی راه آهن"، تهران: مهندسین مشاور مترا.
2. Vormes, G. (1985) "Optimization of power supply for dc traction network", Secheron. [n.p.]
3. Goodman, C. J. (1997) "Train performance and simulation", IEE power Division; 4<sup>th</sup> vacation school and electric traction systems, pp. a2-1\_a2-13.
4. Rombukwella, N. B., Mellitte, B., Goodman, C. J. and Mouneimne, Z. S. (1987) "Traction equipment modeling and power network solution for dc supplied rapid transit power systems studies, "ITT, International
5. Dover (1983) (AT. Electric Traction), Pitman and Sons Ltd., London.
6. Mellitte, B., Goodman, C. J. and Mouneimne, Z. S. (1984) "Simulation study of dc transit systems with inverting substations", IEE, Vol. 131, No. 2, , pp 38-50.
- پانویس ها
1. Grade resistance
  2. Curve resistance
  3. High voltage substation