

## مدل سازی سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل

سجاد صدر<sup>۱\*</sup>، داود عرب خابوری<sup>۲</sup>، مصطفی نمازی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۰۷	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
چسبندگی،	از آنجا که حمل و نقل ریلی یکی از امن ترین و پاک ترین شیوه های حمل بار و مسافر است لذا تحقیق بر روی بهبود عملکرد زیر سیستم های آن می تواند موضوعی در راستای نیاز صنعت باشد. یکی از مهم ترین زیر سیستم های هر وسیله نقلیه ای بخش محرکه آن است. حرکت بر روی ریل به دلیل صیقلی بودن چرخ و ریل، به میزان بسیار کمتری از انرژی نسبت به حرکت خودرو بر روی سطح آسفالت نیاز دارد. لیکن کم بودن اصطکاک سبب در جا چرخیدن چرخ قطار بر روی ریل خواهد شد. اگر میزان درجا چرخیدن چرخ قطار از یک حدی بالاتر برود سبب کاهش شتاب قطار و کاهش عمر چرخ و ریل می گردد، لذا کنترل این میزان درجا چرخیدن چرخ دارای اهمیت ویژه ای است. از این رو داشتن مدلی جهت سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل، می تواند مفید واقع گردد. در این مقاله پس از بیان تاریخچه کنترل لغزش، با کنار هم قرار دادن معادلات حرکت و استفاده از یک رویکرد چسبندگی قسمت مکانیکی سیستم مدل شده است. در زیر سیستم کنترل سرعت، جهت کنترل سرعت موتور قطار، که از نوع موتور القایی است، روش کنترل برداری پیشنهاد گردیده است. با کنار هم قرار دادن اجزا مکانیکی، موتور الکتریکی و روش کنترل سرعت موتور، مدل مورد نظر بصورت کامل ارائه گشته است. سپس با انجام شبیه سازی در نقاط مختلف کاری صحت عملکرد مدل ارائه شده مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است.

### علائم اختصاری

$\theta$ : زاویه شیب ریل (رادیان)	$\omega_{wh}$ : سرعت زاویه ای چرخ (رادیان بر ثانیه)
$\lambda$ : لغزش چرخ (ضریب نسبی و بدون واحد)	$F_a$ : نیروی چسبندگی (نیوتن)
$\lambda_m$ : لغزش چرخ در حداکثر چسبندگی (ضریب نسبی و بدون واحد)	$F_g$ : نیروی مخالف محرکه، حاصل از وزن قطار در شیب (نیوتن)
$\mu$ : ضریب چسبندگی (بدون واحد)	$F_m$ : نیروی محرکه چرخ (نیوتن)
$\mu_r$ : ضریب چسبندگی (بدون واحد)	$F_r$ : نیروی مقاوم در برابر حرکت قطار (نیوتن)
$\mu_m$ : حداکثر ضریب چسبندگی (بدون واحد)	$g$ : شتاب گرانش زمین (نیوتن بر مجذور ثانیه)
$\hat{\mu}$ : ضریب چسبندگی تخمینی (بدون واحد)	$J$ : ممان اینرسی چرخ (کیلوگرم - مترمربع)
$\tau_a$ : گشتاور چسبندگی (نیوتن - متر)	$M$ : جرم قطار (کیلوگرم)
$\tau_m$ : گشتاور محرکه چرخ (نیوتن - متر)	$N$ : نیروی عمود بر سطح بین چرخ و ریل (نیوتن)
	$r$ : شعاع چرخ (متر)
	$t$ : زمان (ثانیه)
	$T_0$ : ثابت زمانی نمونه برداری (ثانیه)
	$v_s$ : سرعت لغزش (متر بر ثانیه)
	$v_r$ : سرعت قطار (متر بر ثانیه)
	$V_r$ : سرعت قطار (کیلومتر بر ساعت)
	$v_{wh}$ : سرعت چرخ دارای محرکه (متر بر ثانیه)

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sajadsadr@iust.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت

۳. کارشناس شرکت مهندسی و ساخت لوکوموتیو مینا

## ۱- مقدمه

مزیت اصلی حمل و نقل ریلی در کم بودن اصطکاک بین چرخ و ریل است [۱ و ۲] بدین معنا که در فاصله و شرایط یکسان، حرکت بر روی ریل به میزان بسیار کمتری از انرژی، نسبت به حرکت بر روی جاده نیاز دارد. لیکن همین اصطکاک ضعیف، سبب ایجاد لغزش/سُر خوردگی چرخ قطار بر روی ریل، در هنگام افزایش/کاهش سرعت می‌گردد. کنترل لغزش در مورد قطارهای درون شهری در مقایسه با قطارهای بین شهری به دلیل راه‌اندازی‌ها و ترمزهای پایایی از اهمیت بیشتری برخوردار است. البته به دلیل وزن کمتر قطارهای درون شهری و سیستم محرکه توزیع شده آن‌ها، اصولاً پیاده‌سازی سیستم کنترل سرعت آن‌ها دارای پیچیدگی‌های خاص خود است. کنترل لغزش چرخ قطار بر روی ریل در سه حوزه: ۱- کنترل لغزش در هنگام ترمز ۲- کنترل لغزش در هنگام افزایش سرعت (شتاب‌گیری) ۳- روش‌های کنترل سرعت موتور قطار جهت کنترل لغزش، می‌تواند محل تحقیق باشد. از آنجا که از بین این سه محور تحقیق، تاکنون کمتر به بحث کنترل لغزش به هنگام افزایش سرعت پرداخته شده است لذا تمرکز این مقاله، بر مدل‌سازی حرکت قطار بر روی ریل به جهت کنترل لغزش در هنگام افزایش سرعت است.

## ۱-۱- کنترل لغزش در شرایط ترمزی

کنترل لغزش در شرایط ترمزی فصل مشترک بین سیستم‌های کنترل سرعت خودروها و قطارها می‌باشد. چرا که در هر دو مورد در هنگام ترمز (بخصوص برای وسیله نقلیه دارای وزن و سرعت بالا) پدیده لغزش سبب سُر خوردن وسیله نقلیه و کاهش شتاب ترمز می‌گردد. از این‌رو در این باب تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است. از تحقیقات انجام گرفته در بحث کنترل لغزش به هنگام ترمز، می‌توان به اصول سیستم کنترل ترمز ضد قفل (ABS) [۳]، کنترل غیر خطی ترمز ضد قفل [۴]،

تخمین ضریب اصطکاک جهت بهبود عملکرد ترمز ضد قفل [۵]، کنترل غیر خطی و مقاوم لغزش در زمان ترمز [۶]، کنترل مجزای چرخ‌های جلو و عقب خودرو در هنگام ترمز [۷]، کنترل تطبیقی<sup>۲</sup> لغزش در زمان ترمز [۸] و استفاده از کنترل فازی<sup>۳</sup> در ترمز ضد قفل [۹] اشاره داشت. جهت مدل‌سازی پدیده لغزش در شرایط ترمزی دو مدل وجود دارد: نخستین، مدلی استاتیک بر پایه‌ی مدل بیم<sup>۴</sup> است که بیشتر جهت مدل‌سازی در سیستم ترمز خودروها کاربرد دارد. مدل دوم بر اساس مدل بریستول<sup>۵</sup> است که مدلی دینامیکی بوده و بیشتر در مدل‌سازی سیستم ترمز قطارها مورد استفاده واقع می‌گردد [۱۰] و [۱۱].

## ۲-۱- کنترل لغزش در شرایط شتاب‌گیری

از آنجا که لغزش چرخ بر روی ریل سبب تغییر ضریب چسبندگی چرخ و ریل می‌گردد، لذا میزان لغزش، شتاب قطار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بسیاری از مقالات به جهت پرهیز از بروز پدیده لغزش با هدف کاهش زمان شتاب‌گیری، جلوگیری از بروز هرگونه لغزش را پیشنهاد داده‌اند [۱۲-۱۶]. اساس این سیستم‌ها مشابه سیستم ترمز ضد قفل است. اگرچه با جلوگیری از ایجاد لغزش می‌توان از عدم رخداد بکسوات اطمینان حاصل نمود، لیکن همان‌گونه که نشان داده خواهد شد، حداکثر شتاب در یک درصد خاصی از لغزش رخ می‌دهد. ضریب چسبندگی علاوه بر میزان لغزش تابع پارامترهای دیگری نظیر شرایط فیزیکی چرخ و ریل است [۱ و ۲ و ۱۷]. از این‌رو روش دیگری که برای افزایش شتاب قطار می‌تواند مفید واقع شود افزایش ضریب چسبندگی از طریق پاشیدن شن [۱۸] و یا ریختن روغن خاص افزاینده اصطکاک [۱۹]، بین چرخ و ریل می‌باشد. در روش

<sup>۱</sup> Adaptive Control<sup>۲</sup> Fuzzy Logic<sup>۳</sup> Beam Model<sup>۴</sup> Bristle Model<sup>۵</sup> Anti-lock Braking System

مدل ارائه شده، اثر لغزش و چسبندگی بر گشتاور محرک و سرعت قطار نیز لحاظ شده است. در این مدل در حلقه داخلی سیستم کنترل سرعت، از کنترل برداری استفاده شده است که روشی کاملاً متداول در کنترل سرعت موتورهای القایی می‌باشد. آنچه در شتاب قطار اهمیت داشته و به بحث کنترل لغزش می‌انجامد، تعیین سرعت مرجع برای زیر سیستم کنترل برداری است.

در ادامه، مقاله در بخش ۲ به تشریح مفاهیم لغزش و چسبندگی می‌پردازد. در بخش ۳ معادلات حرکت قطار بر روی ریل شرح داده شده و بخش ۴ به رویتگر چسبندگی اختصاص دارد. پس از آنکه در بخش ۵ روش‌های کنترل سرعت موتور الکتریکی کشنده قطار ارائه شد، در بخش ۶ مدل سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل تکمیل می‌گردد. بخش ۷ نتایج شبیه‌سازی را بیان می‌دارد و در نهایت بخش ۸ نتیجه‌گیری مقاله است.

## ۲- لغزش و پدیده چسبندگی

پیش از بررسی سیستم کنترل چسبندگی و لغزش چرخ بر روی ریل (که به اختصار می‌توان آن را لغزش نامید)، می‌بایست به تعریف آن‌ها پرداخته و با مفاهیم آن‌ها آشنا شد. برای شروع، مدل ساده شده‌ای برای بررسی حرکت قطار را مطابق شکل ۱ فرض کنید. مفهوم سرعت لغزش  $v_s$  بصورت تفاضل سرعت قطار  $v_t$  (سرعت واقعی حرکت قطار نسبت به زمین) از سرعت خطی چرخ قطار  $v_{wh}$  تعریف می‌شود [۱ و ۲] یعنی:

$$v_s = v_{wh} - v_t \quad (1)$$

سرعت خطی چرخ  $v_{wh}$  نیز از حاصل ضرب سرعت زاویه‌ای چرخ  $\omega_{wh}$  در شعاع چرخ  $r$  بدست می‌آید [۱ و ۲]:

$$v_{wh} = r \omega_{wh} \quad (2)$$

و لغزش  $\lambda$  حاصل تقسیم سرعت لغزش به سرعت واقعی قطار است [۱ و ۲]:

پاشیدن شن و سنگریزه بر روی ریل، اندازه و جنس سنگریزه‌ها میزان افزایش ضریب چسبندگی را تعیین می‌کنند [۱۸]. البته باید خاطر نشان نمود که در روش [۱۸] و [۱۹] اساساً کنترل لغزش به صورت کمی در کار نیست. در آن روش صرفاً با تغییر ضریب اصطکاک بین چرخ و ریل میزان لغزش چرخ به صورت کیفی کاهش یافته و عملکرد سیستم بهبود پیدا می‌کند.

## ۱-۳- کنترل سرعت موتور قطار با در نظر

### گرفتن لغزش چرخ بر روی ریل

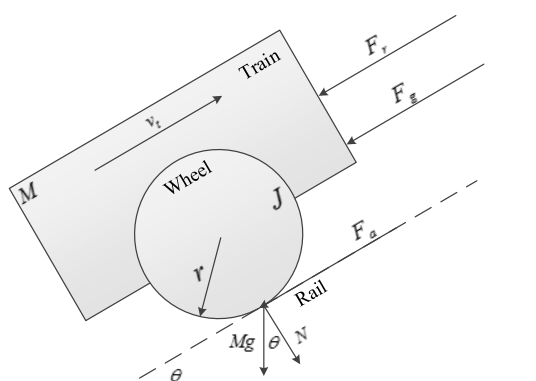
سیستم محرکه قطارهای الکتریکی شامل انواعی از موتورهای DC و AC می‌گردد [۱ و ۲۰-۲۲]. لیکن امروزه با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت و نظریه‌های کنترل سرعت موتورهای الکتریکی، تمایل بیشتر به سمت استفاده از موتورهای AC است. در کشنده‌های قطارهای الکتریکی در بین انواع موتورهای AC، موتور القایی به دلیل ساختار ساده و مقاومش ترجیح داده می‌شود.

چسبندگی بین چرخ ریل تابع میزان لغزش، دما، رطوبت، شرایط فیزیکی چرخ و ریل، سرعت قطار و نامعینی‌های دیگری است. لذا سیستم کنترل سرعت قطار در هنگام افزایش/کاهش سرعت می‌بایست بتواند به این تغییرات پاسخ سریع داشته باشد. از این‌رو در بین روش‌های کنترل سرعت موتور القایی شامل روش اسکالر [۲۳ و ۲۴]، روش کنترل مستقیم گشتاور [۲۳-۲۵]، روش کنترل برداری [۲۳-۲۵] و روش کنترل پیش‌بین [۲۶-۲۹]، نظریه کنترل برداری به علت دقت و سرعت پاسخ‌گویی بالاتر در سیستم کنترل کشنده‌های الکتریکی بیشتر کاربرد دارد.

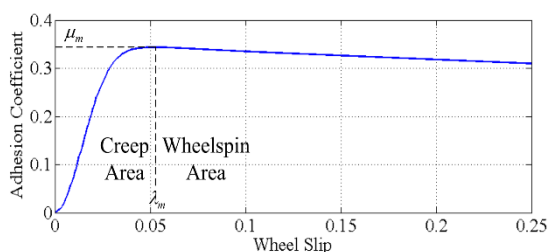
تمرکز این مقاله بر روی افزایش سرعت قطار به هنگام شتاب‌گیری با لحاظ اثر لغزش و چسبندگی است. از این‌رو در این نوشتار معادلات حرکت قطار و پدیده لغزش مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نوآوری این مقاله عبارت است از ارائه یک مدل جامع نرم‌افزاری جهت شبیه‌سازی انواع روش‌های کنترل سرعت قطار در هنگام افزایش سرعت. در

از این نکته نیز نباید غافل شد که ضریب چسبندگی علاوه بر وضعیت فیزیکی سطوح تماس، تابع سرعت حرکت نیز می‌باشد. هرچه حرکت سریع‌تر باشد ضریب چسبندگی کوچک‌تر است، به بیان ساده‌تر ضریب چسبندگی با سرعت رابطه عکس دارد که این نکته در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است.

از آنجایی که لغزش به معنای درجا زدن چرخ است؛ یک طریق بسیار ساده برای محاسبه لغزش استفاده از دو حس‌گر سرعت است که یکی سرعت چرخ دارای محرکه را حساب کند و دیگری سرعت یک چرخ فاقد محرکه را. در این صورت از حاصل ضرب شعاع چرخ‌ها در سرعت‌های زاویه‌ای به ترتیب به سرعت خطی چرخ قطار و سرعت واقعی قطار دست یافته و به راحتی از رابطه ۳ می‌توان لغزش را حساب نمود.



شکل ۱- مدل ساده شده قطار برای بررسی حرکت قطار بر روی ریل



شکل ۲- منحنی ضریب چسبندگی بر حسب لغزش [۲]

$$\lambda = \frac{v_s}{v_t} = \frac{v_{wh} - v_t}{v_t} \quad (3)$$

ضریب اصطکاک سطحی بین چرخ قطار و ریل را در محل تماس ضریب چسبندگی ( $\mu$ ) گویند. در واقع به دلیل وجود چسبندگی بین چرخ و ریل است که قطار می‌تواند حرکت کند. به بیان بهتر هنگامی که چرخ توسط نیروی موتور به چرخش واداشته می‌شود تمایل دارد ریل را به عقب براند. این اصطکاک یا همان چسبندگی است که باعث می‌شود چرخ درجا نزده و قطار به جلو رانده شود.

در شکل ۲ رابطه ضریب چسبندگی با لغزش چرخ بر روی ریل به تصویر کشیده شده است. با فرض آنکه لغزش چرخ بر روی ریل صفر باشد، با توجه به منحنی لغزش، با افزایش گشتاور محرک به جهت افزایش سرعت، به دلیل صفر بودن چسبندگی، چرخ بر روی ریل می‌لغزد که با افزایش لغزش ( $\lambda$ ) میزان ضریب چسبندگی ( $\mu$ ) بیشتر می‌شود. اگر به همین صورت لغزش زیاد شود به نقطه قله منحنی رسیده سپس با افزایش لغزش ضریب چسبندگی کمتر می‌شود، یعنی افزایش گشتاور محرک، بیشتر سبب درجا چرخیدن چرخ می‌شود تا افزایش سرعت قطار. این یعنی استهلاک و عدم کنترل‌پذیری. به ناحیه بین لغزش صفر تا لغزش معادل ضریب چسبندگی حداکثر در اصطلاح ناحیه خزش (Creep Area) یا ناحیه چسبندگی گویند. در طرف مقابل به ناحیه‌ای که در آن لغزش بزرگ‌تر از لغزش متناسب با چسبندگی حداکثر است ناحیه بکسوات (Wheelspin Area) گویند.

لیکن هر جا صحبت از چسبندگی و اصطکاک باشد وضعیت فیزیکی سطح تماس یعنی تمیز بودن یا نبودن، مرطوب یا خشک بودن، صیقلی بودن یا نبودن و ... بالاترین تأثیر را دارا است. به عبارت بهتر هرگاه این سطوح تماس چرخ و ریل تمیز و خشک باشد ضریب چسبندگی حداکثر است. در طرف مقابل خیس یا روغنی بودن ریل و یا حتی ریختن برگ درختان بر روی ریل باعث کاهش ضریب چسبندگی می‌شود (شکل ۳).

### ۳- معادلات حرکت قطار بر روی ریل

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، نیروی چسبندگی در جهت افزایش سرعت قطار وارد شده در حالی که نیروهای مقاوم در جهت مقابل وارد می‌گردند. در هنگام شتاب‌گیری همواره سرعت خطی چرخ دارای محرکه از سرعت خطی قطار بیشتر بوده که به معنای لغزش مثبت است. با کنار هم قرار دادن معادلات حرکت، [۱ و ۲ و ۳۰] مدل شبیه‌سازی مشابه شکل ۵ برای حرکت استخراج می‌گردد:

$$M \frac{d}{dt} v_t = F_a - F_r - F_g \quad (۴)$$

$$F_a = \mu(\lambda)N \quad (۵)$$

$$F_g = Mg \sin(\theta) \quad (۶)$$

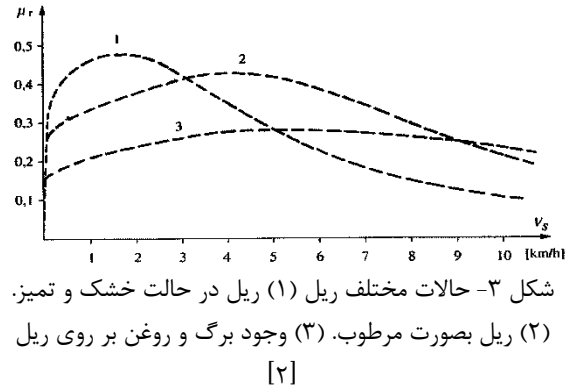
$$F_r = (k_0 + k_1 V_t + k_2 V_t^2) Mg \quad (۷)$$

$$J \frac{d}{dt} \omega_{wh} = \tau_m - \tau_a \quad (۸)$$

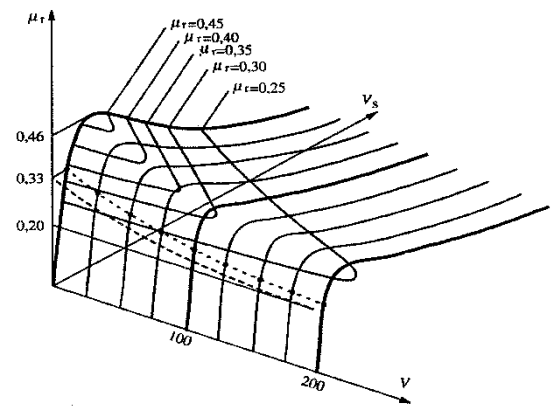
$$\tau_a = r F_a \quad (۹)$$

$$\tau_m = r F_m \quad (۱۰)$$

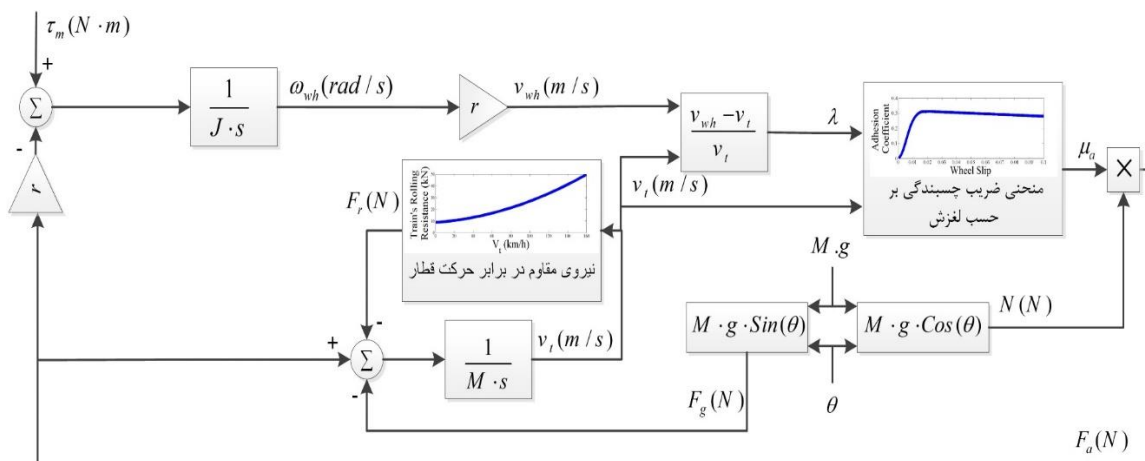
لازم به ذکر است که ضرایب  $k_0$ ،  $k_1$  و  $k_2$  در معادله ۶ بر اساس وزن و تعداد واگن‌های قطار تعیین می‌گردند.



شکل ۳- حالات مختلف ریل (۱) ریل در حالت خشک و تمیز. (۲) ریل بصورت مرطوب. (۳) وجود برگ و روغن بر روی ریل [۲]



شکل ۴- تاثیر سرعت قطار بر روی منحنی چسبندگی - لغزش [۲]



شکل ۵- مدل استنباط شده از حرکت قطار با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل (از کنار هم قرار دادن معادلات ۱ الی ۱۰ بدست آمده است)

پیشرفت الکترونیک قدرت، در سیستم رانش قطارها، استفاده از موتورهای AC روز به روز بیشتر گردید [۲۱] و [۲۲]. موتورهای القایی به دلیل ساختار ساده و کم استهلاک بودن، در سیستم‌های محرکه از جایگاه خاصی برخوردارند. از این‌رو موتور محرکه کشنده قطارهای الکتریکی نیز عموماً از نوع القایی است. جهت کنترل سرعت موتورهای القایی روش‌های متنوعی وجود دارد.

در روش سنتی کنترل اسکالر، به دلیل وابستگی معادلات شار و گشتاور به هم، کنترلی بر دینامیک ماشین وجود ندارد. از این‌رو نمی‌توان تغییرات گشتاور را مهار نمود و کنترل سرعت با دقت پایینی انجام می‌شود. لذا از روش بهتری برای کنترل سرعت یعنی روش کنترل برداری و یا کنترل مستقیم گشتاور [۲۵] می‌بایست استفاده نمود. در روش کنترل برداری از آنجا که حلقه بسته کنترل جریان محورهای طولی و عرضی ( $i_d, i_q$ ) وجود دارد؛ لذا جریان، شار و گشتاور ماشین تحت کنترل است. در کنترل مستقیم گشتاور به کمک کنترل حلقه بسته با کنترل کننده‌های هیستریزس گشتاور ماشین و به تبع آن سرعت ماشین را کنترل می‌کنند. در مواردی که کنترل سرعت ماشین‌های القایی توان بالا مد نظر است استفاده از کنترل برداری به دلیل قابلیت بیشتری که در کنترل دینامیک ماشین دارد ترجیح داده می‌شود. از آنجا که بحث این نوشتار کنترل موتور قطار الکتریکی که از نوع موتور القایی توان بالا می‌باشد است، لذا در زیر سیستم کنترل سرعت این مقاله از کنترل برداری استفاده شده است. بلاک دیاگرام زیر سیستم کنترل برداری [۲۳ و ۲۴] در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### ۶- مدل استخراج شده برای حرکت قطار بر

##### روی ریل

حال می‌توان با ترکیب اجزا به دست آمده در بخش‌های قبل به مدل مورد نظر رسید. مدل به دست آمده در این مقاله برای حرکت قطار با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل (شکل ۵)، در کنار رویکرد چسبندگی [۱۰] (شکل ۶)

#### ۴- تخمین چسبندگی به کمک رویکرد

نباید فراموش کرد که برخلاف لغزش، چسبندگی یک کمیت متغیر و غیر قابل اندازه‌گیری است. به عبارت دیگر چسبندگی یک نامعینی بوده و می‌بایست در پی یک رویکرد برای تعیین ضریب چسبندگی بود. با استفاده از روابط (۸) تا (۱۰) می‌توان گفت:

$$J \frac{d}{dt} \omega_{wh} = \tau_m - N \mu(\lambda) r \quad (11)$$

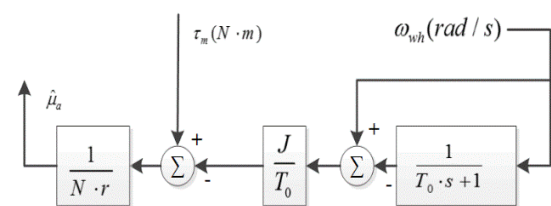
انتظار می‌رود با معادله‌ای در فضای لاپلاس مطابق رابطه (۱۲) بتوان ضریب چسبندگی را با تخمین معین نمود:

$$\mu(\lambda) = (\tau_m - sJ \omega_{wh}) / (Nr) \quad (12)$$

لیکن نباید فراموش کرد که استفاده از مشتق‌گیر، شدیداً معادلات را ناپایدار می‌کند. روش رویکرد اغتشاش [۱۰] پیشنهاد جایگزینی عملگر مشتق‌گیری ( $s$ ) با رابطه (۱۳) را دارد. در این صورت به کمک رابطه (۱۴) می‌توان ضریب چسبندگی را با تخمین برآورد نمود که بلاک دیاگرام آن در شکل ۶ نمایش داده شده است.

$$s = \frac{1}{T_0} \left( 1 - \frac{1}{1 + sT_0} \right) \quad (13)$$

$$\hat{\mu}(\lambda) = \frac{(\tau_m - \frac{1}{T_0} (1 - \frac{1}{1 + sT_0}) J \omega_{wh})}{Nr} \quad (14)$$



شکل ۶- بلاک دیاگرام رویکرد چسبندگی

#### ۵- موتور الکتریکی محرکه قطار و سیستم

##### کنترل سرعت آن

در گذشته، موتور محرکه قطارهای الکتریکی اعم از متروها و قطارهای بین شهری از نوع DC بوده‌اند که شرح کاربردهای آن‌ها در مرجع [۲۰] بحث شده است. لیکن با

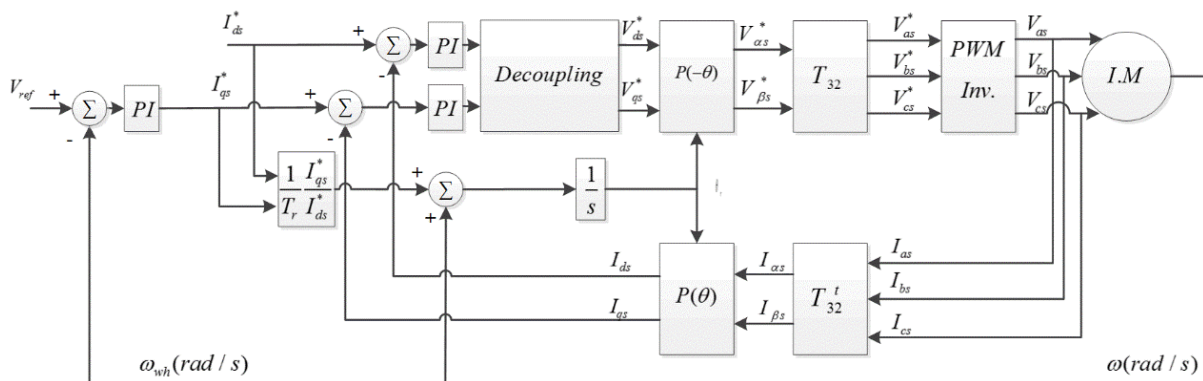
با توجه به گشتاور اعمالی و گشتاور چسبندگی سه امکان وجود دارد؛ گشتاور اعمالی به چرخ کوچک‌تر، بزرگ‌تر و یا مساوی گشتاور چسبندگی حداکثر باشد.

اگر گشتاور اعمالی کمتر از گشتاور حداکثر باشد نقطه کار در ناحیه خزش است. حال اگر مقدار گشتاور محرک از حداکثر گشتاور چسبندگی فزونی یافته و در آن مقدار ثابت باقی بماند بر اساس معادله ۹ و شکل ۲ نقطه کار به سمت راست مقدار حداکثر چسبندگی (ناحیه بکسوات) رفته که به دلیل شیب منفی منحنی، این ناحیه کلاً ناپایدار بوده و مدام بر سرعت چرخ افزوده می‌گردد تا آنکه محدود کننده سرعت موتور، سرعت چرخ را کاهش دهد. در این ناحیه ناپایدار علاوه بر کنترل پذیری ضعیف، استهلاک بالای چرخ و ریل به وقوع پیوسته است. حالت سوم عبارت از کنترل لغزش در لغزش معادل چسبندگی حداکثر به کمک یک سیستم کنترل مجهز به روینگر چسبندگی است. در این صورت در طی زمان شتاب‌گیری، از حداکثر چسبندگی چرخ و ریل استفاده شده و قطار در حداقل زمان ممکن به سرعت مرجع خواهد رسید. در ادامه، شبیه‌سازی هر سه حالت ارائه شده است.

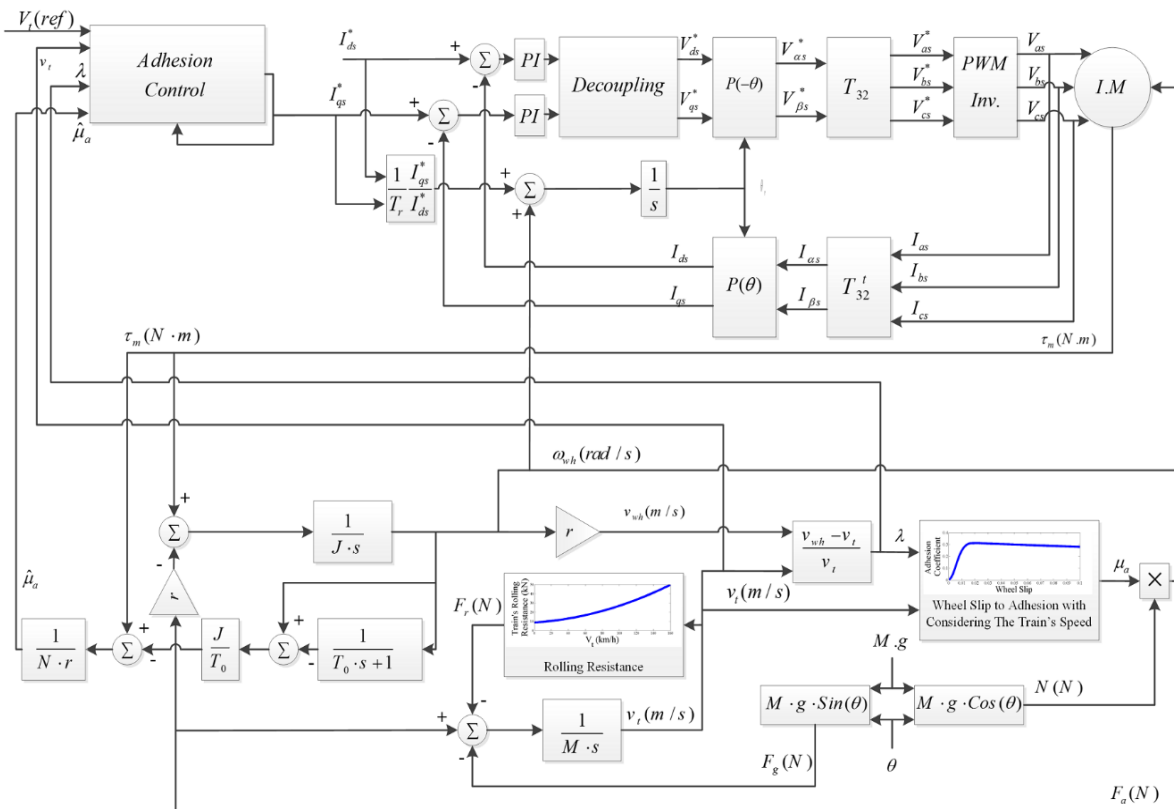
بخش مکانیکی سیستم را تشکیل می‌دهند. بخش الکتریکی مدل، شامل زیر سیستم کنترل سرعت موتور القایی (شکل ۷) [۲۳ و ۲۴] در کنار روش‌های مختلف کنترل لغزش است. به بیان دیگر حلقه داخلی سیستم کنترل همان کنترل برداری است و آنچه اهمیت کنترل لغزش را بیان می‌کند روش‌های تعیین گشتاور مرجعی است که توسط بلاک کنترل لغزش (شکل ۸) به زیر سیستم کنترل برداری اعمال می‌گردد. با کنار هم قرار دادن بخش‌های الکتریکی و مکانیکی، مدل سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل (شکل ۸) به دست می‌آید.

## ۷- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت از مقاله جهت ارزیابی مدل ارائه شده، شبیه‌سازی‌هایی با فرض قرار گرفتن نقطه کار در نقاط مختلف (ناحیه خزش، پیک منحنی چسبندگی و ناحیه بکسوات) انجام شده است. با لحاظ منحنی چسبندگی بر حسب لغزش شکل ۲، ضریب چسبندگی حداکثر برابر با ۰/۳۴ و لغزش معادل ضریب چسبندگی حداکثر برابر با ۰/۰۵۲ خواهد بود.



شکل ۷- بلاک دیاگرام کنترل برداری سرعت موتور القایی [۲۳ و ۲۴]



شکل ۸- مدل بدست آمده جهت سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل

#### ۷-۱ نقطه کار در ناحیه خزش

در این شبیه‌سازی به جهت پرهیز از عبور از گشتاور چسبندگی حداکثر، جریان محور گشتاور ساز محدود شده است تا گشتاور خروجی موتور و جعبه دنده محدود بوده و همواره از گشتاور چسبندگی حداکثر کوچک‌تر باشد تا نقطه کار همواره در سمت چپ گشتاور چسبندگی حداکثر (ناحیه خزش) باشد.

لیکن چون از حداکثر چسبندگی استفاده نمی‌شود، سرعت قطار به کندی به سرعت مورد نظر  $1 \text{ m/s}$  خواهد رسید. نتایج این شبیه‌سازی انجام شده در شکل‌های ۹ الی ۱۱ بیان شده است.

به دلیل محدود نمودن گشتاور به مقداری کوچک‌تر از گشتاور چسبندگی حداکثر، در تمام مسیر حرکت لغزش از  $0.052$  و ضریب چسبندگی از  $0.34$  کوچک‌تر خواهد بود، با نزدیک شدن به سرعت مرجع لغزش و ضریب چسبندگی هر دو به صفر نزدیک می‌شوند (شکل‌های ۱۰

و ۱۱). زمان شتاب‌گیری در حدود  $3/8$  ثانیه است (از ثانیه ۴ تا ثانیه  $7/8$ ).

با اعمال گشتاورهای کوچک‌تر از گشتاور چسبندگی حداکثر، این تضمین وجود دارد که نقطه کار مجموعه پایدار بوده و سیستم کنترل می‌تواند نقطه فرمان را دنبال کند. هرچه گشتاور ماشین به گشتاور چسبندگی حداکثر نزدیک‌تر شود ماشین از دینامیک بهتری برخوردار بوده و سریع‌تر می‌تواند سرعت مرجع را تعقیب نماید. لیکن با افزایش گشتاور مرجع این خطر وجود دارد که نقطه کار از نقطه معادل با گشتاور چسبندگی حداکثر عبور کرده و ماشین به ناحیه ناپایدار برود.

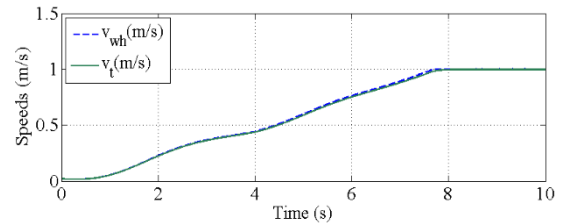


این حالت به دلیل شیب منفی منحنی چسبندگی - لغزش، سرعت موتور و لغزش مدام افزایش یافته تا آنکه سیستم کنترل، سرعت موتور را محدود نماید. سرعت قطار به دلیل چسبندگی نسبتاً بالاتر در این ناحیه کاری، سریع‌تر شروع به افزایش می‌کند، لیکن این ناحیه کاری همراه با استهلاک زیاد و مصرف توان بالاست (شکل‌های ۱۲ الی ۱۴).

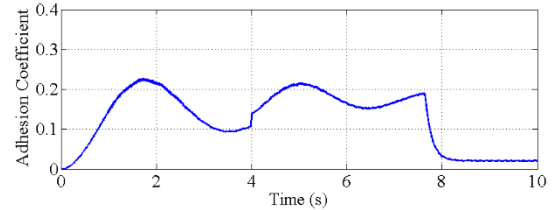
مانند حالت قبل از زمان ۰ تا ۴ ثانیه مقدار جریان محور گشتاور ساز در مقدار ثابت نگاه داشته شده تا در این زمان سیستم محرکه بتواند دوره گذرای خود را پشت سر گذاشته و شار ماشین شکل بگیرد. در زمان صفر، مقدار اولیه خروجی انتگرال گیرهای حلقه سرعت قطار و حلقه سرعت چرخ به گونه‌ای تنظیم شده که گویی قطار و چرخ در لغزش صفر، هر دو در سرعت خطی  $0.2 \text{ m/s}$  هستند.

از آنجا که بر لغزش چرخ کنترلی وجود ندارد لذا در صورت عبور سرعت روتور از مقدار نامی ماشین وارد قسمت تضعیف شار شده که با افزایش سرعت، شار مرجع کم خواهد شد. به دلیل عدم کنترل لغزش، با شروع اعمال کنترل سرعت، سریعاً نقطه کار از گشتاور چسبندگی حداکثر (لغزش  $0.52$  و ضریب چسبندگی  $0.34$ ) عبور خواهد نمود. در تمام مدت افزایش سرعت، نقطه کار در محدوده ناپایدار بوده که این ناپایداری به کمک محدود کننده سرعت روتور مهار شده است. با نزدیک شدن به سرعت مرجع، لغزش و ضریب چسبندگی هر دو به صفر نزدیک می‌شوند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). زمان شتاب‌گیری در حدود ۲ ثانیه است (از ثانیه ۴ تا ثانیه ۶).

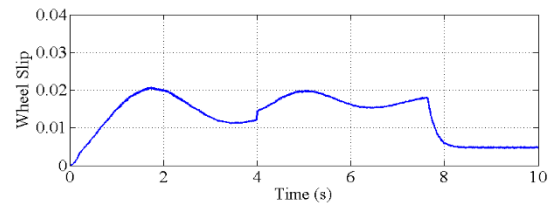
با مقایسه شکل‌های ۹ الی ۱۴ در خواهیم یافت که با اعمال گشتاورهای بزرگ‌تر از گشتاور چسبندگی حداکثر، نسبت به گشتاورهای کوچک‌تر از گشتاور چسبندگی حداکثر، سرعت مرجع بسیار سریع‌تر تعقیب شده اما نباید فراموش کرد که این سرعت عمل به بهای استهلاک بالای چرخ، ناشی از لغزش بسیار بالا، حاصل شده است، لذا



شکل ۹- سرعت خطی چرخ و سرعت واقعی قطار (نقطه کار در ناحیه خزش)



شکل ۱۰- ضریب چسبندگی (نقطه کار در ناحیه خزش)



شکل ۱۱- لغزش چرخ بر روی ریل (نقطه کار در ناحیه خزش)

## ۷-۲- نقطه کار در ناحیه بکسوات

در این قسمت از شبیه‌سازی، ماهیت مجموعه مانند حالت قبل است. تنها تفاوت آن است که، کنترل کننده شار موتور به جهت کاهش شار موتور در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی و محدود کننده سرعت موتور به دلیل نقطه کار ناپایدار به آن اضافه گشته است. در این حالت به گشتاور موتور محرکه اجازه داده می‌شود تا از گشتاور حداکثر چسبندگی فزونی یابد. بدین معنا که محدود کننده، جریان مرجع محور گشتاور ساز را در حداکثر مقدار مجاز محدود نموده است. در این صورت گشتاور خروجی موتور و جعبه دنده می‌تواند تا مقداری به مراتب بیشتر از گشتاور حداکثر چسبندگی فزونی یافته و نقطه کار به سمت راست حداکثر چسبندگی منتقل گردد. در

در ثانیه ۴، حلقه کنترلی و تخمین‌تر ضریب چسبندگی فعال شده و از مقایسه مقادیر دو نمونه متوالی از ضریب چسبندگی و لغزش تصمیم به افزایش گشتاور محرک گرفته می‌شود، لذا گشتاور محرک ماشین شروع به افزایش می‌نماید. در تمام زمان افزایش سرعت (از ثانیه ۴ الی ۵/۸) گشتاور محرک جهت تثبیت نقطه کار در لغزش معادل چسبندگی حداکثر، مدام در حال کاهش و افزایش است. با رسیدن به سرعت مرجع  $1 \text{ m/s}$  گشتاور شروع به کاهش می‌نماید. لذا در این مرحله لغزش و ضریب چسبندگی هر دو به صفر نزدیک می‌شوند (شکل‌های ۱۶، ۱۷). زمان شتاب‌گیری در حدود ۱/۸ ثانیه است (از ثانیه ۴ تا ثانیه ۵/۸).

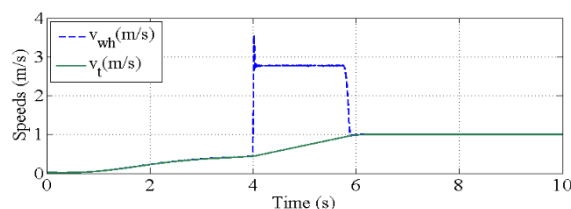
با اعمال کنترل لغزش این تضمین وجود دارد که نقطه کار در زمان افزایش سرعت، بر ضریب چسبندگی حداکثر منطبق بوده و زمان شتاب‌گیری، حداقل است. هرچه دقت سیستم کنترل بالاتر باشد گشتاور ماشین به گشتاور چسبندگی حداکثر نزدیک‌تر بوده، دینامیک بهتری داشته و سریع‌تر می‌تواند سرعت مرجع را تعقیب نماید.

### ۸- نتیجه‌گیری

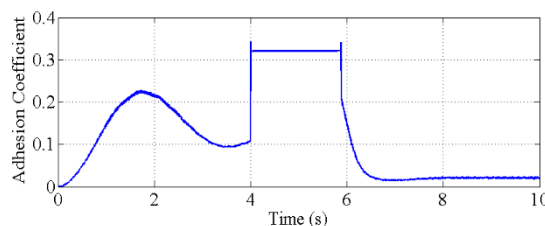
با توجه به توضیحات ارائه شده در این نوشتار، حالت مطلوب کنترل محرکه قطار به نحوی است که در هنگام افزایش سرعت همواره لغزش در ناحیه چسبندگی باشد و مطلوب‌تر آن است که در حالت شتاب‌گیری نقطه کار بر روی بیشینه منحنی چسبندگی باشد که این به معنای حداکثر شتاب است. منطبق بودن نتیجه شبیه‌سازی‌ها بر این منطق دال بر صحت عملکرد مدل ارائه شده است.

همان‌گونه که در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شد، کندترین حالت شتاب‌گیری مربوط به منطقه خزش است (۳/۸ ثانیه) این ناحیه از منظر کم بودن لغزش جهت عمر چرخ و ریل مفید است لیکن نباید فراموش کرد که موتور در زمان شتاب‌گیری چند برابر جریان نامی خود را تحمل می‌کند و طولانی شدن این زمان به کاهش عمر موتور می‌انجامد. در حالت بهره‌برداری در ناحیه بکسوات، زمان

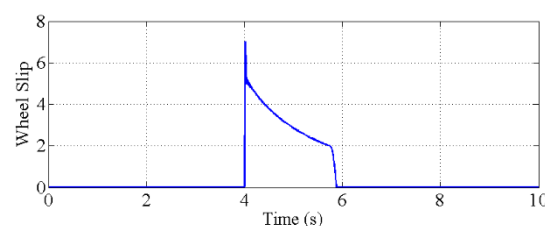
مطلوب سیستم همان گشتاور چسبندگی حداکثر خواهد بود.



شکل ۱۲- سرعت خطی چرخ و سرعت واقعی قطار (نقطه کار در ناحیه بکسوات)



شکل ۱۳- ضریب چسبندگی (نقطه کار در ناحیه بکسوات)



شکل ۱۴- لغزش چرخ بر روی ریل (نقطه کار در ناحیه بکسوات)

### ۷-۳- نقطه کار در لغزش معادل حداکثر

#### چسبندگی

حال با فرض اینکه میزان لغزش معادل ضریب چسبندگی حداکثر معین باشد و سیستم کنترل سرعت قطار (در طول زمان شتاب‌گیری) لحظه به لحظه گشتاور محرک قطار را (با هدف بهره‌برداری از حداکثر چسبندگی) مورد افزایش و کاهش قرار دهد. در این صورت در زمان افزایش سرعت، نقطه کار بر روی لغزش معادل چسبندگی حداکثر قرار داشته و نتایج شبیه‌سازی آن به صورت شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ است.

ترین گزینه است. از آنجا که انواع نظریه‌های یافتن و نقطه حداکثر چسبندگی می‌توانند جهت افزایش شتاب قطار مورد استفاده قرار گیرند، لذا وجود سامانه‌ای نرم افزاری به مانند مدل ارائه شده در این نوشتار جهت تحقیقات بعدی می‌تواند مفید باشد.

#### تقدیر و تشکر

از شرکت مهندسی و ساخت لکوموتیو مپنا به‌خاطر حمایت‌هایشان در مسیر انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

شتاب‌گیری کمتر بوده (۲ ثانیه که کم بودن این زمان مفید برای موتور می‌باشد) لیکن به دلیل لغزش زیاد استهلاک چرخ و ریل بالاست (به ضرر چرخ و ریل).

در حالت کنترل لغزش، به آن علت که نقطه کار در هنگام شتاب‌گیری همواره بر روی حداکثر منحنی لغزش چسبندگی است، زمان شتاب‌گیری در حداقل می‌باشد (۱/۸ ثانیه). با کاهش زمان شتاب‌گیری هم سرعت متوسط قطار بیشتر شده و هم استهلاک موتور به شدت کاهش می‌یابد. استهلاک چرخ و ریل نیز در کنترل لغزش در بهینه مقدار خواهد بود. لذا به همین دلایل کنترل لغزش چرخ در نقطه معادل چسبندگی حداکثر، بهینه-

#### ۹- مراجع

- [۱] A. Steimel. (2010). "Electric Traction - Motion Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience" Oldenbourg.
- [۲] J. M. Allenbach, P. Chapas, M. Comte, and R. Kaller. (۲۰۰۸). "Traction électrique" Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [۳] L. Weng-Ching, L. Chun-Liang, H. Ping-Min, and W. Meng-Tzong. (2014). "Realization of Anti-Lock Braking Strategy for Electric Scooters". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, pp. 2826-۲۸۳۳.
- [۴] M. Tanelli, L. Piroddi, and S. M. Savaresi. (2009). "Real-time identification of tire-road friction conditions". Control Theory & Applications, IET, vol. ۳, pp. ۸۹۱-۹۰۶.
- [۵] J. S. Lin and W. E. Ting. (2007). "Nonlinear control design of anti-lock braking systems with assistance of active suspension". Control Theory & Applications (IET), vol. ۱, pp. ۳۴۳-۳۴۸.
- [۶] H. o. Yamazaki, Y. Karino, T. Kamada, M. Nagai, and T. Kimura. (2007). "Effect of Wheel-Slip Prevention Based on Sliding Mode Control Theory for Railway Vehicles". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. vol. ۴۸, pp. ۲۲-۲۹.
- [۷] N. Mutoh, Y. Hayano, H. Yahagi, and K. Takita. (2007). "Electric Braking Control Methods for Electric Vehicles With Independently Driven Front and Rear Wheels" IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 54, pp. 1168-1176.
- [۸] J. J. Choi, S. H. Park, and J. S. Kim. (2007) "Dynamic Adhesion Model and Adaptive Sliding Mode Brake Control System for the Railway Rolling Stocks". Part F: J. Rail and Rapid Transit, vol. 221, pp. ۳۱۳-۳۲۰.
- [۹] P. Khatun, C. M. Bingham, N. Schofield, and P. H. Mellor. (2003). "Application of Fuzzy Control Algorithms for Electric Vehicle Antilock Braking/Traction Control Systems". IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. ۵۲, pp. ۱۳۵۶-۱۳۶۴.
- [۱۰] S. H. Park, J. S. Kim, J. J. Choi, and H. o. Yamazaki (۲۰۰۸). "Modeling and Control of Adhesion Force in Railway Rolling Stocks". IEEE Control Systems Magazin vol. ۲۸, pp. ۴۴-۵۸.
- [۱۱] H. o. Yamazaki, M. Nagai, and T. Kamada. (۲۰۰۴). "A Study of Adhesion Force Model for Wheel Slip Prevention Control". Jsme International Journal, vol. ۴۷, pp. ۴۹۶-۵۰۱.
- [۱۲] T. Watanabe. (2000). "Anti-slip Readhesion Control with Presumed Adhesion Force. - Method of Presuming Adhesion Force and and Running Test Results of High-speed Shinkansen Train-". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, vol. ۴۱, pp. ۳۲-۳۶.
- [۱۳] K. Ohishi, S. Kadowaki, Y. Smizu, T. Sano, S. Yasukawa, and T. Koseki (2006). "Anti-slip Readhesion Control of Electric Commuter Train Based on Disturbance Observer Considering Bogie Dynamics". presented at the 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics.

- [۱۴] Y. Shimizu, K. Ohishi, T. Sano, S. Yasukawa, and T. Koseki. (2007). "Anti-slip/skid Re-adhesion Control Based on Disturbance Observer Considering Bogie Vibration," Power Conversion Conference - PCC '07, Nagoya, April ۲-۵..
- [۱۵] M. Yamashita and T. Watanbe. (2003). "A Readhesion Control Method without Speed Sensor for Electric Railway Vehicles". Electric Machines and Drives Conference .EMDC'۰۳, June ۱-۴.
- [۱۶] M. Yamashita and T. Watanbe. (2005). "A Readhesion Control Method without Speed Sensor for Electric Railway Vehicles". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, vol. 45, pp. 85-۸۹.
- [۱۷] W. Zhang, J. Chen, X. Wu, and X. Jin (2002). "Wheel/Rail Adhesion and Analysis by Using Full Scale Roller Rig" Wear, vol. 253, pp. 82-88.
- [۱۸] O. Arias-Cuevas, Z. Li, and R. Lewis. (2011). "A Laboratory Investigation on the Influence of the Particle Size and Slip During Sanding on the Adhesion and Wear in the Wheel–Rail Contact". Wear, vol. ۲۷۱, pp. ۱۴-۲۴.
- [۱۹] M. Tomeoka, N. Kabe, M. Tanimotob, E. Miyauchib, and M. Nakatac, (2002). "Friction Control Between Wheel and Rail by Means of on-Board Lubrication". Wear, vol. ۲۵۳, pp. ۱۲۴-۱۲۹.
- [۲۰] A. Nayal, S. P. Gupta, and S. P. Singh. (۲۰۰۶). "Performance Analysis of DC Motor Drive in Electric Traction with Wheel Slip Control". Journal of the Institution of Engineers, vol. ۸۷, pp. ۵۵-۶۰.
- [۲۱] C. R. Wasko. (1986). "AC Drives in Traction Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 22, pp. 842 - 846.
- [۲۲] Z. Ma, T. Zheng, and F. Lin. (2005). "Research on reciprocal power-fed AC drive test rig for electric traction applications". 8th International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, Sept 29-29.
- [۲۳] R. Krishnan "Electric motor drives: modeling, analysis, and control". Prentice Hall.
- [۲۴] B. K. Bose. (۲۰۰۶). "Power Electronics and Motor Drives Advances and Trends". Elsevier.
- [۲۵] Liu-Jun, W. Wan-li, and W. Yang. (۲۰۰۲). "FOC and DTC :two viable schemes for induction motors torque control". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, pp. 779 - 878.
- [۲۶] S. Alireza Davari, D. A. Khaburi, W. Fengxiang, and R. M. Kennel. (2012). "Using Full Order and Reduced Order Observers for Robust Sensorless Predictive Torque Control of Induction Motors," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, pp. 3424-3433.
- [۲۷] S. Alireza Davari, D. A. Khaburi, and R. Kennel. (2012). "An Improved FCS-MPC Algorithm for an Induction Motor With an Imposed Optimized Weighting Factor". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, pp. 1540-1551.
- [۲۸] W. Fengxiang, Z. Zhenbin, S. Alireza Davari, R. Fotouhi, D. Arab Khaburi, J. Rodriguez, et al.. (2014). "An Encoderless Predictive Torque Control for an Induction Machine With a Revised Prediction Model and EFOSMO". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ۶۱, pp. ۶۶۳۵-۶۶۴۴.
- [۲۹] S. A. Davari, D. A. Khaburi, F. Wang, and R. Kennel. (2013). "Robust sensorless predictive control of induction motors with sliding mode voltage model observer". Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 21, pp. 1539-1552.
- [۳۰] K. Wei, J. Zhao, and T. Q. Xiaojie YouZheng. (2009). "Development of a Slip and Slide Simulator for Electric Locomotive Based on Inverter-Controlled Induction Motor". ۴th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications., Xi'an, May ۲۵-۲۷.