

رویکردی بهینه برای کنترل غیرخطی سیستم ترمز خودرو در ترمزگیری‌های شدید به هنگام گردش

حسین میرزائی نژاد^۱، مهدی میرزائی^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، h_mirzaeinejad@sut.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، mirzaei@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۱۰/۱۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۰۲/۰۷)

چکیده: یکی از مانورهای بحرانی خودرو، ترمزگیری شدید به هنگام گردش می‌باشد که در آن حداقل کردن فاصله توقف ضمن حفظ فرمان‌پذیری خودرو و نگهداری آن در مسیر از اهمیت برخوردار است. سیستم ترمز ضداقل متداول با ایجاد بیشینه نیروی ترمزی در چرخ‌ها، فاصله توقف را به حداقل رسانده ولی نمی‌تواند دینامیک جانی و فرمان‌پذیری خودرو را بصورت مستقیم کنترل نماید. در این مقاله به منظور کنترل مستقیم و توان دینامیک طولی و جانبی خودرو، یک الگوریتم غیرخطی بهینه بر اساس پیش‌بینی پاسخهای سیستم برای محاسبه نیروهای ترمزی چرخ‌های خودرو جهت پیاده‌سازی با محرك سیستم ترمز ضداقل ارائه شده است. در این الگوریتم از بیشینه نیروهای ترمزی قابل تولید توسط هر یک از چرخ‌های طرفین خودرو به اندازه‌ای کاسته می‌شود که حداقل گشتاور چرخشی لازم برای گردش خودرو نیز تأمین گردد. بهینه‌بودن قانون کنترل گشتاور چرخشی، امکان تنظیم و محاسبه آن را چنان فراهم می‌کند که می‌توان بین فاصله توقف و فرمان‌پذیری خودرو مصالحه نمود. در حالت خاص با انتخاب ضریب وزنی بی‌نهایت روی ورودی کنترلی (کنترل گران)، مقدار گشتاور چرخشی خارجی صفر شده و به عملکرد سیستم ترمز ضداقل متداول با بیشینه نیروهای ترمزی می‌رسیم. در حالی که با افزایش گشتاور چرخشی تا مقدار مناسب، فاصله توقف نسبتاً افزایش یافته و لی فرمان‌پذیری بهبود می‌یابد. نتایج تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته بر روی یک مدل واقعی ۸ درجه‌آزادی خودرو در ترمزگیری شدید به هنگام گردش، نشان از عملکرد مناسب و مقاوم سیستم کنترلی پیشنهادی در رسیدن به اهداف مورد نظر می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیستم ترمز خودرو، کنترل غیرخطی، الگوریتم بهینه، فاصله توقف، فرمان‌پذیری.

An Optimal Approach to Nonlinear Control of Vehicle Braking System during Severe Braking and Turning

Hossein Mirzaeinejad, Mahdi Mirzaei

Abstract: Severe braking during turning is one of the vehicle critical maneuvers. In this case, achieving the minimum stopping distance while maintaining the vehicle steerability is important. The conventional anti-lock braking system attains the minimum stopping distance by generating the maximum braking forces but, cannot control the vehicle steerability directly. In this paper, in order to direct control of vehicle longitudinal and lateral dynamics, an optimal nonlinear algorithm based on the prediction of system responses is presented to distribute the wheels braking forces properly. In this algorithm, the maximum braking forces of one side wheels are reduced to the extent that the required stabilizing yaw moment is produced. In this way, a compromise between the stopping distance and vehicle steerability can be easily made by the regulation of weighting ratio, as a free parameter of the yaw moment control law. In the special case, when the external yaw moment takes to be zero (expensive control), this algorithm is changed to the conventional anti-lock braking system. With any increase of the external yaw moment, the stopping distance is increased but the vehicle steerability is improved. The simulation results performed by an 8-DOF vehicle model show a suitable and robust performance of the proposed control system.

Keywords: dynamics, Nonlinear control, Optimal algorithm, Severe braking, Stopping distance, Steerability.

۱- مقدمه

ABS به شکل تحلیلی ارائه کرده اند^[۹-۱۰]. از ویژگی های اصلی قوانین کنترلی طراحی شده، در نظر گرفتن اثرات غیرخطی و نامعینی های موجود در مدل دینامیک خودرو می باشد. در مرجع [۹]، کنترل کننده ABS بر اساس رویکرد کنترل ارزان^۳ طراحی شده است. در این مورد انرژی کنترلی بدون محدودیت قابل استفاده می باشد و تلاش می شود تا دقیق سیستم کنترلی در رسیدن به لغزش بهینه در حضور نامعینی های سیستم افزایش یابد. در مرجع [۱۰]، با وارد کردن انرژی کنترلی در تعريف شاخص عملکرد و در نظر گرفتن محدودیت بر روی انرژی کنترلی، از رویکرد کنترل گران^۴ در طراحی کنترل کننده استفاده شده است. تخمین غیرخطی لغزش طولی و ضریب اصطکاک جاده از دیگر کارهای انجام گرفته در طراحی سیستم ترمز ضداقل می باشد^[۱۱].

در تمامی کارهایی که در بالا معرف شد سیستم ترمز ضداقل متداول که وظیفه آن نگهداری لغزش طولی در مقدار بهینه ای که منجر به بیشینه نیروی ترمزی می شود طراحی شده است. به عبارتی دیگر ترمز گیری به منظور توقف بر روی خودرویی صورت گرفته که بر روی مسیر مستقیم (بدون فرمان گیری) در حرکت بوده و فقط دینامیک طولی در گیر بوده است. هر چند با این کار فرمان پذیری خودرو نیز با تاثیر بر نیروهای جانبی به طور غیرمستقیم بهبود می یابد، اما این بهبود به حدی نیست که خودرو را به طور کامل در مسیر حرکت حفظ کند. بطور کلی در یک مانور ترمز گیری شدید به هنگام گردش، سیستم ABS متداول نمی تواند دینامیک جانبی را به طور مستقیم و کامل کنترل نماید. در مرجع [۱۲] از یک کنترل کننده PID برای محاسبه مقدار لغزش هر چرخ استفاده شده به طوری که با توجه به خطای ردیابی سرعت چرخشی، با کاهش مقدار نیروی ترمزی چرخ جلو راست یا جلو چپ، مقدار گشتاور چرخشی لازم برای انجام گردش ایجاد می شود. اما در این الگوریتم ساده، مقدار گشتاور چرخشی خارجی به صورت بهینه محاسبه نشده و باعث می شود تا نیروهای ترمزی چرخهای طرفین خودرو بیش از حد لازم کاهش یابد و فاصله توقف بی مورد زیاد گردد. بطور کلی استفاده از حداقل گشتاور چرخشی خارجی لازم برای نگهداری خودرو در مسیر حرکت می تواند مانع از افزایش بیش از حد فاصله ای توقف خودرو گردد.

در کار حاضر به منظور کنترل مستقیم و توان دینامیک طولی و جانبی خودرو در ترمز گیری های شدید به هنگام گردش، یک سیستم کنترلی طراحی شده است که علاوه بر تحقق هدف اصلی توقف کامل بدون قفل شدن چرخ ها، خودرو را در مسیر گردش حفظ کند. با توجه به انتقال بار طولی و جانبی که در اثر ترمز گیری و گرددش ایجاد می شود ظرفیت نیروی ترمزی هر چرخ متفاوت می باشد. این سیستم کنترلی سعی در تولید بیشینه مقدار نیروی ترمزی متناسب با ظرفیت هر چرخ را دارد؛ اما برای حفظ مسیر لازم است از نیروهای ترمزی طرفین خودرو به اندازه های که بتواند گشتاور خارجی لازم را تامین نماید کم کند. به این

امروزه افزایش اینی خودرو و سرنوشتیان آن در مانورهای بحرانی از مهم ترین چالش ها در طراحی و توسعه خودروهای سواری می باشد. سیستم ترمز ضداقل (ABS) یکی از مهم ترین سیستم های کنترلی شناخته شده برای اینی خودرو می باشد. این سیستم با کنترل لغزش طولی آن چرخ های خودرو در مقدار بهینه خود باعث می شود که نیروی طولی آن ها در مقدار بیشینه حفظ شده و از این رو فاصله توقف کم شود. از طرفی با توجه به ارتباط نیروهای طولی و جانبی تایر، وقتی مقدار لغزش طولی در مقدار مطلوب خود قرار بگیرد، علاوه بر بیشینه نیروی طولی، نیروی جانبی نیز در مقدار مناسبی حفظ می شود. بنابراین در سیستم ضداقل علاوه بر رسیدن به هدف اصلی عدم قفل شدن چرخ ها و کمینه کردن فاصله توقف خودرو، فرمان پذیری خودرو نیز با حفظ نیروی جانبی به صورت نسبی و غیرمستقیم بهبود می یابد. این در حالیست که در چرخ قفل شده توانائی تایر به تولید نیروی جانبی کاملا از بین می رود. اثرات غیرخطی دینامیک خودرو به ویژه خاصیت اشباع نیروهای تایر و همچنین وجود نامعینی های مدل سازی و عدم قطعیت های پارامتری، از جمله موارد مهم در طراحی کنترل کننده سیستم ترمز ضداقل می باشند.

روش های کنترلی مختلفی برای طراحی سیستم ترمز ضداقل ارائه شده است که در ادامه به طور مختصراً به برخی از آن ها اشاره خواهد شد. روش کنترل مدل لغزشی یک روش غیرخطی و مقاوم برای این نوع از مسائل بوده است [۱-۴]. اما یکی از مشکلات معمول در پیاده سازی کنترل مدل لغزشی، بروز پدیده نامطلوب چترینگ^۵ است که تکنیک های مختلفی برای کاهش این پدیده نیز ارائه شده است [۶، ۱۵]. همچنین از ترکیب یک کنترل کننده مدل لغزشی با یک کنترل کننده فازی برای کنترل لغزش چرخ استفاده شده است [۴] در مرجع [۲] با استفاده از روش مدل لغزشی، لغزش طولی هر چرخ بطور جداگانه کنترل شده است به طوری که اگر چرخ های خودرو بر روی جاده ای با ضریب اصطکاک مختلف قرار بگیرند، گشتاور چرخشی نامطلوبی که در اثر اختلاف نیروهای تایر بوجود می آید کاهش می یابد.

استفاده از روش خطی سازی موضعی همراه با جدول بندی بهره و بکار گیری روش LQR [۷] و روش بهینه پیش بین بر اساس مدل خطی شده خودرو [۸] برای طراحی سیستم ترمز ضداقل، از دیگر مطالعات انجام شده می باشند. مبنای این روش ها استفاده از مدل های خطی شده خودرو بوده است. با توجه به ویژگی های غیرخطی دینامیک خودرو و خاصیت اشباع نیروهای تایر استفاده مستقیم از مدل های غیرخطی در طراحی کنترل کننده سیستم ترمز ضداقل از اهمیت زیادی برخوردار است.

نویسنده گان مقاله ای حاضر قبلا بر اساس روش کنترل بهینه پیش بین، کنترل کننده هایی با نسخه های متفاوت برای اهداف مختلف در سیستم

³ Cheap control

⁴ Expensive control

¹ Anti-lock brake system

² Chattering

۲- مدل شبیه‌ساز خودرو

به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر پاسخ خودرو در طول مانور مورد نظر و ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی، مطالعات شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل دینامیک خودروی واقعی تر انجام شده است. بدین منظور یک مدل درجه آزادی غیرخطی که صحت آن با نتایج تجربی ارزیابی گردیده به عنوان مدل شبیه‌سازی استفاده شده است [۱۵]. درجات آزادی این مدل شامل سرعت طولی، زاویه‌ی لغزش جانبی، سرعت چرخشی، سرعت رول و سرعت زاویه‌ی چهار چرخ می‌باشد. هم‌چنین برای مدل‌سازی نیروهای تایر از مدل داگوف استفاده شده که دربرگیرنده‌ی اثرات غیرخطی و اشباع نیروهای تایر می‌باشد. تاثیر انتقال نیروهای عمودی بر نیروهای جانبی چرخ‌های عقب و جلوی خودرو، زاویه‌ی رول و پارامترهای دیگر که پایداری خودرو را تحت تأثیر قرار می‌دهند نیز از دیگر ویژگی‌های این مدل است. از آنجا که مدل ۸ درجه آزادی غیرخطی برای استفاده در طراحی کنترل کننده پیچیده است، برای طراحی کنترل کننده باید از مدل ساده‌تری استفاده گردد که البته باید دربرگیرنده‌ی ویژگی‌های اساسی سیستم باشد. از این‌رو، در این مقاله برای طراحی کنترل کننده لغزش طولی، مدل ۵ درجه غیرخطی چهار چرخ و برای طراحی کنترل کننده گشتاور چرخشی از مدل دو درجه غیرخطی چهار چرخ، استفاده شده است.

۳- طراحی سیستم کنترلی

۳-۱- طراحی کنترل کننده غیرخطی سیستم ترمز ضداقل

برای طراحی کنترل کننده لغزش طولی، مدل ۵ درجه آزادی غیرخطی خودرو مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت طولی خودرو و سرعتهای زاویه‌ای چهار چرخ، تشکیل دهنده درجات آزادی این مدل می‌باشند. براین اساس معادله‌ی حاکم بر دینامیک طولی عبارت است از:

$$\dot{m}u = \sum F_{ti} \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

که در رابطه فوق u سرعت طولی خودرو، F_t نیروی طولی تایر و m جرم کل خودرو است. توجه شود در رابطه (۱) اندیس i مربوط به شماره چرخ‌ها بوده که به صورت $2 = fL$, $3 = rL$, $4 = fR$, $5 = rR$ مطابق با تعریف می‌شود و در ادامه مقاله نیز استفاده خواهد شد. همچنین مطابق با شکل ۱ دینامیک دورانی برای هر چرخ به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{I_{w_i}} [RF_{ti} - T_{b_i}] \quad (2)$$

که در آن T_b گشتاور ترمزی، ω سرعت زاویه‌ای، R شعاع چرخ و I_w ممان اینرسی چرخ است.

کار در اصل کنترل مستقیم گشتاور چرخشی با استفاده از ترمزگیری تفاضلی اطلاق می‌شود که اساس کار سیستم کنترل دینامیک خودرو (VDC^(۱) نیز است [۱۴-۱۳]). با این تفاوت که هدف VDC انجام گردن پایدار با سرعت بالا بوده و گشتاور خارجی پایدار کننده با استفاده از ایجاد نیروهای ترمزی تفاضلی تولید می‌شود. استفاده زیاد و بی‌رویه از گشتاور چرخشی و در نتیجه نیروهای ترمزی باعث برخی اثرات نامطلوب همچون کاهش بی‌مورد سرعت خودرو و القای حس اجبار به جای حمایت به راننده می‌گردد. ضمناً ترمزگیری‌های زیاد و متواتی باعث کاهش عمر تایرها و اجزای سیستم ترمز نیز می‌گردد. لذا در سیستم VDC حداقل کاهش در سرعت خودرو حائز اهمیت است. اما هدف تحقیق حاضر توقف خودرو در کمترین فاصله ضمن نگهداری آن در مسیر حرکت می‌باشد. بدین منظور تلاش می‌شود تا حداقل ظرفیت نیروی ترمزی چرخها بکار گرفته شده و استفاده از گشتاور خارجی لازم به حداقل برسد. چرا که استفاده حداقل و بهینه از گشتاور خارجی جهت بهبود فرمانپذیری، باعث حداقل کاهش در بیشینه نیروهای ترمزی شده و بنابراین فاصله توقف نسبت به ABS متداول افزایش کمتری خواهد داشت.

به منظور رسیدن به اهداف مذکور، در این مقاله یک الگوریتم غیرخطی بهینه بر اساس پیش‌بینی پاسخ‌های سیستم برای توزع مناسب نیروهای ترمزی چرخ‌های خودرو ارائه شده است. در این الگوریتم، از بیشینه نیروهای ترمزی قابل تولید توسط هر یک از چرخ‌های طرفین خودرو به اندازه‌ای کاسته می‌شود که گشتاور چرخشی پایدار کننده تولید گردد. برای محاسبه گشتاور چرخشی لازم، یک قانون کنترل بهینه غیرخطی به صورت تحلیلی توسعه داده می‌شود. بهینه‌بودن قانون کنترلی، امکان تنظیم مقدار گشتاور چرخشی را چنان فراهم می‌کند که می‌توان بین فاصله توقف کمتر و فرمانپذیری بهتر خودرو مصالحه نمود. در حالت خاص که ضریب وزنی روی ورودی بی‌نهایت انتخاب شود (حالات کنترل گران)، مقدار گشتاور چرخشی خارجی صفر شده و به عملکرد سیستم ترمز ضداقل متداول با حداقل فاصله توقف می‌رسیم. با هرگونه افزایش در مقدار گشتاور چرخشی، فاصله توقف افزایش یافته اما فرمانپذیری خودرو بهبود می‌یابد. بعد از طراحی کنترل کننده گشتاور چرخشی، تحلیل خطای در حضور نامعینه‌های سیستم به صورت تحلیلی بررسی می‌گردد و اثر کاهش انرژی کنترلی در اثر اعمال ضریب وزنی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ادامه به منظور نشان دادن کارایی سیستم کنترلی طراحی شده، شبیه‌سازی‌های لازم بر روی مدل غیرخطی ۸ درجه آزادی در مانور ترمزگیری شدید به هنگام گردش انجام شده و با عملکرد سیستم ABS متداول مقایسه شده است. نتایج تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها در حضور نامعینه‌های نشان از عملکرد مناسب و مقاوم سیستم کنترلی پیشه‌های در رسیدن به اهداف مورد نظر می‌باشد

¹ Vehicle dynamic control

حال برای توسعه یک قانون کنترل غیرخطی گشتاور ترمزی بر اساس پیش‌بین، یک شاخص عملکرد شبکه‌ای به نحوی که خطاهای ریدیابی در لحظه بعدی را جریمه کند به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$J_1[T_{bi}(t)] = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^5 w_i e_i^2(t+h) \quad (8)$$

که w_i ضرایب وزنی و h زمان پیش‌بین بوده و یک عدد حقیقی مثبت است. e_i خطاهای ریدیابی لغزش طولی برای هر چرخ می‌باشند:

$$e_i(t+h) = x_i(t+h) - x_{id}(t+h) \quad (9)$$

از آنجایی که هیچ محدودیتی روی ورودی کنترلی برای رسیدن به ریدیابی کامل نداریم، در شاخص عملکرد (8)، انرژی کنترلی وجود ندارد و به عبارتی طراحی بر اساس کنترل ارزان است.

حال به منظور توسعه شاخص عملکرد (8) بر حسب ورودی کنترلی، لازم است که پاسخ لغزش طولی برای بازه زمان بعدی با استفاده از بسط تیلور پیش‌بینی شود. در ابتدا (h) $x_i(t+h)$ به وسیله سری تیلور مرتبه q در زمان t به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$x_i(t+h) = x_i(t) + h\dot{x}_i(t) + \frac{h^2}{2!}\ddot{x}_i(t) + \dots + \frac{h^q}{q!}x_i^{(q)}(t) \quad (10)$$

برای دست‌یابی به انرژی کنترلی پایین، مرتبه بسط q که تعیین کننده بالاترین مشتق مورد استفاده در پیش‌بینی است توسط درجه نسبی سیستم غیرخطی مشخص می‌گردد [۱۶، ۹]. با توجه به معادله ۶، از آنجاییکه دینامیک لغزش طولی تایر دارای درجه نسبی یک، $q = 1$ می‌باشد سری تیلور مرتبه اول برای بسط کافی است.

$$x_i(t+h) = x_i(t) + h\dot{x}_i(t) \quad (11)$$

با جایگذاری معادله (۶) در (11) داریم:

$$x_i(t+h) = x_i(t) + h\left(f_i + \frac{R}{I_w x_1} T_{bi}\right) \quad (12)$$

به همین ترتیب مقدار مطلوب لغزش طولی نیز بسط داده می‌شود:

$$x_{id}(t+h) = x_{id}(t) + h\dot{x}_{id}(t) \quad (13)$$

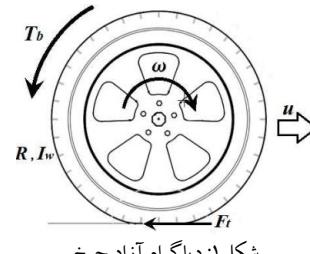
حال با جایگذاری معادلات (12) و (13) در (8)، شاخص عملکرد بسط داده شده به عنوان تابعی از ورودی کنترلی بدست می‌آید. با اعمال شرط بهینگی یه صورت زیر:

$$\frac{\partial J_1}{\partial T_{bi}} = 0 \quad (14)$$

قوانین کنترلی گشتاور ترمزی برای چهار چرخ محاسبه می‌شوند:

$$T_{bi} = -\frac{u I_w}{R h} [e_i + h(f_i - \lambda_{id})] \quad (15)$$

در یک سیستم ترمز ضدقول متداول، مقدار لغزش طولی مطلوب هر چرخ، λ_{id} ، طوری انتخاب می‌شود تا برای ریدیابی آن توسط کنترل کننده، پیشیه مقدار نیروی ترمزی خودرو تولید شده و فاصله توقف حداقل



شکل ۱: دیاگرام آزاد چرخ

با مشتق‌گیری از رابطه لغزش طولی هر تایر به هنگام ترمزگیری، $\frac{R\omega_i}{u} = 1 - \frac{F_{ti}}{u} = \lambda_i$ نسبت به زمان و جایگذاری روابط (۱) و (۲) در آن داریم:

$$\lambda_i = \frac{1}{u} \left[\frac{1}{m} \sum F_{ti} (1 - \lambda_i) - \frac{R^2}{I_w} F_{ti} \right] + R \frac{T_{bi}}{I_w u} \quad (3)$$

در این مقاله به منظور در نظر گرفتن خاصیت اشباع نیروهای تایر از مدل داگوف [۱۵] استفاده شده است. در این مدل روابط برای نیروهای طولی و جانبی تایر عبارتند از:

$$\begin{aligned} F_{ti} &= \frac{C_\lambda \lambda_i}{1 - \lambda_i} f(s), \\ F_{si} &= \frac{C_\alpha \tan \alpha_i}{1 - \lambda_i} f(s) \\ f(s) &= \begin{cases} s(2-s) & s < 1 \\ 1 & s \geq 1 \end{cases} \\ s &= \frac{\mu F_z \left(1 - \varepsilon_r u \sqrt{\lambda_i^2 + \tan^2 \alpha_i} \right)}{2 \sqrt{C_\lambda^2 \lambda_i^2 + C_\alpha^2 \tan^2 \alpha_i}} (1 - \lambda_i) \end{aligned} \quad (4)$$

که در روابط فوق F_t و F_s به ترتیب نیروی طولی و جانبی تایر، بار F_z ، C_λ و C_α به ترتیب سفتی طولی و جانبی تایر، α لغزش جانبی تایر و ε_r ضریب کاهش چسبندگی تایر می‌باشند.

با در نظر گرفتن لغزش طولی هر چرخ به عنوان یک خروجی، معادلات توصیف شده (۱) و (۳) را می‌توان به شکل فضایی حالت زیر نوشت:

$$\dot{x}_1 = f_1(x) \quad (5)$$

$$\dot{x}_i = f_i(x) + \frac{R}{I_w x_1} T_{bi} \quad (6)$$

$$y = [x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5] \quad (7)$$

که در اینجا $x = [u \ \lambda_{fL} \ \lambda_{rL} \ \lambda_{fR} \ \lambda_{rR}]$ بردار حالت و y به عنوان بردار خروجی در نظر گرفته شده است. همچنین گشتاورهای ترمزی، T_{bi} به عنوان ورودی‌های کنترلی می‌باشد. هدف سیستم کنترلی این است که برای هر چرخ، لغزش طولی مطلوب آن را که در قسمت‌های بعدی تشریح خواهد شد ریدیابی کند. توابع غیرخطی (f_i ، در برگیرنده مدل نیروهای غیرخطی تایر با خاصیت اشباع می‌باشند.

$$\dot{x}_2 = g_2(x, \delta_f) + \frac{1}{I_{zz}} M_z \quad (20)$$

$$y = x_2 \quad (21)$$

به طوری که در اینجا، $x = [v_y \ r]$ به عنوان بردار حالت و y خروجی می‌باشد. گشتاور چرخشی خارجی M_z و زاویه فرمان چرخ‌های جلو δ_f به ترتیب ورودی کنترلی و ورودی اغتشاش می‌باشند. مدل غیرخطی نیروهای تایر داگوف در g_1 و g_2 قرار گرفته است.

برای توسعه یک قانون کنترل غیرخطی بهینه برای گشتاور چرخشی نیز از روش کنترل پیش‌بین استفاده شده است با این تفاوت که در اینجا حداقل کردن ورودی کنترلی مورد توجه است. لذا شاخص عملکرد به نحوی که ترکیبی از خطای ردیابی سرعت چرخشی در لحظه بعدی و انرژی کنترلی در لحظه فعلی را جرمیه کند به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$J_2[M_z(t)] = \frac{1}{2} w_r [r(t+h_1) - r_d(t+h_1)] + \frac{1}{2} w_u [M_z^2(t)] \quad (22)$$

که در آن w_r و w_u ضرایب وزنی و h_1 زمان پیش‌بین بوده و یک عدد حقیقی مثبت است. مشاهده می‌شود که برخلاف طراحی سیستم ABS در اینجا شاخص عملکرد شامل وزن روی ورودی کنترلی بوده و به عبارتی طراحی بر اساس کنترل گران است.

مشابه با طراحی کنترل کننده لغزش در سیستم ترمز ضدقلع، در اینجا هم با پیش‌بینی پاسخ‌های سیستم و مقادیر مطلوب آنها توسط بسط تیلور، شاخص عملکرد (22) به صورت تابعی از ورودی کنترلی بدست می‌آید. برای رعایت اختصار از انجام مجدد محاسبات خودداری شده است. با اعمال شرط بهینگی داریم:

$$\frac{\partial J_2}{\partial M_z} = 0 \quad (23)$$

که منجر به قانون کنترل گشتاور چرخشی به صورت زیر می‌شود:

$$M_z(t) = \frac{I_z}{h_1} \frac{1}{1 + \gamma I_z^2 h_1^{-2}} [e_r + h_1(g_2 - r_d)] \quad (24)$$

به طوری که، e_r خطای ردیابی در لحظه فعلی بوده،

$$e_r(t) = r(t) - r_d(t) \quad (25)$$

و γ نسبت وزنی می‌باشد:

$$\gamma = \frac{w_u}{w_r} \geq 0 \quad (26)$$

۱-۲-۳- ارزیابی قانون کنترلی گشتاور چرخشی

در این قسمت ویژگی‌های اصلی قانون کنترلی (24) و همچنین اهمیت پارامترهای آزاد زمان پیش‌بینی h_1 و نسبت وزنی γ در قانون

گردد. مقدار بیشینه نیروی ترمزی برای هر چرخ در یک مقدار لغزش طولی بهینه ایجاد می‌شود که این مقدار در هر لحظه با مشتق گیری از نیروی طولی نسبت به لغزش از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۰]:

$$\frac{\partial F_{ti}}{\partial \lambda_i} \Big|_{\lambda_i=\lambda_{opt}} = 0 \quad (16)$$

در معادله فوق، F_t نیروی طولی تایر است که در محاسبه آن از مدل داگوف، رابطه (۴)، استفاده شده است.

اما در مانور ترمزگیری شدید در حین گرددش، با اعمال بیشینه نیروی ترمزی به هر چرخ ممکن است فرمان پذیری خودرو تامین نشده و خودرو از مسیر خارج گردد. بنابراین مقدار لغزش طولی هر چرخ بر اساس توزیع بهینه نیروهای ترمزی باید طوری انتخاب شود که با حداقل کاهش در بیشینه نیروی ممکن برای چرخهای یک طرف خودرو، گشتاور خارجی لازم برای نگهداری آن در مسیر نیز تولید شود.

برای رسیدن به اهداف فوق، در این مقاله الگوریتمی طراحی خواهد شد که توزیع مناسبی از نیروهای ترمزی را ارائه نماید. سپس با استفاده از یک مدل معکوس، لغزش طولی مطلوب متناظر برای هر چرخ از روی نیروهای ترمزی مذکور محاسبه می‌شود. این مقادیر لغزش، به عنوان مقادیر مرجع برای ردیابی توسط کنترل کننده لغزش (15) مورد استفاده قرار می‌گیرند. قبل از ارائه الگوریتم، لازم است تا نحوه محاسبه گشتاور چرخشی خارجی لازم برای پایداری دینامیک جانبی بیان شود.

۲-۳- طراحی کنترل کننده بهینه غیرخطی گشتاور چرخشی خارجی

برای طراحی کنترل کننده گشتاور چرخشی خارجی پایدارساز از مدل دو درجه غیرخطی چهار چرخ خودرو استفاده شده است. سرعت جانبی و سرعت چرخشی تشکیل دهنده درجات آزادی این مدل می‌باشند. در این مدل معادلات حاکم بر حرکت عبارتند از:

$$\dot{v}_y = \frac{1}{m} [-mur + F_{sfR} \cos \delta_f + F_{sfL} \cos \delta_f + F_{srR} + F_{srL}] \quad (17)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_{zz}} [a(F_{sfR} + F_{sfL}) \cos \delta_f - b(F_{srR} + F_{srL})] + \frac{1}{I_{zz}} M_z \quad (18)$$

در روابط فوق، v_y سرعت جانبی، r سرعت چرخشی، M_z گشتاور چرخشی پایدارساز، I_{zz} ممان اینرسی خودرو حول محور قائم، δ_f زاویه فرمان چرخ‌های جلو، a و b به ترتیب فاصله‌ی بین مرکز جرم با اکسل جلو و اکسل عقب می‌باشد. معادله (17) را می‌توان بر اساس زاویه لغزش جانبی خودرو، v_y/u ، به جای سرعت جانبی بازنویسی نمود. در معادلات فوق نیز نیروی جانبی هر تایر F_{si} از مدل داگوف، رابطه (۴)، محاسبه می‌شود.

$$\dot{x}_1 = g_1(x, \delta_f) \quad (19)$$

با استفاده از معادله (۲۷)، کران خطای رديابي بر حسب ضريب وزني γ به صورت زير بيان می شود:

$$e_m = h_1 F + \frac{\gamma}{h_1} I_z^2 (F + \eta) \quad (۳۳)$$

معادله فوق حاکم از اين است که خطای رديابي سرعت چرخشی، ناشی از دو عامل نامعینی های مدل سازی F و ضريب وزني γ است. همچنین معادله (۳۳) نشان می دهد که خطای رديابي می تواند بوسیله پارامتر های آزاد h_1 و γ کنترل شود. باید توجه داشت در حالتی که $0 = \gamma$ و $0 = F$ ، یعنی نه کاهش در ورودی کنترلی (کنترل ارزان) داریم و نه نامعینی مدل سازی، دینامیک خطای سرعت چرخشی بصورت زیر بدست می آید:

$$\dot{e}_r + \frac{1}{h_1} e_r = 0 \quad (۳۴)$$

واضح است که دینامیک خطای (۳۴) خطی و مستقل از زمان است. مشاهده می شود که در این مورد، قانون کنترلی منجر به حالت خاصی از خطی سازی ورودی-خروجی می شود. بدین ترتیب، سیستم حلقه بسته خطی رديابی اولیه سرعت چرخشی صفر باشد، رديابی کامل حاصل می شود. نکته حائز اهمیت این است که در این مقاله، رديابی کامل به قیمت استفاده از گشتاور چرخشی بالا مطلوب نیست چرا که هر چه از گشتاور چرخشی بیشتری استفاده شود کاهش بیشتری در نیروهای ترمزی بیشینه بوجود آمده و بنابراین به فاصله توقف بیشتری دست خواهیم یافت. بطور خلاصه استفاده از حداقل گشتاور خارجی به ازای برخی خطاهای رديابی مجاز در سرعت چرخشی که حفظ خودرو در مسیر حرکت را به دنبال داشته باشد از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو، بهینه بودن ورودی کنترلی و مدیریت بر روی آن می تواند نقش مهمی در تعیین اولویت فاصله توقف کمتر یا فرمان پذیری بهتر خودرو و به عبارتی دیگر مصالحه بین آن ها داشته باشد.

۲-۲-۳- مدل مطلوب سرعت چرخشی جهت رديابي توسط کنترل کننده

با توجه به اینکه عامل حرکت های نامطلوب در مانورهای گردشی، رفتار غیرخطی خودرو و خاصیت اشباع نیروهای تایر می باشد، لذا مدل مطلوب سرعت چرخشی جهت رديابي توسط کنترل کننده (۲۶)، از روی مدل خطی پایدار به صورت زير استفاده می گردد [۱۷]:

$$\frac{r_d(s)}{\delta_f(s)} = G_R \frac{1}{1 + T_t s} \quad (۳۵)$$

کنترلی بررسی خواهد شد. در قانون کنترلی (۲۶)، ضریب K در برگیرنده نسبت وزني γ بصورت زير تعریف می شود:

$$K = \frac{1}{1 + \gamma I_z^2 h_1^{-2}} \quad (۲۷)$$

بطوری که $1 < K \leq 0$. این متغیر که فاکتور کاهشی نامیده می شود، امکان کاهش در مقدار ورودی کنترلی را با افزایش در مقدار نسبت وزني γ ، فراهم می نماید. حالت حدی $K = 1$ که با صفر قرار دادن نسبت وزني γ بدست آید، بیانگر عدم کاهش در انرژی کنترلی بوده و حالت کنترل گران و عدم استفاده از انرژی کنترلی می باشد. در این حالت بدليل عدم تولید گشتاور خارجی هیچ کاهشی در بیشینه نیروهای ترمزی تولید شده توسط سیستم ABS متداول وجود ندارد و به حداقل فاصله توقف بدون توجه به فرمان پذیری خودرو و کنترل مستقیم آن خواهیم رسید.

برای تحلیل بیشتر و استخراج دینامیک خطای رديابي در حضور نامعینی های سیستم، قانون کنترلی (۲۶) را که بر اساس مدل نامی بدست آمده در مدل واقعی (۲۰) قرار می دهیم:

$$\dot{r} = g_2 - \frac{K}{h_1} [e_r + h_1(\hat{g}_2 - r_d)] \quad (۲۸)$$

با بازنويسي معادله فوق و انجام برخخي عملیات ساده ریاضی، دینامیک خطای رديابي سرعت چرخشی به صورت زير بدست می آيد:

$$\dot{e}_r + \frac{K}{h_1} e_r = (g_2 - \hat{g}_2) + (1 - K)(\hat{g}_2 - r_d) \quad (۲۹)$$

انحراف تابع واقعی g_2 از مدل نامی \hat{g}_2 ناشی از نامعینی های موجود در مدل خودرو و شرایط جاده می باشد. اما از آنجایی که نیروی تایر F_s یک نقش اساسی در رفتار دینامیک خودرو دارد، خطای تخمین g_2 اساسا بر اثر تخمین نیروی اصطکاک \hat{F}_s می باشد. اگر فرض شود که خطای تخمین روی F_s کراندار باشد، خطای تابع g_2 می تواند بوسیله ثابت مشخص F که کران بالای نامعینی سیستم را مشخص می کند، محدود شود. از طرفی برای مشتق سرعت چرخشی مطلوب نیز می توان کران بالا در نظر گرفت. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ثابت های $0 < F < \eta$ وجود دارند بطوری که:

$$|g_2 - \hat{g}_2| \leq F, \quad |\hat{g}_2 - r_d| \leq \eta \quad (۳۰)$$

حال با اعمال به ترتیب کران های بالا و پایین معادله (۳۰) به معادله خطای (۲۹) و حل معادله دیفرانسیل مرتبه اول با شرط اولیه صفر می توان کران های بالا و پایین خطای رديابي را به صورت زير بدست آورد:

$$-e_m \leq e_r \leq e_m \quad (۳۱)$$

به طوری که:

$$e_m = \frac{F}{K} h_1 + \frac{1 - K}{K} h_1 \eta \quad (۳۲)$$

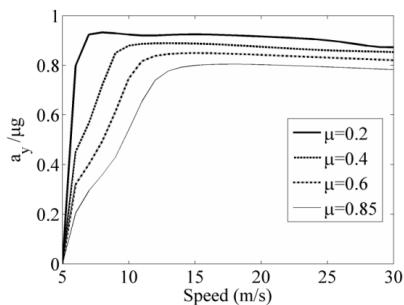
بررسی شکل‌های ۲ نشان می‌دهد که در مانورهای بحرانی نسبت حالت پایای شتاب جانبی بر ضریب اصطکاک در واحد شتاب جاذبه عددی بین $0/8$ تا $0/9$ می‌باشد. در این مقاله برای رسیدن به پایداری بیشتر عدد $0/8$ در نظر گرفته می‌شود، یعنی:

$$\frac{a_{yss}}{\mu g} \leq 0.8 \rightarrow a_{yss} \leq 0.8\mu g \quad (40)$$

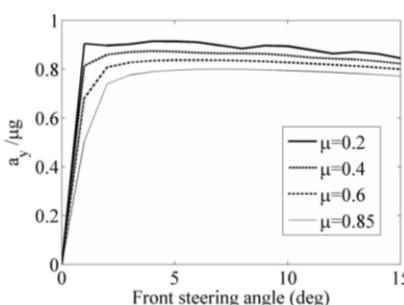
در نتیجه بر اساس روابط (۳۹) و (۴۰) داریم:

$$r_{ss} \leq \frac{0.8\mu g}{u} \quad (41)$$

بنابراین در رابطه (۳۷) مقدار $k = 0.8$ است.



(الف)



(ب)

شکل ۲: پاسخ حالت پایای شتاب جانبی به ضریب اصطکاک در واحد شتاب جاذبه (الف) بر حسب سرعت طولی برای ضرایب اصطکاک مختلف (ب) بر حسب زاویه‌ی فرمان راننده برای سرعت 80 کیلومتر بر ساعت و ضرایب اصطکاک مختلف

۳-۳- الگوریتم توزیع نیروهای ترمزی

به طور خلاصه، الگوریتم طراحی شده برای توزیع نیروهای ترمزی به این صورت است که در ابتدا از بیشترین ظرفیت نیروی ترمزی چرخ‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که گشتاور چرخشی داخلی تولید شده برای انجام گردن مناسب باشد در کنار هدف اصلی رسیدن به کمترین فاصله توقف، فرمان‌پذیری نیز بهبود می‌یابد. در صورتی که این مقدار گشتاور کمتر یا بیشتر از مقدار مورد نیاز باشد با کم کردن از نیروی ترمزی چرخ-

$$G_R = \frac{e_1 a_{21} - e_2 a_{11}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}},$$

$$e_1 = \frac{2C_{ar}}{mu}, e_2 = -\frac{2aC_{ar}}{I_{zz}}$$

$$a_{11} = -2 \frac{C_{af} + C_{ar}}{mu}$$

$$a_{12} = 2 \frac{bC_{ar} - aC_{af}}{mu^2} - 1 \quad (36)$$

$$a_{21} = 2 \frac{bC_{ar} - aC_{af}}{I_{zz}}, a_{22} = -2 \frac{b^2 C_{ar} + a^2 C_{af}}{I_{zz} u}$$

در روابط فوق T_t ثابت زمانی سرعت چرخشی، C_{af} بیانگر سفتی جانبی چرخ‌های جلو، C_{ar} سفتی جانبی چرخ‌های عقب و δ_f زاویه فرمان چرخ‌های جلو است که به عنوان ورودی فرمان راننده می‌باشد. با توجه به اینکه مدل خطی سازگاری با شرایط فیزیکی تایر و جاده را ندارد و حتی مستقل از ضریب اصطکاک جاده است بنابراین لازم است مقدار حالت پایای معادله (۳۵) به صورت زیر محدود گردد:

$$r_{ss} = \begin{cases} G_R \delta_f & \text{if } |G_R \delta_f| < \frac{k\mu g}{u} \\ \frac{k\mu g}{u} \text{ sign}(G_R \delta_f) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (37)$$

ضریب k مقدار ثابتی است ($k \leq 1$) که حد شتاب جانبی را مشخص می‌کند. در مرجع [۱۷]، $1 = 1$ در نظر گرفته شده است. اما در این مقاله این مقدار طوری انتخاب می‌شود تا حد واقعی تر شتاب جانبی که از مدل کامل تر خودرو بدست می‌آید در مدل مطلوب لحاظ شود. بدین منظور شتاب جانبی طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$a_y = \dot{v}_y + ur \quad (38)$$

که از آن مقدار پایای شتاب جانبی در مانور گردشی با سرعت ثابت طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$r_{ss} = \frac{a_{yss}}{u} \quad (39)$$

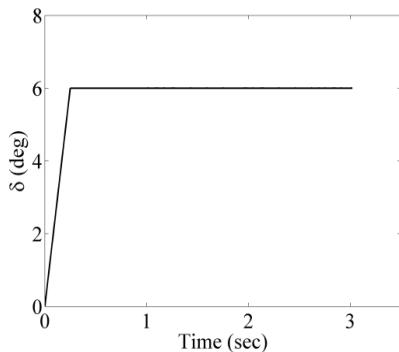
حال هدف، تعیین کران بالای رابطه فوق می‌باشد. در شکل ۲- (الف) پاسخ حالت پایای شتاب جانبی بر ضریب اصطکاک در واحد شتاب جاذبه بر حسب سرعت طولی خودرو نشان داده شده است. در این شکل خودروی واقعی با 8 درجه آزادی مانور گردن ثابت با زاویه‌ی فرمان 3 درجه را در ضرایب اصطکاک مختلف انجام می‌دهد. شکل ۲- (ب) نیز پاسخ حالت پایای شتاب جانبی بر ضریب اصطکاک را در واحد شتاب جاذبه بر حسب زاویه‌ی فرمان راننده در مانور گردن ثابت با سرعت 80 کیلومتر بر ساعت نشان می‌دهد. برای بدست آوردن این شکل‌ها از مدل 8 درجه آزادی غیرخطی خودرو که رفتار واقعی تر خودرو را شبیه‌سازی می‌کند استفاده شده است.

قرار دادن نیروهای F_{t2} و F_{t3} و بیشینه بودن مقدار نیروهای سمت دیگر، F_{t4} ، F_{t5} ایجاد می شود.

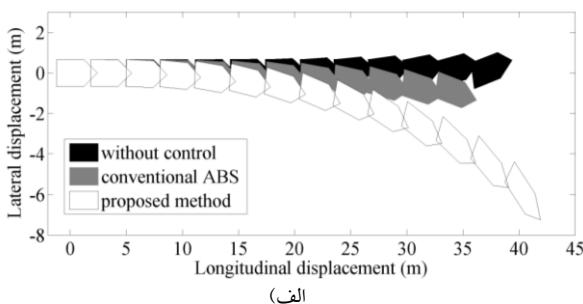
ج) اگر $M_{zdm} > M_{ztm}$ باشد. در این وضعیت باید نیروهای F_{t2} و F_{t3} کم نمود. بدین منظور ابتدا از چرخ عقب F_{t5} شروع به کم کردن نیرو می شود. در صورت نیاز به کاهش کمتر، نیروی F_{t5} را صفر کرده و از چرخ جلوی F_{t4} نیز نیرو کم می شود.

۴- نتایج شبیه سازی

برای نشان دادن عملکرد سیستم کنترلی، شبیه سازی های لازم بر روی مدل ۸ درجه آزادی غیرخطی خودرو انجام شده است. مانور استفاده شده در شبیه سازی ها، ترمز گیری شدید به همراه گردن با سرعت اولیه 80 km/h بر روی سطح خشک $\mu = 0.8$ می باشد. شکل ۴ ورودی زاویه فرمان اعمال شده توسط راننده را به هنگام ترمز گیری شدید نشان می دهد. در تمامی شبیه سازی ها برای ارزیابی مقاومت سیستم کنترلی طراحی شده علاوه بر نامعینی مدل سازی که ناشی از اختلاف مدل طراحی و مدل شبیه سازی است، مقدار 10% نامعینی در پارامترهای خودرو شامل جرم، ضربه اصطکاک، گشتاور اینرسی حول محور قائم I_{zz} و سفتی طولی و جانبی تایر در نظر گرفته شده است. هدف، توقف خودرو در کوتاه ترین فاصله ممکن ضمن حفظ آن روی مسیر حرکت می باشد.



شکل ۴: ورودی زاویه فرمان



(الف)

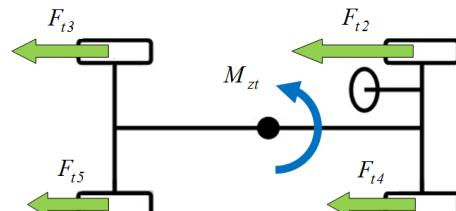
های یک طرف خودرو با توجه به جهت گردن، گشتاور خارجی مورد نیاز تولید می شود.

ورودی های الگوریتم پیشنهادی، بیشینه نیروهای ترمزی و گشتاور چرخشی خارجی پایدار ساز بوده و خروجی های آن، نیروی ترمزی مناسب و بهینه هر چرخ می باشد به طوری که هر دو هدف فاصله توقف کمتر و فرمان پذیری بهتر به صورت مناسب تامین شود. در ادامه به معرفی پارامترهای مورد استفاده در این الگوریتم پرداخته خواهد شد.

گشتاور چرخشی ناشی از اختلاف نیروهای طولی موجود در هر لحظه با توجه به شکل ۳، طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$M_{zt} = [(F_{t4} + F_{t5}) - (F_{t2} + F_{t3})] \frac{d}{2} \quad (42)$$

که در رابطه فوق d عرض خودرو می باشد. برای نیروهای طولی هر یک از چرخهای خودرو همان طور که قبل تعریف شد جهت راحتی از اندیس اعداد استفاده شده است ($2 = fL, 3 = rL, 4 = fR, 5 = rR$). در صورتی که مقادیر نیروهای ترمزی در رابطه فوق بیشینه باشند و هیچ کاهشی در نیروهای ترمزی بیشینه هر چرخ که توسط ABS متداول تولید می شود وجود نداشته باشند مقدار گشتاور M_{zt} با نماد M_{zdm} نشان داده می شود. توجه شود که ظرفیت تولید نیروی بیشینه هر یک از چرخها به دلیل تفاوت بار قائم هر چرخ در اثر انتقال بار طولی و جانبی متفاوت می باشد.

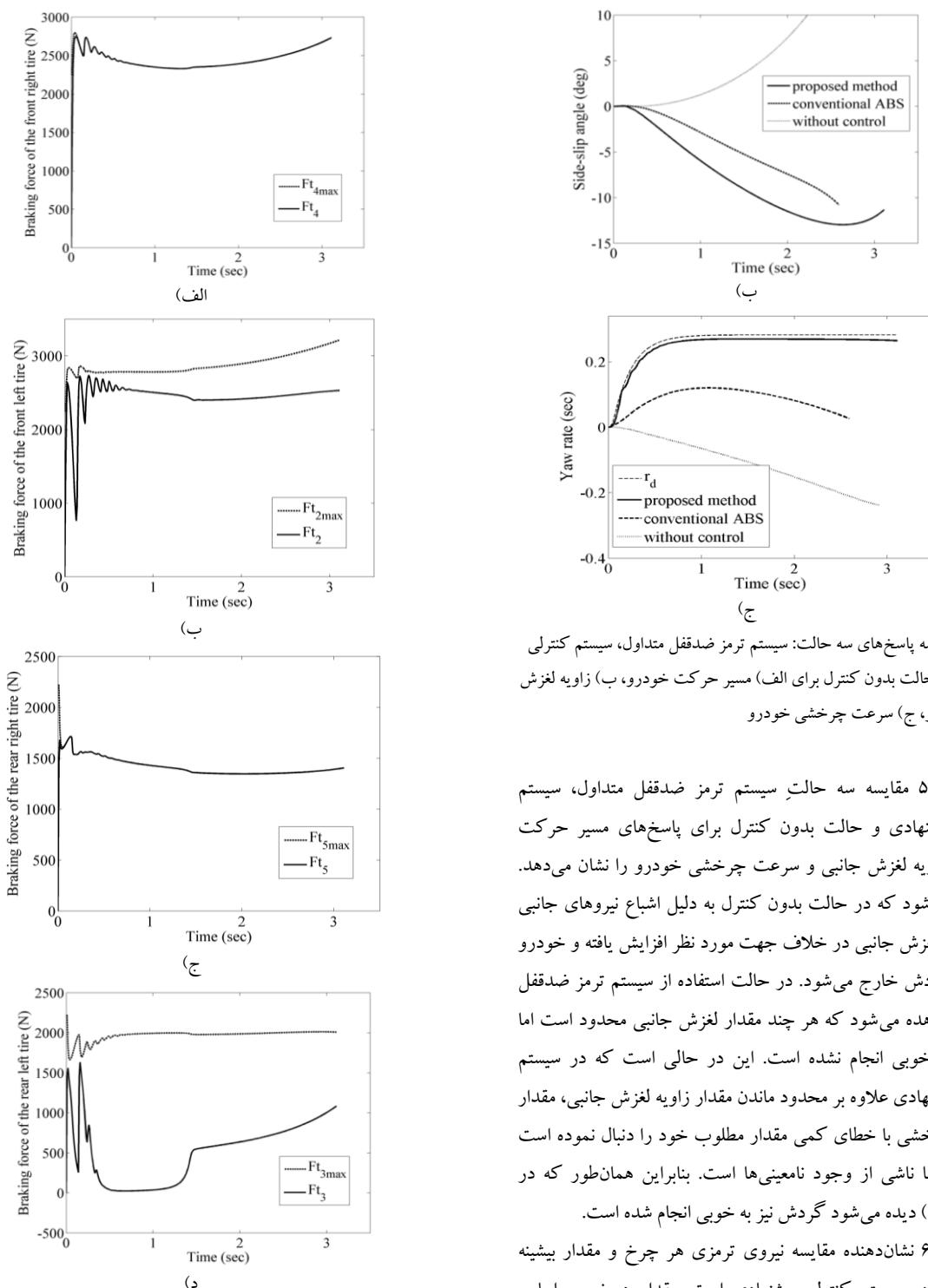


شکل ۳: توزیع نیروهای ترمزی

با مقایسه مقدار گشتاور چرخشی حاصل از قرار دادن نیروهای ترمزی بیشینه M_{zdm} و مقدار مطلوب گشتاور چرخشی M_{zdt} که توسط قانون کنترلی (۴۲) محاسبه می شود سه حالت زیر اتفاق خواهد افتاد:

(الف) اگر $M_{zdm} = M_{zdt}$ باشد. در این حالت که ایده ال می باشد، علاوه بر اینکه کلیه نیروها در مقدار بیشینه ممکن خود بوده، گشتاور چرخشی مطلوب برای حفظ خودرو در مسیر گردن نیز تامین می شود. در این وضعیت کمترین فاصله توقف ضمن حفظ فرمان پذیری خودرو ایجاد می شود.

(ب) اگر $M_{zdm} < M_{zdt}$ باشد. طبق شکل ۳ در این وضعیت باید نیروهای F_{t5} و F_{t4} در مقدار بیشینه خود بوده و از نیروهای سمت دیگر، F_{t3} و F_{t2} کم نمود. بدین منظور ابتدا از چرخ عقب F_{t3} که به دلیل انتقال بار به جلو ظرفیت کمتری دارد شروع به کم کردن نیرو می شود. در صورت نیاز به کاهش کمتر، نیروی F_{t3} را صفر کرده و از چرخ جلوی F_{t2} نیز نیرو کم می شود. بیشترین ظرفیت تولید گشتاور چرخشی با صفر



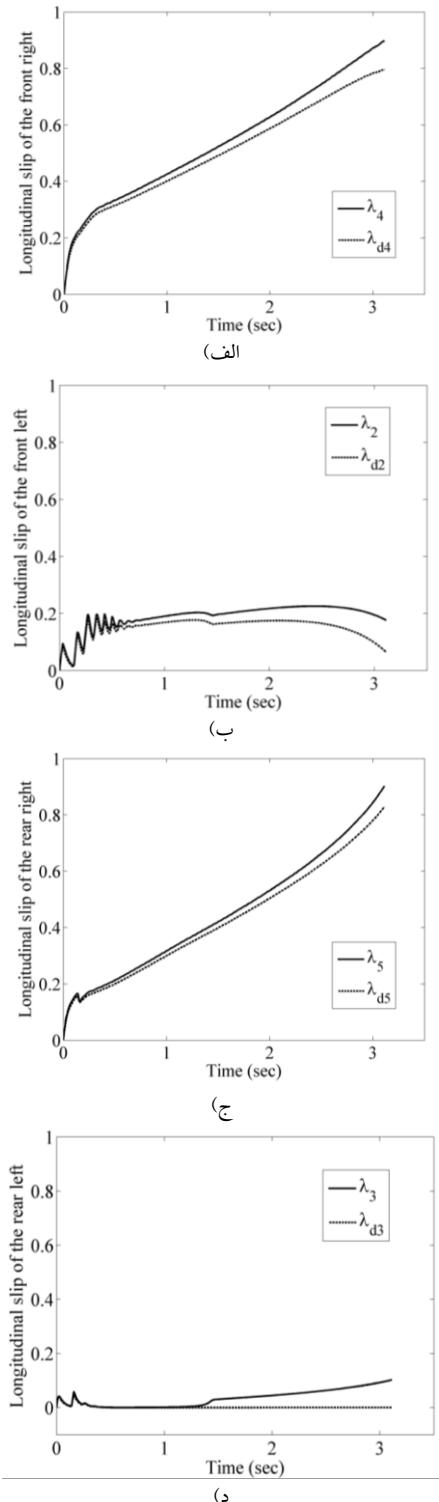
شکل ۵: مقایسه پاسخ های سه حالت: سیستم ترمز ضداقل متداول، سیستم کنترلی پیشنهادی و حالت بدون کنترل برای (الف) مسیر حرکت خودرو، (ب) زاویه لغزش جانبی خودرو، (ج) سرعت چرخشی خودرو

شکل ۵ مقایسه سه حالت سیستم ترمز ضداقل متداول، سیستم کنترلی پیشنهادی و حالت بدون کنترل برای پاسخ های مسیر حرکت خودرو، زاویه لغزش جانبی و سرعت چرخشی خودرو را نشان می دهد. مشاهده می شود که در حالت بدون کنترل به دلیل اشاع نیروهای جانبی تایر زاویه لغزش جانبی در خلاف جهت مورد نظر افزایش یافته و خودرو از مسیر گردش خارج می شود. در حالت استفاده از سیستم ترمز ضداقل متداول مشاهده می شود که هر چند مقدار لغزش جانبی محدود است اما گردش به خوبی انجام نشده است. این در حالی است که در سیستم کنترلی پیشنهادی علاوه بر محدود ماندن مقدار زاویه لغزش جانبی، مقدار سرعت چرخشی با خطای کمی مقدار مطلوب خود را دنبال نموده است که این خطأ ناشی از وجود نامعینی ها است. بنابراین همان طور که در شکل (۵ج) دیده می شود گردش نیز به خوبی انجام شده است.

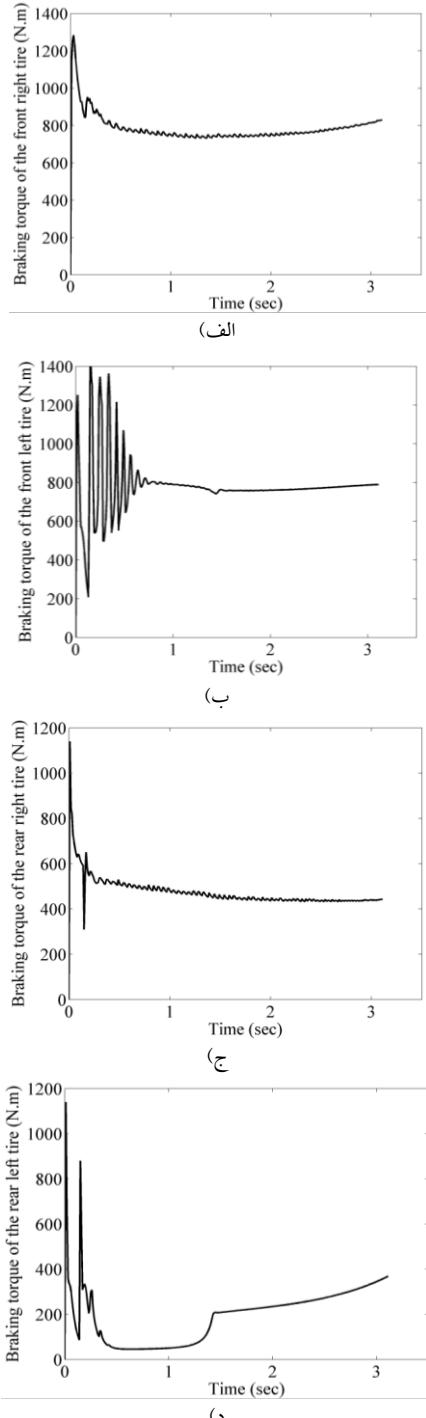
شکل ۶ نشان دهنده مقایسه نیروی ترمزی هر چرخ و مقدار پیشنهادی ممکن آن در سیستم کنترلی پیشنهادی است. مقدار هر نیرو بر اساس الگوریتم ارائه شده محاسبه شده است. این در حالی است که اگر از سیستم ترمز ضداقل متداول استفاده می شد، نیروی ترمزی هر چهار چرخ در مقدار پیشنهادی خود قرار می گرفت. شکل ۷ نیز مقدار گشتاور ترمزی هر چرخ در سیستم کنترلی پیشنهادی را نشان می دهد.

شکل ۶: مقایسه نیروی ترمزی هر چرخ در سیستم کنترلی پیشنهادی و مقدار پیشنهادی ممکن آن در سیستم ترمز ضداقل متداول (الف) چرخ جلو راست، (ب) چرخ جلو چپ، (ج) چرخ عقب راست، (د) چرخ عقب چپ

اما با توجه به توقف خودرو در زمان محدود این مقدار خطأ در نهایت محدود می‌باشد. توجه شود که بر اساس مدل نیروهای داگوف، لغزش طولی مطلوب متاظر با بیشینه نیروی ترمزی در چرخ‌های ۴ و ۵، با کاهش سرعت در طول مانور، افزایش می‌یابد.



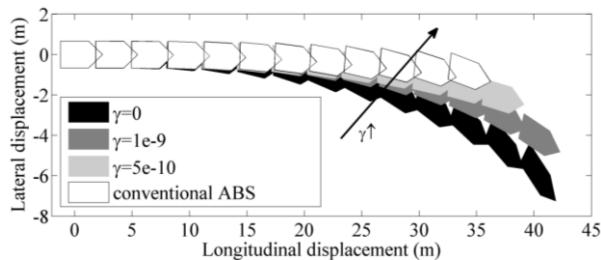
شکل ۸: پاسخ لغزش طولی هر چرخ و مقدار مطلوب آن در سیستم کنترلی پیشنهادی (الف) چرخ جلو راست، (ب) چرخ جلو چپ، (ج) چرخ عقب راست، (د) چرخ عقب چپ



شکل ۷: گشتاور ترمزی هر چرخ در سیستم کنترلی پیشنهادی (الف) چرخ جلو راست، (ب) چرخ جلو چپ، (ج) چرخ عقب راست، (د) چرخ عقب چپ

شکل ۸ لغزش طولی هر چرخ را به همراه مقدار لغزش مطلوب آن نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که یک خطای افزایشی در طول انجام ترمزگیری ایجاد شده که ناشی از وجود نامعینی‌های مدل‌سازی و پارامتری می‌باشد. با توجه به اینکه عبارت سرعت در مخرج رابطه (۳) وجود دارد و در طول ترمزگیری با گذشت زمان مقدار سرعت کاهش می‌یابد، بنابراین با گذشت زمان مقدار نامعینی‌ها افزایش می‌یابد [۱۰-۹].

خودرو را فراهم می‌نماید. نتایج شیوه‌سازی‌ها در مانور ترمزگیری در هنگام گردش در حضور نامعینی‌ها، عملکرد مناسب و مقاوم سیستم کنترلی پیشنهادی در رسیدن به اهداف مورد نظر را نشان داد.



شکل ۹: مقایسه مسیر گردش خودرو به ازای ضرایب وزنی مختلف روی گشتاور چرخشی در سیستم کنترلی پیشنهادی و سیستم ترمز ضدقل متدالول

شکل ۹ تاثیر مقدار گشتاور چرخشی اعمال شده به سیستم را بر عملکرد سیستم کنترلی نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۲۴)، با تنظیم ضرایب وزنی مقدار گشتاور چرخشی تغییر می‌کند. این شکل، مقایسه مسیر حرکت خودرو به ازای ضرایب وزنی مختلف روی گشتاور چرخشی در سیستم کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش ضرایب وزنی، فرمان‌پذیری کاهش پیدا کرده اما فاصله توقف کمتر شده است. با افزایش ضرایب وزنی و میل کردن آن به سمت بی-نهایت سیستم کنترلی پیشنهادی به سیستم ترمز ضدقل متدالول تبدیل می‌شود. در واقع سیستم ترمز ضدقل متدالول حالت خاصی از سیستم کنترلی طراحی شده است. در این حالت کمترین فاصله توقف ایجاد می-شود اما باید توجه داشت که خودرو فرمان‌پذیری کمتری را نیز درپی خواهد داشت. جدول ۱ نیز با نشان دادن فاصله توقف به ازای ضرایب وزنی مختلف موید نکته مذکور می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت با تنظیم ضرایب وزنی روی گشتاور چرخشی خارجی می‌توان بر اساس اولویت بین فاصله توقف کمتر و فرمان‌پذیری بهتر خودرو مصالحه برقرار نمود.

جدول ۱: فاصله توقف بر حسب ضرایب وزنی مختلف روی گشتاور چرخشی خارجی	
ضرایب وزنی روی گشتاور خارجی	فاصله توقف (m)
$\gamma = 0$	۴۱/۷۹
$\gamma = 5 \times 10^{-10}$	۴۱/۲۲
$\gamma = 10^{-9}$	۳۸/۲۵
$\gamma \rightarrow \infty$ (سیستم ترمز ضدقل متدالول)	۳۴/۲۰

۵-نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت دست‌یابی به کمترین فاصله توقف ضمن حفظ فرمان‌پذیری خودرو در یک مانور ترمزگیری شدید همراه با گردش، در این مقاله یک الگوریتم بهینه غیرخطی برای توزیع نیروهای ترمی تشریح گردید. اساس کار این الگوریتم، کاستن از بیشینه نیروهای ترمی قابل تولید توسط چرخ‌های یک طرف خودرو به اندازه‌های است که گشتاور چرخشی پایدار کننده تولید شود. بهینه‌بودن قانون کنترلی گشتاور چرخشی، امکان ایجاد مصالحه بین فاصله توقف کمتر و فرمان‌پذیری بهتر

- [10] M. Mirzaei, H. Mirzaeinejad, "Optimal design of a non-linear controller for anti-lock braking system", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, 2012, pp. 19-35.
- [۱۱] م. میرزاچی، ح. میرزاچی نژاد، س. وحیدی، د. حیدریان، م. ج. خسروجردی، "کنترل و تخمین غیرخطی لغزش طولی تایر جهت استفاده در سیستم ترمز ضد قفل خودروهای سواری"، *مجله کنترل*، جلد ۵، ۱۳۹۱، ص. ۴۲-۵۱.
- [12] M. Bang, S. Lee, C. Han, D. Maciuca, J. Hedrick , "Performance enhancement of a sliding mode wheel slip controller by the yaw moment control", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 215, 2001, pp. 455-468.
- [13] A. T. van Zanten, "Bosch ESP systems: 5 years of experience", *SAE Technical Paper*, 2000, pp. 428-436.
- [14] A. T. van Zanten, R. Erhardt, K. Landesfeind, G. Pfaff, "VDC systems development and perspective", *SAE Technical Paper*, 1998, pp.424-444.
- [15] D. E. Smith, J. M. Starkey, "Effects of model complexity on the performance of automated vehicle steering controllers: Model development, validation and comparison", *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, 1995, pp. 163-181.
- [16] W. H. Chen, D. J. Balance, P. J. Gawthrop, "Optimal control of nonlinear systems: a predictive control approach", *Automatica*, vol. 39, 2003, pp. 633-641.
- [17] M. Mirzaei , "A new strategy for minimum usage of external yaw moment in vehicle dynamic control system", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 18, 2010, pp. 213-224.

مراجع

- [1] A. Harifi, A. Aghagolzadeh, G. Alizadeh, M. Sadeghi, "Designing a sliding mode controller for slip control of antilock brake systems", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 16, 2008, pp. 731-741.
- [2] R. Kazemi, B. Hamed, B. Javadi, "A new sliding mode controller for four-wheel anti-lock braking system (ABS)", *SAE Technical paper*, 2000, pp.1-10.
- [3] Y. Lee, S. H. Zak, "Designing a genetic neural fuzzy antilock-brake-system controller", *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 6, 2002, pp. 198-211.
- [4] C. M. Lin, C. F. Hsu, "Self-learning fuzzy sliding-mode control for antilock braking systems", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 11, 2003, pp. 273-278.
- [5] J. J. E. Slotine, W. Li , "Applied nonlinear control", vol. 199,1991, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- [6] C. Unsal, P. Kachroo, "Sliding mode measurement feedback control for antilock braking systems", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 7, 1999, pp. 271-281.
- [7] I. Petersen, "Wheel slip control in ABS brakes using gain scheduled optimal control with constraints", Dr. Eng. Degree Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2003, pp. 32-51.
- [8] S. Anwar, B. Ashrafi, "A predictive control algorithm for an anti-lock braking system", *SAE paper*, 2002, pp. 01-0302.
- [9] H. Mirzaeinejad, M. Mirzaei, , "A novel method for non-linear control of wheel slip in anti-lock braking systems", *Control Engineering Practice*, vol. 18, 2010, pp. 918-926.