

تحلیل به‌کارگیری تغییرات بر بلندی غیرخطی در قوس‌های کلوتوئید-کلوتوئید در راه‌های برون‌شهری بر اساس مدل تعلیق یک چهارم خودرو

حسین پورخانی*، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام

خمینی، قزوین

علی عبدی کردانی، دانشیار گروه راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام

خمینی، قزوین

Email: pourkhani.university@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

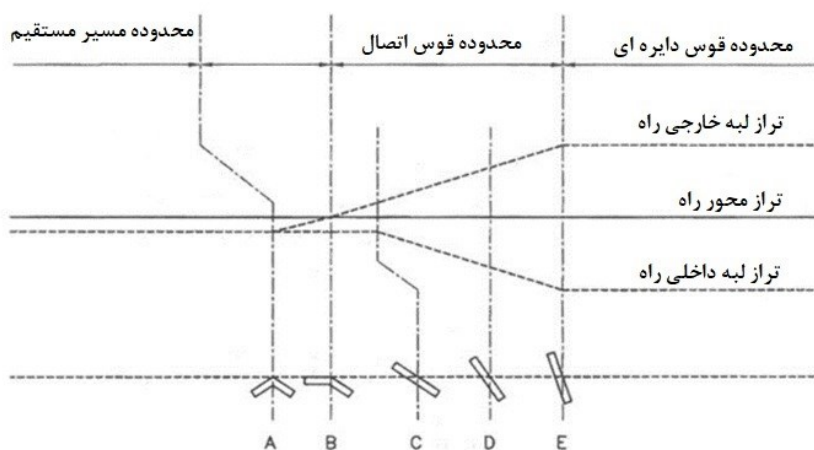
چکیده

قوس‌های افقی بخش مهمی از زیرساخت‌های جاده‌ای می‌باشند. تأمین ایمنی و راحتی رانندگی در این بخش‌ها همواره مورد توجه محققین بوده است. با توجه به ماهیت هندسی، و به‌ویژه تغییر انحنا در پلان مسیر و وجود بر بلندی، قوس‌های افقی بیش از سایر قسمت‌های جاده مستعد بروز حادثه می‌باشند. دستیابی به بر بلندی بیشینه در قوس‌های افقی دایره‌ای از مسیر مستقیم، عمدتاً به شکل یکنواخت خطی انجام می‌شود. کلوتوئیدها یکی از کاربردی‌ترین انتخاب‌ها جهت قوس اتصال بین قوس دایره‌ای و مسیر مستقیم می‌باشند. این قوس‌ها در صورت عدم وجود قسمت دایره‌ای (ناشی از محدودیت‌های هندسی و یا انتخاب اولیه طراح) می‌توانند به‌صورت ترکیب کلوتوئید-کلوتوئید در نظر گرفته شوند که در این صورت تغییرات خطی افزاینده بر بلندی تا نقطه اتصال دو کلوتوئید و سپس تغییر جهت ناگهانی و کاهش مقدار از ابتدا تا انتهای کلوتوئید دوم می‌تواند مشکل ایمنی و راحتی سر نشینان را در پی داشته باشد. در این تحقیق، به منظور رفع این مشکل، استفاده از تغییرات بر بلندی غیرخطی در محل اتصال دو قوس کلوتوئید بررسی شده است. به این منظور، مدل سیستم تعلیق یک چهارم خودرو با دو درجه آزادی جهت مطالعه شتاب قائم استفاده شده است. بر اساس نتایج، با به‌کارگیری تغییرات بر بلندی خطی در قوس‌های کلوتوئید-کلوتوئید، در محل شروع کلوتوئید و یا محل اتصال دو کلوتوئید، شتاب قائم بیشتر از آستانه شروع ناراحتی انسان (شتاب $0/8$ متر بر مجذور ثانیه) - بر اساس سرعت خودرو - بسیار محتمل خواهد بود (حتی سه برابر حد یاد شده) و با به‌کارگیری روش‌های غیرخطی درجه ۲ و درجه ۳، شتاب قائم به کمتر از $0/8$ کاهش خواهد یافت. برای نمونه، برای سرعت طراحی 100 کیلومتر بر ساعت، با استفاده از روش خطی، شتاب قائم بیش از $2/5$ متر بر مجذور ثانیه خواهد بود و با تیپ غیرخطی به حدود $0/8$ کاهش می‌یابد. واژه‌های کلیدی: ایمنی جاده، قوس افقی، تغییرات بر بلندی، قوس کلوتوئید-کلوتوئید، مدل سیستم تعلیق یک چهارم خودرو

۱. مقدمه

برای دستیابی از مسیر مستقیم به قوس افقی می-بایست تغییر خمیدگی مسیر و نیز تغییر در بریلندی مورد توجه طراح قرار گیرد. برای اینکه تغییرات شعاع گردش و در نتیجه تغییرات انحناى مسیر به شکل ناگهانی صورت نگیرد در طرح هندسی راه از قوس کلوئوئید استفاده می شود (کوبرین، ۲۰۱۷). این قوس از شعاع بی-نهایت آغاز و تا شعاع قسمت دایره ای قوس افقی ادامه می یابد. تغییرات بریلندی نیز در همین محدوده قوس کلوئوئید تأمین می گردد. بنابراین، کلوئوئید دو نقش متفاوت و مهم را در قوس های افقی ایفا می نماید. در شکل ۱، نمای کلی از تغییرات بریلندی در هنگام ورود از مسیر مستقیم به قوس افقی دایره ای نشان داده شده است (AASHTO، ۲۰۱۸).

قوس های افقی یکی از مهمترین المان های هندسی جاده-ها می باشند. به جهت وجود نیروهای جانب مرکز، قوس-های افقی مستعد ایجاد حادثه می باشند. از این جهت، طراحی این قسمت از مسیر از اهمیت زیادی برخوردار بوده و موضوع تحقیقات بسیاری بوده است (عیسی و محمود، ۲۰۰۸). در قوس های افقی، دو مقوله ایمنی و راحتی سرنشینان مورد توجه می باشند. این دو مهم از طریق شیب عرضی جاده در قوس (بریلندی) و نیز اصطکاک جانبی تأمین می گردند (اودلاه، ۲۰۰۵؛ ون پتجم و وگمن، ۲۰۱۴؛ چودهری و ماجی، ۲۰۱۹).

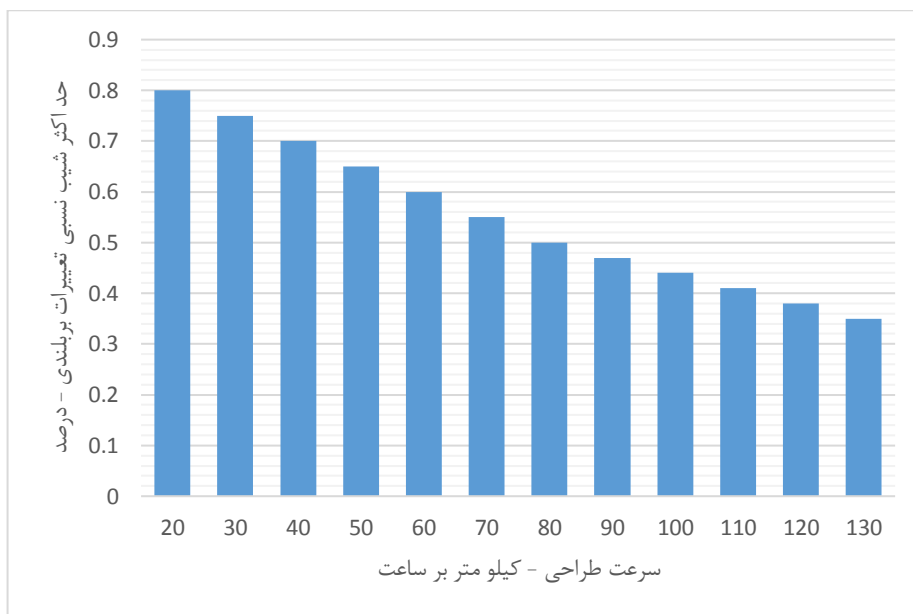


شکل ۱. نمودار کلی تغییرات بریلندی در قوس اتصال و قوس افقی (AASHTO، ۲۰۱۸)

این مقادیر با مقدار عددی رابطه (۱) قابل افزایش خواهد بود که در آن n تعداد خطوط عبور یک جهت می باشد (مارچیونا و پرکو، ۲۰۰۷).

$$(1) \quad \frac{n}{1 + \frac{0}{5(n-1)}}$$

اشنو (۲۰۱۸) برای شیب تغییرات بریلندی در راه های با یک خط عبور در هر جهت مقدار بیشینه ای را پیشنهاد می دهد. شکل ۲، نمودار تغییرات مقدار پیشنهادی را برای سرعت های مختلف طراحی نشان می دهد. برای سرعت های بیشتر، این شیب کمتر می باشد که به مفهوم بلندتر بودن طول کلوئوئید است. با افزایش تعداد خط عبور،



شکل ۲. نمودار حداکثر شیب نسبی تغییرات برابندی برای سرعت‌های مختلف طراحی (AASHTO, ۲۰۱۸)

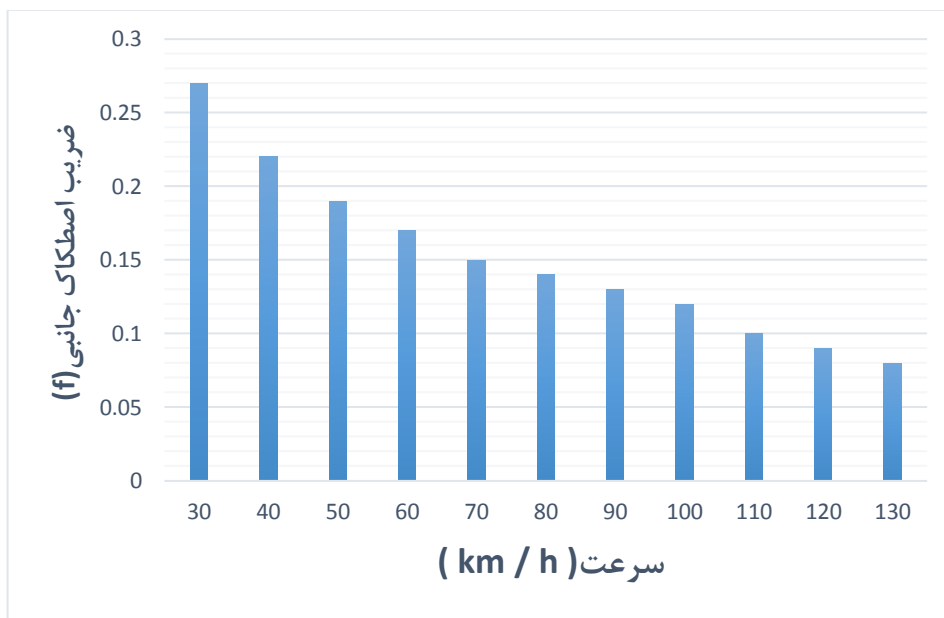
همکاران، ۲۰۱۲). برابندی کم، انحراف از جاده را می‌تواند در پی داشته باشد. از طرفی، زیاد بودن برابندی ممکن است مشکل فرمان‌پذیری خودرو را، به خصوص در زمان برف و یخبندان، در پی داشته باشد (جیلسی، ۱۹۹۲).

به طور کلی، برابندی حداکثر تابع شرایط آب و هوایی و پستی و بلندی زمین می‌باشد (هونگ، ۲۰۱۴). این مقدار بنا بر توصیه اشتنو (۲۰۱۸) می‌تواند ۴ تا ۱۲ درصد باشد. اصطکاک به عنوان عامل همراه برابندی در تأمین ایمنی و راحتی سرنشینان به عوامل بیشتری وابسته است که عبارتند از: سرعت، وزن خودرو، سیستم تعلیق، وضعیت تایر، طراحی تایر، شرایط روسازی و مشخصات هر گونه ماده‌ای که بین لاستیک و جاده قرار می‌گیرد (عبدالحافظ، ۲۰۱۹). در مهندسی راه، به جای مفهوم ضریب اصطکاک استاتیک و یا دینامیک از مفهومی اصطکاک جانبی استفاده می‌شود که مقداری محافظه‌کارانه را در اختیار طراح می‌گذارد. در شکل ۳، نمودار تغییرات اصطکاک جانبی نسبت به سرعت طراحی آورده شده است.

به هنگام حرکت خودرو در کلوئوئید، نیروهای جانبی وارد بر خودرو به تدریج افزایش می‌یابند. به طور کلی، حتی اگر قوس کلوئوئید موجود نباشد، یعنی اتصال مسیر مستقیم و قوس افقی بدون منحنی اتصال کلوئوئید شکل بگیرد، رانندگان برای دستیابی به مسیر منحنی - به هنگام رسیدن به قوس - با تنظیم زاویه فرمان، شعاع حرکتی خود را به شکل آرام و پیوسته کاهش می‌دهند و عملاً مسیر حرکت کلوئوئیدمانندی را در پیش می‌گیرند (شائو و شو، ۲۰۱۶). وجود قوس کلوئوئید به حفظ سرعت یکنواخت خودرو کمک می‌کند.

با توجه به اینکه قوس کلوئوئید همزمان برای تأمین برابندی و دستیابی به مسیر یکنواخت تغییر انحنای مسیر به کار می‌رود، ممکن است تأمین ضوابط هر دوی آنها (ضوابط شیب برابندی و طول کلوئوئید) به شکل همزمان مقدور نباشد. از این رو، تعدیل این دو مقدار برای دستیابی به یک مقدار واحد ضروری خواهد بود (دورث و لیبولد، ۱۹۹۵).

در تأمین برابندی می‌بایست مد نظر باشد که کم و زیاد بودن آن می‌تواند خطرآفرین باشد (عثمان و



شکل ۳. نمودار تغییرات اصطکاک جانبی نسبت به سرعت طراحی (AASHTO, ۲۰۱۸)

قوس افقی در راه دو خطه دو طرفه به صورت رابطه (۲) تعریف می شود که در آن L_c طول قوس افقی شامل طول کلوتوئید بر حسب مایل و S برابر ۱، $0/5$ و صفر به ترتیب در حالت وجود کلوتوئید در دو سمت قوس، در یک سمت قوس و عدم وجود کلوتوئید، می باشند.

$$\frac{1/55L_c + \frac{80/2}{R_c} - 0.012 * s}{1/55L_c} \quad (2)$$

به عبارت دیگر، وجود کلوتوئید موجب کاهش ضریب اصلاح می گردد (هاروود و همکاران، ۲۰۰۰؛ زگیر و همکاران، ۱۹۹۱- الف و ۱۹۹۱- ب). آیین نامه ایمنی راه اشتهو برای وجود کمبود بیش از $0/01$ مقدار برابندی، ضریب اصلاحی را ارائه می دهد. برای نمونه، برای کمبود برابندی بین $0/01$ و $0/02$ مقدار عددی رابطه (۳) ارائه شده که در آن sv میزان کمبود برابندی می باشد (HSM, ۲۰۱۰).

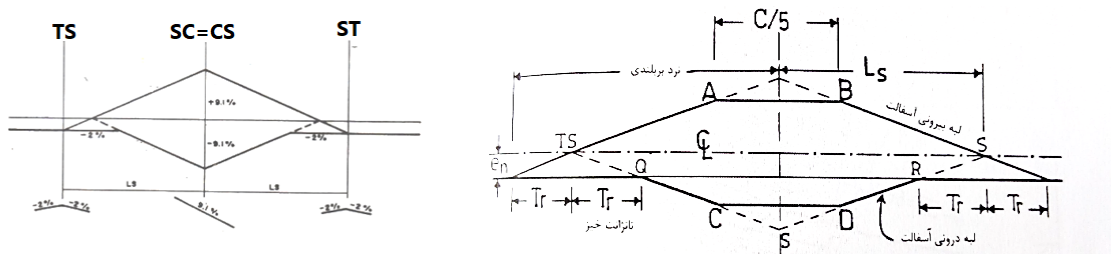
$$1 + 6(sv - 0.01) \quad (3)$$

تحقیق حاضر، به تغییرات برابندی در قوس های کلوتوئید ترکیبی می پردازد. بر اساس شیوه های موجود، در صورت اختیار کردن روش خطی برای توزیع برابندی، نمودار به شکل ۴- الف خواهد بود.

در حالی که بسیاری از محققین در مطالعه نیروهای وارد بر خودرو و نیز ضریب اصطکاک جانبی از تحلیل های سه بعدی دینامیک استفاده می کنند (عبدی کردانی و همکاران، ۲۰۱۴؛ توریبک و همکاران، ۲۰۱۴)، کتاب سبز اشتهو به منظور تحلیل و طراحی قوس های افقی از مدل جرم نقطه ای استفاده می کند. این مدل، هرچند به دلیل سادگی زیاد انطباق کامل با شرایط واقعی و نیروهای وارد بر خود را ندارد، ولی برای طیف قابل قبول از شرایط طراحی جاده- از جمله حرکت با سرعت ثابت در مسیر- کفایت و قدرت لازم را دارد (براون و برنان، ۲۰۱۴).

شعاع های بزرگتر معمولاً به شعاع های کوچکتر ترجیح داده می شوند زیرا ایمنی بیشتری را تأمین می کنند (لی و همکاران، ۲۰۱۸). ولی به دلیل محدودیت های اجرایی، شاید همیشه طراحی در محدوده شعاع های بزرگتر مقدور نباشد. همان گونه که قبلاً اشاره شد، برابندی نقش بسیار مهمی در تأمین ایمنی دارد و این مهم باعث شده در مراجع اصلی و نیز در تحقیقات صورت گرفته، در کنار مطالعه منحنی کلوتوئید، نقش تعیین کننده ای داشته باشد. برای نمونه، ضریب اصلاح حادثه برای

تحلیل به کارگیری تغییرات برابندی غیرخطی در قوس های کلوتوئید-کلوتوئید در راه های برون شهری...



شکل ۴. نمونه دیاگرام تغییرات برابندی در قوس کلوتوئید دوتایی، بر اساس روش خطی (الف: سمت چپ (مستقیم و همکاران، ۲۰۱۷)) و نمونه ای از راهکار پیشنهادی برای رفع تیزی (ب: سمت راست (منجم، ۲۰۱۲))

نخواهد بود که از نظر ایمنی و راحتی سرنشینان مشکلاتی را در پی خواهد داشت. یکی از راه هایی که برای مقابله با این مشکل پیش بینی شده رفع تیزی گوشه های دیاگرام با در نظر گرفتن یک قسمت مستقیم کوتاه می باشد (شکل ۴-ب) که در آن ۲۰٪ طول کلوتوئید با شیب یکنواخت طراحی شد). البته به جهت اینکه با این روش برابندی در طولی اط مسیر کاهش داده می شود می بایست مورد توجه طراح قرار گیرد.

این تحقیق، امکان استفاده از تابع غیرخطی را برای تأمین برابندی مورد بررسی قرار می دهد. به عبارت دیگر، تابع غیرخطی که در نقطه SC یا CS دارای مماس افقی باشد مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲. روش شناسی

در این تحقیق، شتاب قائم در محل اتصال دو کلوتوئید و نیز شروع کلوتوئید اول و پایان کلوتوئید دوم مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به گوشه دار بودن نمودار تغییرات برابندی، خودرو عملاً در محل اتصال دو کلوتوئید با یک دست انداز روبرو می شود. وجود حرکت ناگهانی قائم، تغییرات شتاب قائم را در پی خواهد داشت. بر اساس استاندارد ISO، شتاب قائم احساس ناراحتی را برای انسان در پی دارد (مرجانن، ۲۰۱۰). جدول ۱، گستره ای از تأثیرات شتاب قائم بر ایجاد ناراحتی را نشان داده است.

در حالی که در مراجع مربوطه عمدتاً روی روشی غیر از روش خطی تمرکز خاصی صورت نگرفته و اصولاً مسئله برابندی در قوس کلوتوئید صرفاً دستیابی از مقدار صفر تا مقدار بیشینه برابندی قوس دایره ای تعریف می شود و صرفاً طول مناسب برای این تغییرات موضوع مباحث است و نه آهنگ این تغییرات (کاریاوان و همکاران، ۲۰۱۷). این تحقیق به دنبال روشی برای پرهیز از تیزی نمودار تغییرات برابندی (مشابه شکل ۴) می باشد. اشتو (۲۰۱۸) برای رفع تیزی توصیه هایی دارد که عبارتند از گرد کردن گوشه ها با قوس های سهمی، دایره ای و یا اسپلاین ها و هیچگونه تحلیلی در این خصوص عرضه نمی شود.

حذف تیزی یاد شده در نمودار تغییرات برابندی حداقل از دو جنبه دارای اهمیت می باشد:

۱- اشتو برای تغییرات شیب نسبی برابندی (G) مقدار حداکثری را پیشنهاد داده است (شکل ۲) که البته این مقدار در حالت استفاده از راه چندخطه می تواند تا حدی افزایش داشته باشد. اما در صورت تیز بودن گوشه ها مانند نقطه SC یا CS - پایان کلوتوئید اول و شروع کلوتوئید دوم- در شکل ۴-الف، شیب نسبی در یک نقطه بر اساس رابطه (۴) ناگهان دو برابر می شود که در این صورت از مقدار حداکثر پیشنهادی افزایش می یابد.

$$G - (-G) = 2G \quad (4)$$

۲- هنگام عبور از نقطه SC یا CS، به دلیل تغییر ناگهانی شیب، چرخ های خودرو برای لحظه ای در تماس با جاده

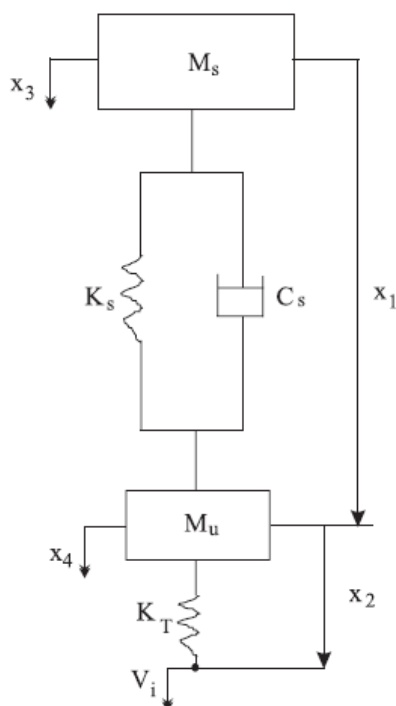
تحلیل به کارگیری تغییرات بر بلندی غیرخطی در قوس های کلوتوئید-کلوتوئید در راه های برون شهری...

جدول ۱. سطوح مختلف ایجاد ناراحتی بر اساس شتاب قائم (ال عشموری و ونگ، ۲۰۲۰)

سطح راحتی ایزو	مقدار شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
عدم احساس ناراحتی	< 0.315
احساس ناراحتی خیلی کم	0.315 تا 0.63
کمی احساس ناراحتی	0.5 تا 1
احساس ناراحتی	1.8 تا 1.6
احساس ناراحتی زیاد	2.5 تا 1.25
احساس ناراحتی شدید	> 2

در این مدل، یک چهارم جرم بدنه خودرو به عنوان جرم فنربندی شده و یک چهارم جرم کل اکسل ها و چرخ ها به عنوان جرم فنربندی نشده در نظر گرفته می شوند. معیار عملکرد در مدل فوق، شتاب جرم فنربندی شده و میزان جابجایی تعلیق می باشد. این مدل دارای دو درجه آزادی (جابجایی جرم فنربندی شده، جرم فنربندی نشده) می باشد. در شکل ۵، مدل یک چهارم خودرو نشان داده شده است.

مدل به کار رفته در این تحقیق به منظور مطالعه سیستم تعلیق، مدل یک چهارم خودرو می باشد. در خودرو، جهت تعدیل اثرات نامطلوب ناشی از ناهمواری سطح جاده، از سیستم تعلیق استفاده می شود. این اثرات باعث خستگی راننده و سرنشینان آن شده به گونه ای که ممکن است سلامتی راکبین را به خطر انداخته و حتی در کیفیت رانندگی تأثیر بگذارد (تورکی و آکچای، ۲۰۰۵).



شکل ۵. نمونه یک مدل سیستم تعلیق یک چهارم خودرو (تورکی و آکچای، ۲۰۰۵)

octave پیاده‌سازی شده است. کلیه کدهای به کار رفته در تحقیق در بستر اینترنت بارگذاری شده است.

۱-۲. ساخت سناریوهای هندسی (با تغییرات خطی)

به منظور اجرای معادلات سیستم تعلیق لازم است مشخصات هندسی جاده تعیین گردد. برای این منظور، در فضای دوبعدی، طول و ارتفاع نقاط تعریف می‌گردد. همان گونه که قبلاً اشاره شد، کتاب سبز اشتو بر اساس مقدار سرعت طراحی حداکثر شیب نسبی تغییرات برابندی را توصیه کرده است. همین شاخص در این قسمت مبنای انتخاب شیب تغییرات برابندی و یا شیب لبه آسفالت قرار می‌گیرد.

مسیر مورد نظر برای مدل‌سازی از چهار بخش زیر تشکیل شده است:

الف) یک مسیر مستقیم تا قبل از رسیدن به ابتدای کلوتوئید اول

ب) یک مسیر با شیب افزایشنده متناظر با طول کلوتوئید اول. در این طول، تغییرات برابندی یا لبه آسفالت از یک مقدار ثابت شروع و تا مقدار حداکثر تغییر می‌یابد.

ج) یک مسیر با شیب کاهشنده متناظر با طول کلوتوئید دوم. در این طول، تغییرات برابندی یا لبه آسفالت از مقدار حداکثر تا یک مقدار ثابت انتهایی تغییر می‌یابد.

د) و یک مسیر مستقیم بعد از انتهای کلوتوئید دوم.

در شکل ۶، نمونه پروفیل طولی با در نظر گرفتن میزان ۵۰ متر برای هر یک از بخش‌های "الف" تا "د" نشان داده شده است.

در این شکل، M_s جرم بدنه خودرو فربندی شده، M_u جرم فربندی نشده چرخ و محور، K_s ثابت فربند سیستم تعلیق، C_s ثابت میرایی سیستم تعلیق و K_T ثابت فربند چرخ می‌باشد. معادلات حاکم بر سیستم در فضای حالت با تعریف متغیرهای حالت زیر در رابطه ماتریسی (۵) آورده شده است (تورکی و آکچای، ۲۰۰۵):

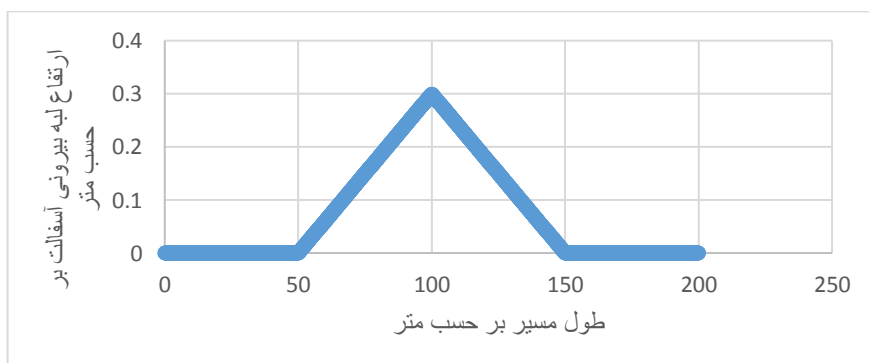
x_1 : فاصله بین جرم‌های فربندی شده و فربندی نشده
 x_2 : فاصله بین جرم فربندی نشده و جاده
 x_3 : سرعت مطلق جرم فربندی شده
 x_4 : سرعت مطلق جرم فربندی نشده

$$\dot{X} = AX + BV_i \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_s & 0 & -C_s & C_s \\ M_s & 0 & M_s & M_s \\ K_s & K_T & C_s & -C_s \\ M_u & M_u & M_u & M_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (5)$$

که V_i سرعت ورودی فضای حالت می‌باشد. در این تحقیق، شتاب قائم جرم فربندی شده \ddot{x}_3 مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، فرم ماتریسی رابطه (۶) برای خروجی تعریف می‌گردد:

$$Y = CX \Rightarrow Y = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

فرم ماتریسی (۶) مقدار x_3 را می‌دهد که با مشتق‌گیری نسبت به زمان مقدار \ddot{x}_3 به دست می‌آید. در این تحقیق، سیستم معادلات فوق با کد نویسی در محیط GNU



شکل ۶. نمونه پروفیل طولی لبه آسفالت دارای تیزی در محل تغییرات شیب

تحلیل به کارگیری تغییرات بر بلندی غیرخطی در قوس های کلو توئید- کلو توئید در راه های برون شهری...

۲-۲. مشخصات سیستم تعلیق خودرو

برای پیاده سازی سناریوهای سیستم تعلیق لازم است مشخصات جرم های فنربندی شده و فنربندی نشده، سختی فنرها و نیز خصوصیات میراگر تعریف گردد. در

این تحقیق، با توجه به گستردگی استفاده و حجم تردد زیاد در محورهای مواصلاتی کشور، از مشخصات خودرو پراید برای مدل سازی استفاده شده است. در جدول ۲، مشخصات خودرو آورده شده است (قربانیان و همکاران، ۱۳۹۰).

جدول ۲. مشخصات مدل یک چهارم خودرو اتومبیل پراید (قربانیان و همکاران، ۱۳۹۰)

پارامتر	مقدار
M_s	۲۵۰ کیلوگرم
M_u	۲۰ کیلوگرم
K_s	۷۰۰۰ نیوتن بر متر
K_T	۱۰۵۰۰۰ نیوتن بر متر
C_s	۲۶۰۰ نیوتن ثانیه بر متر

۳-۲. پیاده سازی مدل برای سناریوهای هندسی

دارای تغییرات خطی

در این قسمت، به منظور مشخص شدن میزان نیروهای وارد بر خودرو و مشخص شدن لزوم یا عدم لزوم پرداختن به روش های غیرخطی، سیستم تعلیق مستقیماً روی مدل های خطی پیاده سازی می گردد. در این قسمت، اجزای اصلی مدل سازی که باید مورد توجه باشد به قرار زیر است:

الف) طول کلو توئید: برای طول کلو توئید، کتاب اشتو محدودیت هایی را توصیه کرده است. برای کمینه طول کلو توئید دو موضوع تغییرات شتاب جانبی مجاز و نیز ایجاد فرصت کافی برای تغییرات شعاع انحنا مد نظر قرار می گیرد که به ترتیب در قالب روابط $2.19\sqrt{R_c}$ و $0.01783\frac{v^3}{R_c}$ به دست می آیند که در آن شعاع قوس دایره ای (کمترین شعاع قوس کلو توئید) بر حسب متر و v سرعت طراحی بر حسب کیلومتر بر ساعت می باشد. طول کمینه کلو توئید، بیشینه این دو مقدار است. برای بیشینه طول کلو توئید، ملاک عمل پرهیز از تجاوز به خط

کناری است و برابر $4.8989\sqrt{R_c}$ می باشد (اشتو، ۲۰۱۸؛ لین و نیو، ۲۰۱۱).

ب) عرض جاده: هر چند مدل جاده در سیستم تعلیق به کار رفته در این تحقیق به بعد عرضی نمی پردازد، ولی به جهت ارتباط مستقیم میزان عرض جاده با برخاستگی لبه آسفالت، این مقدار از اهمیت زیادی برخوردار است. ج) میزان بر بلندی: مانند آنچه در بخش "ب" بیان شد، دانستن بر بلندی به منظور تعیین میزان برخاستگی لبه آسفالت اهمیت زیادی دارد.

د) شیب تغییرات بر بلندی: با توجه به طول کلو توئید و نیز میزان برخاستگی لبه آسفالت تعیین می شود که باید به میزان حداکثر توصیه اشتو محدود باشد.

۴-۲. تعریف تغییرات غیرخطی بر بلندی در

محدوده اتصال دو کلو توئید

در این قسمت، به منظور رفع تیزی دیاگرام بر بلندی در محل اتصال دو کلو توئید از معادله درجه سه استفاده می گردد. رابطه غیرخطی مورد نظر در محل اتصال دو قوس کلو توئید دارای شیب صفر بوده و در فاصله ای قبل از شروع تغییرات غیرخطی دارای شیب مماس با خط وصل

۳ واسنجی شده برای مسأله مطابق رابطه (۱۲) خواهد بود :

$$f(x) = -\frac{g_1}{L^2} x^3 + \frac{g_1}{L} x^2 + g_1 x \quad (12)$$

معادله فوق از ابتدای شروع تغییرات غیرخطی تا محل اتصال دو کلوئوئید معتبر بوده و برای بخش دوم (از محل برخورد دو قوس کلوئوئید تا انتهای تغییرات غیرخطی) قرینه همین معادله معتبر خواهد بود (با توجه به برابر بودن قدر مطلق g_1 و g_2).

۲-۵. تعریف تغییرات غیرخطی بر بلندی در

محدوده اتصال کلوئوئید و مماس مسیر

برای این قسمت، با توجه به کاربرد گسترده قوس سهمی در پروفیل طولی مسیر، از رابطه سهمی استفاده شده است. دلیل عدم استفاده از قوس سهمی در محل اتصال دو کلوئوئید (بخش ۲-۴) جلوگیری از کمتر شدن میزان بر بلندی در محل اتصال دو کلوئوئید (مانند آنچه در روش نمایش داده شده در شکل ۴-ب آورده شده است) می‌باشد. به عبارت دیگر، در صورت استفاده از قوس سهمی در محل برخورد دو راستای تغییرات خطی بر بلندی (نقطه sc در شکل ۴)، میزان بر بلندی کاهش خواهد داشت (مانند کاهش ارتفاع قوس قائم در محل تاج قوس نسبت به ارتفاع محل برخورد دو مماس اول و دوم مسیر). از آنجایی که در محل شروع کلوئوئید اول و پایان کلوئوئید دوم استفاده از قوس سهمی مشکل یاد شده را همراه ندارد از این قوس استفاده شده است. مدل استفاده شده در ساخت پروفیل طولی بر اساس رابطه (۱۳) بوده است:

$$f(x) = \frac{g_1 - g_2}{2L} x^2 + g_1 x \quad (13)$$

که در آن L طول سهمی (بر حسب متر) می‌باشد. سهمی مورد اشاره در فاصله $L/5$ قبل از کلوئوئید شروع شده و تا $L/5$ بعد از کلوئوئید ادامه خواهد داشت. رابطه فوق به جهت استفاده سنتی آن در قوس‌های قائم، انتخاب

شروع قوس کلوئوئید و محل برخورد دو قوس خواهد بود. چون دو نقطه و دو میزان شیب مورد نظر است، ساده‌ترین رابطه، رابطه درجه سه خواهد بود. رابطه (۷)، فرم کلی درجه ۳ می‌باشد که لازم است مقادیر a ، b ، c و d برای مسأله واسنجی شوند:

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (7)$$

برای این منظور، نیاز به تعریف چهار قید برای تشکیل چهار معادله وجود دارد. لذا، رابطه به گونه‌ای واسنجی می‌شود که مماس در انتهای کلوئوئید به شکل افقی (شیب صفر) و مماس در ابتدای شروع تغییرات برابر شیب مدل خطی باشد:

قید اول: شروع قوس- در این قسمت، ارتفاع نسبی و طول نسبی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین:

$$f(0) = 0 \Rightarrow d = 0 \quad (8)$$

قید دوم: شروع قوس- در این قسمت، شیب لبه آسفالت برابر شیب رابطه خطی، یعنی g_1 می‌باشد. بنابراین:

$$\frac{df}{dx}(0) = g_1 \Rightarrow c = g_1 \quad (9)$$

قید سوم: انتهای قوس- در این قسمت، مقدار ارتفاع لبه آسفالت نسبت به شروع برابر Δ می‌باشد. بنابراین، با جای‌گذاری رابطه (۹) و در نظر گرفتن طول کلی L برای حد فاصل شروع تغییرات غیرخطی و محل برخورد دو قوس:

$$\begin{aligned} f(L) = \Delta &= aL^3 + bL^2 + g_1 * L \\ &= aL^3 + bL^2 + \frac{\Delta}{L} * L \\ &\Rightarrow aL^3 + bL^2 = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

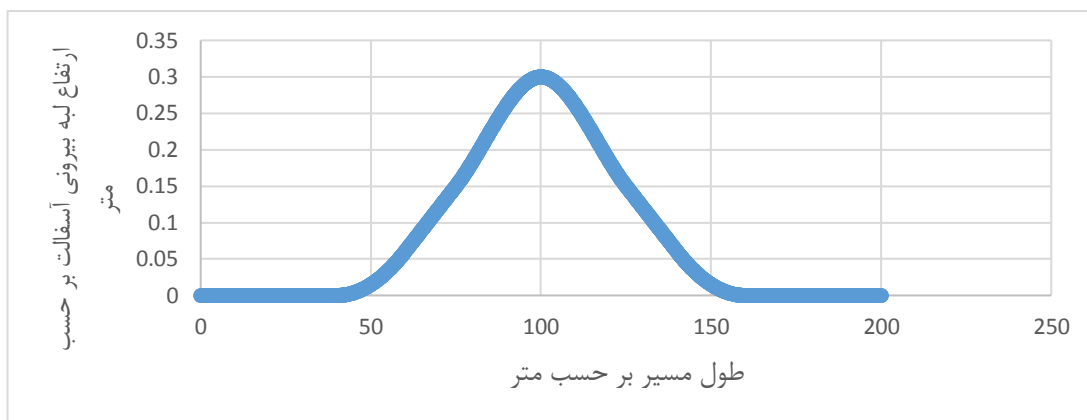
قید چهارم: انتهای قوس- در این قسمت، مماس افقی، یا به عبارت دیگر مشتق، برابر صفر است:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dx}(L) = 0 &\Rightarrow 0 \\ &= 3aL^2 + 2bL + g_1 \quad (11) \end{aligned}$$

با حل دستگاه دو معادله دو مجهول (۱۰) و (۱۱) خواهیم داشت $a = -\frac{g_1}{L^2}$ و $b = \frac{g_1}{L}$. بنابراین، رابطه درجه

تحلیل به کارگیری تغییرات برابندی غیرخطی در قوس های کلوتوئید-کلوتوئید در راه های برون شهری...

گردید. در شکل ۷، نمونه تغییرات غیرخطی در لبه آسفالت شامل منحنی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید و سهمی درجه ۲ در ابتدای کلوتوئید اول و انتهای کلوتوئید دوم آورده شده است.



شکل ۷. نمونه پروفیل طولی لبه آسفالت دارای تغییرات غیرخطی در لبه آسفالت

۳-۱. پیاده سازی سیستم تعلیق برای الگوی دارای

تیزی دیاگرام برابندی

در این قسمت، مدل سازی در دو گروه دارای یک خط عبور و دارای دو خط عبور در هر سمت انجام می شود. برای هر سناریو، بر اساس انتخاب سرعت طراحی و سپس انتخاب حداکثر شیب لبه آسفالت (توصیه اشتو) پروفیل طولی تعیین شده و در مدل سیستم تعلیق اعمال می شود. جدول ۳ در بردارنده نتایج مدل سازی می باشد.

۳. یافته های تحقیق

در این قسمت، برای سناریوهای مبتنی بر روش خطی و دارای تیزی در دیاگرام برابندی (تیزی در لبه آسفالت) مدل سیستم تعلیق پیاده شده و میزان شتاب قائم تعیین می گردد. برای این منظور، سرعت های طراحی ۲۰ تا ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت و میزان شیب نسبی لبه آسفالت مورد توجه قرار می گیرد.

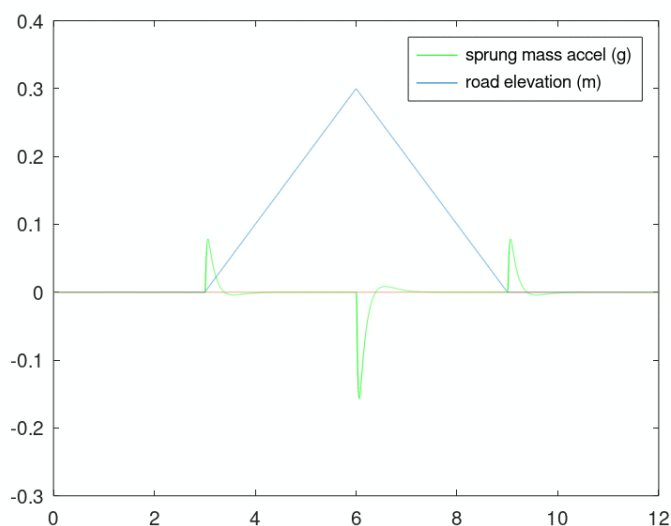
جدول ۳. شتاب قائم در محل اتصال دو کلوتوئید برای راه های دوخطه و چهارخطه (دیاگرام خطی برابندی)

سرعت	هر طرف دو خط عبور (چهارخطه)			هر طرف یک خط عبور (دوخطه)		
	شتاب میانه	شتاب ابتدا	شیب لبه آسفالت	شتاب میانه	شتاب ابتدا	شیب لبه آسفالت
20	0.91	0.46	1.07	0.68	0.34	0.8
30	1.28	0.64	1.00	0.96	0.48	0.75
40	1.59	0.80	0.93	1.20	0.60	0.7
50	1.86	0.93	0.87	1.39	0.70	0.65
60	2.06	1.03	0.80	1.54	0.77	0.6
70	2.19	1.09	0.73	1.65	0.82	0.55
80	2.30	1.15	0.67	1.71	0.86	0.5
90	2.43	1.22	0.63	1.81	0.91	0.47
100	2.53	1.26	0.59	1.89	0.94	0.44

2.59	1.30	0.55	1.93	0.97	0.41	110
2.62	1.31	0.51	1.96	0.98	0.38	120
2.62	1.31	0.47	1.95	0.98	0.35	130

شکل ۸، نمودار تغییرات شتاب قائم برای سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت و شیب لبه آسفالت ۰/۶ را برای ترکیب دو کلوتوئید ۵۰ متری، در حالت استفاده از نمودار خطی، نشان می‌دهد.

در جدول ۳، شیب لبه آسفالت برای راه دارای یک خط عبور در هر طرف بر اساس توصیه مستقیم اشتو انتخاب شده است (شکل ۲) و برای راه چهارخطه (دو خط در هر جهت) این میزان شیب بر اساس رابطه (۱) با در نظر گرفتن $n = 2$ در عدد $1/33$ ضرب شده است.



شکل ۸. نمودار تغییرات شتاب قائم برای ترکیب دو کلوتوئید ۵۰ متری برای سرعت طراحی ۶۰ کیلومتر بر ساعت

تیپ ۱: ۱۰ متر سهمی در محل شروع کلوتوئید اول و انتهای کلوتوئید دوم و ۱۰ متر منحنی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید

تیپ ۲: ۲۰ متر سهمی در محل شروع کلوتوئید اول و انتهای کلوتوئید دوم و ۲۰ متر منحنی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید

تیپ ۳: ۳۰ متر سهمی در محل شروع کلوتوئید اول و انتهای کلوتوئید دوم و ۳۰ متر منحنی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید

تیپ ۴: ۳۰ متر سهمی در محل شروع کلوتوئید اول و انتهای کلوتوئید دوم و ۴۰ متر منحنی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید

به منظور نمایش بهتر همزمان تغییرات شتاب قائم و پروفیل طولی در یک نمودار، از واحد g (شتاب گرانش زمین) برای شتاب استفاده شده است.

۲-۳. پیاده‌سازی سیستم تعلیق برای الگوی دارای دیاگرام برابندی غیرخطی در محل اتصال دو کلوتوئید

با توجه به روابط پیشنهادی برای رابطه غیرخطی برابندی (رابطه درجه ۳ و سهمی) در این تحقیق پنج تیپ ترکیب سهمی و منحنی درجه سه تعریف و مدل‌سازی گردید که عبارتند از:

تحلیل به کارگیری تغییرات بریلندی غیرخطی در قوس‌های کلوتوئید-کلوتوئید در راه‌های برون‌شهری...

تیپ ۵: ۲۰ متر سهمی در محل شروع کلوتوئید اول و نتایج شبیه‌سازی برای راه‌های دوخطه و یک‌خطه در قالب انتهای کلوتوئید دوم و ۵۰ متر منحنی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید

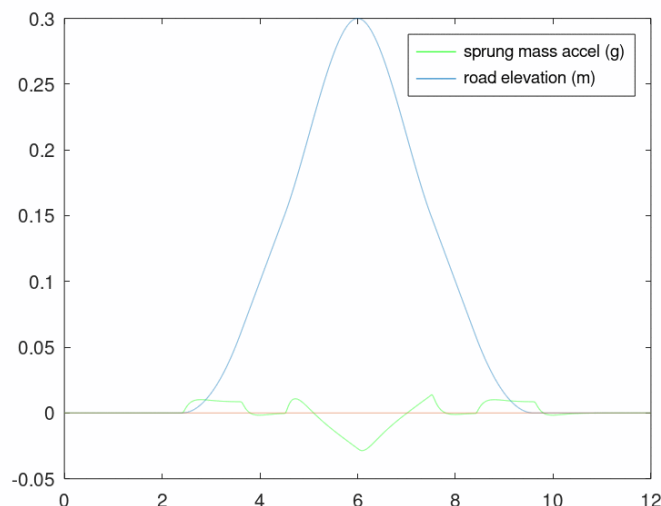
جدول ۴. شتاب قائم در محل اتصال دو کلوتوئید برای راه‌های دوخطه دوطرفه دارای تغییرات لبه آسفالت غیرخطی

سرعت	تیپ ۱		تیپ ۲		تیپ ۳		تیپ ۴		تیپ ۵	
	مثبت	منفی	مثبت	منفی	مثبت	منفی	مثبت	منفی	مثبت	منفی
20	0.10	0.21	0.05	0.10	0.03	0.07	0.03	0.03	0.02	0.04
30	0.17	0.43	0.11	0.22	0.07	0.14	0.05	0.11	0.04	0.09
40	0.19	0.67	0.17	0.37	0.12	0.24	0.09	0.18	0.07	0.14
50	0.20	0.91	0.23	0.53	0.17	0.36	0.13	0.26	0.10	0.21
60	0.23	1.13	0.27	0.69	0.22	0.47	0.17	0.35	0.14	0.28
70	0.25	1.31	0.28	0.84	0.26	0.59	0.21	0.44	0.17	0.35
80	0.30	1.45	0.27	0.96	0.29	0.69	0.25	0.53	0.20	0.42
90	0.35	1.62	0.26	1.11	0.32	0.81	0.28	0.63	0.24	0.50
100	0.41	1.75	0.27	1.23	0.33	0.92	0.31	0.72	0.27	0.58
110	0.45	1.86	0.28	1.34	0.33	1.02	0.33	0.80	0.30	0.65
120	0.49	1.94	0.29	1.43	0.31	1.10	0.34	0.88	0.32	0.72
130	0.53	1.98	0.29	1.49	0.29	1.16	0.34	0.94	0.33	0.77

جدول ۵. شتاب قائم در محل اتصال دو کلوتوئید برای راه‌های چهارخطه دارای تغییرات لبه آسفالت غیرخطی

سرعت	تیپ ۱		تیپ ۲		تیپ ۳		تیپ ۴		تیپ ۵	
	مثبت	منفی	مثبت	منفی	مثبت	منفی	مثبت	منفی	مثبت	منفی
20	0.13	0.28	0.07	0.14	0.05	0.09	0.03	0.07	0.03	0.05
30	0.22	0.58	0.14	0.30	0.09	0.19	0.07	0.14	0.06	0.11
40	0.25	0.89	0.23	0.49	0.16	0.32	0.12	0.24	0.09	0.19
50	0.26	1.22	0.31	0.71	0.23	0.48	0.17	0.35	0.14	0.28
60	0.30	1.50	0.36	0.92	0.29	0.63	0.23	0.47	0.18	0.37
70	0.33	1.74	0.38	1.11	0.35	0.78	0.28	0.59	0.23	0.47
80	0.40	1.94	0.37	1.29	0.39	0.93	0.33	0.71	0.27	0.56
90	0.47	2.17	0.34	1.48	0.43	1.09	0.38	0.84	0.32	0.67
100	0.54	2.35	0.36	1.65	0.44	1.23	0.42	0.96	0.36	0.78
110	0.61	2.50	0.37	1.80	0.44	1.36	0.45	1.08	0.40	0.88
120	0.66	2.60	0.38	1.91	0.42	1.47	0.46	1.18	0.43	0.96
130	0.71	2.66	0.39	2.00	0.39	1.56	0.46	1.26	0.44	1.04

شکل ۹، نمودار تغییرات شتاب قائم برای سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت و شیب لبه آسفالت ۰/۶ را برای ترکیب دو کلوتوئید ۵۰ متری، برای حالت استفاده از تیپ پنج تغییرات غیرخطی بریلندی نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار تغییرات شتاب قائم برای ترکیب دو کلوتوئید ۵۰ متری برای سرعت طراحی ۶۰ کیلومتر بر ساعت و استفاده از تیپ پنج تغییرات بر بلندی

۴. بحث و نتیجه گیری

گرفته شده است. شتاب‌های قائم برای راه‌های چهارخطه بیشتر می‌باشد که به دلیل افزایش ۳۳ درصدی شیب لبه آسفالت می‌باشد. شتاب قائم در محل اتصال دو کلوتوئید بیشتر از محل اتصال کلوتوئیدها با قسمت مستقیم می‌باشد که نشان‌دهنده لزوم توجه بیشتر در اصلاح این قسمت از مسیر می‌باشد.

معیار ارزیابی روش پیشنهادی ارائه شده در تحقیق برای تغییرات غیرخطی بر بلندی که نتیجه آن تغییرات غیرخطی لبه آسفالت در محل کلوتوئید دوتایی است، شتاب قائم می‌باشد. بر اساس استاندارد ایزو، حد احساس ناراحتی انسان، شتاب قائم ۰/۸ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در این تحقیق، مدل یک چهارم خودرو سیستم تعلیق هم برای رابطه خطی و هم برای پنج ترکیب غیرخطی تغییرات بر بلندی پیاده‌سازی شده است که جدول نتایج آنها در بخش ۳ آورده شد.

۴-۲. تحلیل نتایج برای تغییرات غیرخطی بر بلندی

جدول ۴ و ۵ دربردارنده نتایج برای تغییرات غیرخطی بر بلندی می‌باشند. اطلاعات جداول بیانگر کاهش قابل توجه شتاب قائم در صورت استفاده از تغییرات غیرخطی بر بلندی می‌باشد. استفاده از روش‌های پیشنهادی تحقیق در راه‌های دوخطه دوطرفه نتایج بهتری را برای تیپ‌های دارای محدوده غیرخطی کمتر نشان داده است. به عبارت دیگر، تغییرات غیرخطی در طول کمتری از تغییرات بر بلندی برای دستیابی به شتاب قائم کمتر مورد نیاز می‌باشد. همچنین، همین نکته در زمینه سرعت‌های کمتر در هر دو حالت راه دوخطه دوطرفه و چهارخطه صدق می‌نماید. به عبارت دیگر، با کاهش سرعت طراحی، تغییرات غیرخطی کمتری در طول تغییرات بر بلندی مورد نیاز خواهد بود. استفاده از سهمی ۱۰ متری در ابتدای

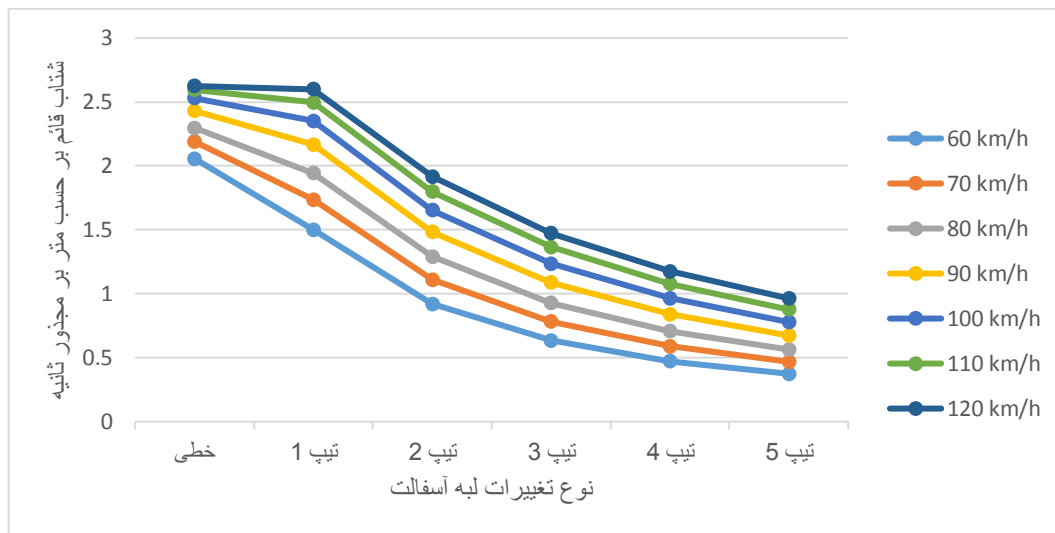
۴-۱. تحلیل نتایج برای تغییرات خطی بر بلندی

جدول ۳ نتایج مدل‌سازی برای رابطه خطی را برای سرعت‌های طراحی مختلف (که برای هر کدام شیب توصیه شده کتاب سبز اشتو برای لبه آسفالت در نظر گرفته شده) نشان می‌دهد. مقادیر شتاب قائم بیش از ۰/۸ بخش عمده‌ای از اطلاعات جدول را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده لزوم ارائه راهکار می‌باشد. برای سرعت‌های بیشتر، شتاب قائم بیشتر به دست آمده است و این در حالی است که بنا بر توصیه کتاب سبز اشتو، شیب لبه آسفالت کمتری برای سرعت‌های بیشتر در نظر

تحلیل به کارگیری تغییرات بریلندی غیرخطی در قوس‌های کلوتوئید-کلوتوئید در راه‌های برون‌شهری...

منظور نمایش بهتر در شکل ۱۰ بر اساس اطلاعات جدول ۵، حداکثر شتاب قائم برای تیپ‌های مختلف تغییرات بریلندی و برای سرعت‌های مختلف برای راه‌های چهارخطه آورده شده است.

کلوتوئید اول و انتهای کلوتوئید دوم جهت دستیابی به شتاب قائم مناسب کافی می‌باشد. برای محل اتصال دو کلوتوئید و در محدوده تغییرات غیرخطی درجه سه، طول بیشتر یعنی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مورد نیاز خواهد بود. به



شکل ۱۰. پیشینه شتاب قائم برای انواع تغییرات لبه آسفالت برای سرعت‌های مختلف برای راه‌های چهارخطه

به کارگیری ۵۰ متر تغییرات غیرخطی در محل اتصال دو کلوتوئید کفایت لازم را دارد. برای نمونه، برای سرعت ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت، شتاب قائم از مقدار ۱/۹۸ متر بر مجذور ثانیه در حالت خطی به مقدار ۰/۷۷ (یعنی کمتر از حد آستانه ناراحتی انسان) می‌رسد. جدول ۶ که برگرفته شده از اطلاعات جداول ۴ و ۵ است، بیانگر فاصله لازم برای ایجاد تغییرات غیرخطی درجه سه به منظور کمتر شدن شتاب قائم از مقدار ۰/۸ می‌باشد.

شکل ۱۰ بیانگر کاهش قابل توجه شتاب قائم در صورت استفاده از تغییرات غیرخطی در لبه آسفالت منحنی کلوتوئید-کلوتوئید می‌باشد. هرچند برای سرعت‌های کم، تیپ‌های دارای تغییرات غیرخطی کمتر پاسخگوی حد آستانه تحمل انسان (شتاب قائم ۰/۸ متر بر مجذور ثانیه) می‌باشد. ولی برای سرعت‌های بیشتر، حتی تغییرات خطی در فاصله بیشتر از ۵۰ متر (مقدار به کار رفته در تیپ ۵) مورد نیاز خواهد بود. برای راه‌های دوخطه دوطرفه حتی برای بیشترین سرعت‌های طراحی،

جدول ۶. مقدار لازم برای ایجاد تغییرات غیرخطی درجه سه در محل اتصال دو کلوتوئید

سرعت	راه دوخطه دوطرفه	راه چهارخطه	سرعت	راه دوخطه دوطرفه	راه چهارخطه
۲۰	۰	۱۰	۸۰	۳۰	۳۵
۳۰	۱۰	۱۰	۹۰	۳۵	۴۵
۴۰	۱۰	۱۵	۱۰۰	۴۰	۵۰
۵۰	۲۰	۲۰	۱۱۰	۴۰	۵۵
۶۰	۲۰	۲۵	۱۲۰	۴۵	>۶۰
۷۰	۲۵	۳۰	۱۳۰	۵۰	>۶۰

۳- استفاده از تغییرات غیرخطی سهمی در محل شروع کلوئوئید اول و یا پایان کلوئوئید دوم در یک فاصله کوتاه حداکثر ۱۰ متری برای دستیابی به اعداد کمتر از ۰/۸ متر بر مجذور ثانیه برای شتاب قائم، کفایت می‌نماید. این مهم با مطالعه جداول ۴ و ۵ و بررسی اعداد ستون تیپ ۱ قابل مشاهده می‌باشد. در این ستون، حتی برای سرعت‌های خیلی زیاد نیز شتاب کمتر از ۰/۸ متر بر مجذور ثانیه به دست آمد.

۴- در محل اتصال دو کلوئوئید و بسته به مقدار شیب لبه آسفالت توصیه کتاب سبز اشتو، ایجاد تغییرات غیرخطی درجه سه در طولی معادل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ یا بیشتر مورد نیاز خواهد بود. در این محدوده‌ها نیز استفاده از روش تغییرات غیرخطی موجب کاهش شتاب قائم تا کمتر شدن از آستانه شروع ناراحتی می‌گردد. همان گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، با افزایش سرعت و افزایش خط، این مقادیر افزایش می‌یابند.

۵. مطالعات آتی

بررسی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل به کار رفته در این تحقیق، شتاب قائم خودرو در محل شروع کلوئوئید اول و پایان کلوئوئید دوم را به یک میزان محاسبه می‌کند (مانند آنچه در شکل ۸ آورده شده است). به نظر می‌رسد که انجام مطالعات بیشتر با مدل‌های پیچیده‌تر جهت اطمینان از صحت این امر بسیار قابل توصیه باشد. با توجه به استفاده از مدل‌سازی سیستم تعلیق دو درجه آزادی در این تحقیق و از سویی دستیابی به اعداد نزدیک‌تر به واقعیت در صورت استفاده از روابط پیچیده‌تر، استفاده از مدل‌های دارای درجه آزادی بیشتر مثل مدل نصف خودرو با چهار درجه آزادی برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد. به ویژه اینکه استفاده از مدل یاد شده امکان مطالعه پدیده کله‌زنی را نیز فراهم آورده و از این منظر وجود تفاوت یافته‌های تحلیلی در ابتدای کلوئوئید اول و انتهای کلوئوئید دوم مورد انتظار خواهد بود.

برای نمونه، برای سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت در راه دوخطه دوطرفه تیپ ۱ و تیپ ۲ تغییرات لبه آسفالت به ترتیب شتاب قائم ۱/۱۶ و ۰/۶۹ متر بر مجذور ثانیه را دارد که دومی کمتر از ۰/۸ بوده و قابل قبول می‌باشد. بنابراین، تیپ ۲ که دارای ۲۰ متر تغییرات غیرخطی است انتخاب می‌گردد. برای همین سرعت در راه چهارخطه برای تیپ‌های ۲ و ۳ به ترتیب اعداد ۰/۹۲ و ۰/۶۳ برای شتاب قائم به دست می‌آید که اولی دارای ۲۰ متر تغییرات غیرخطی و دومی دارای ۳۰ متر تغییرات غیرخطی می‌باشد. ولی تیپ ۲ علی‌رغم پاسخگو نبودن، فاصله کمی تا مقدار ۰/۸ دارد. بنابراین، می‌توان به جای انتخاب عدد ۳۰ متر برای ایجاد تغییرات غیرخطی لبه آسفالت، از مقدار ۲۵ متر استفاده نمود.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل و بر اساس نکات بیان شده در این بخش، اهم یافته‌های تحقیق در خصوص مسیرهای کلوئوئید-کلوئوئید به شرح زیر می‌باشد:

۱- استفاده از روش خطی تغییرات لبه آسفالت (روش موجود) منجر به ایجاد شتاب قائم بیشتر از آستانه شروع ناراحتی انسان می‌گردد (هر چند وجود شتاب قائم زیاد در صورت استفاده از این الگو بدیهی به نظر می‌رسد، ولیکن به منظور مطالعه کمی بهتر یافته‌های تحقیق می‌تواند مورد توجه باشد). این مقدار برای سرعت‌های بیشتر حتی ممکن است بیش از ۲۰۰ درصد بیشتر از حد شروع آستانه ناراحتی باشد (مقایسه مقدار ۲/۶۲ برای سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت و مقدار ۰/۸).

۲- شتاب قائم در محل اتصال دو کلوئوئید بیشتر از شروع کلوئوئید اول و یا پایان کلوئوئید دوم بوده و توجه بیشتری را متوجه خود می‌نماید. روش به کار رفته در تحقیق برای ابتدای کلوئوئید اول و انتهای کلوئوئید دوم نتایج مشابه را داشته که در صورت به کارگیری سیستم‌های پیچیده‌تر امکان نتایج متفاوت می‌توانست متصور باشد که در بخش ۵ به آن پرداخته شد.

۶. مراجع

قربانیان، ح.، جمشیدی، ا. و آشوری، م. ر. ۱۳۹۰. "تحلیل دینامیکی اثرات سرعت گیر و سرعت گاه ها روی آسایش سرنشینان خودروی پراید با مدل یک چهارم خودرو و بهینه سازی شکل سرعت گیر و سرعت گاه". مهندسی مکانیک و ارتعاشات، ۲(۲): ۶۵-۷۹.

Abdi Kordani, A., Mehrara Molan, A. and Monajjem, S. 2014. "New formulas of side friction factor based on three-dimensional model in horizontal curves for various vehicles". T&DI Congress 2014: Planes, Trains, and Automobiles.

Abdulhafedh, A. 2019. "Design of superelevation of highway curves: An overview and distribution methods". J. City Devel., 1(1): 35-40.

Al-Ashmori, M. and Wang, X. 2020. "A systematic literature review of various control techniques for active seat suspension systems". Appl. Sci., 10(3): 1148.

Awadallah, F. 2005. "Theoretical analysis for horizontal curves based on actual discomfort speed". J. Transport. Eng., 131(11): 843-850.

Brown, A. and Brennan, S. 2014. "On the required complexity of vehicle dynamic models for use in simulation-based highway design". J. Safety Res., 49: 105-112.

Choudhari, T. and Maji, A. 2019. "Socio-demographic and experience factors affecting drivers' runoff risk along horizontal curves of two-lane rural highway". J. Safety Res., 71: 1-11.

Durth, W. and Lippold, C. 1995. "Entwurf der neuen richtlinien fuer die anlage von strassen-teil: Linienfuehrung (RAS-L 1994)". Straße Und Autobahn, 46(2).

Easa, S. M. and Mehmood, A. 2008. "Optimizing design of highway horizontal alignments: New substantive safety approach". Comput-Aided Civ. Infrastruct. Eng., 23(7): 560-573.

Gillespie, T. D. 1992. "Fundamentals of vehicle dynamics: Society of automotive engineers". Warrendale, PA. Harwood, D. W., Council, F., Hauer, E., Hughes, W. and Vogt, A. 2000. "Prediction of the expected safety performance of rural two-lane highways". Publication No. FHWA-RD-99-207.

Hong, H. S. 2014. "Review of maximum superelevation utilized in current method provided in highway design". The University of Texas at San Antonio.

HSM. 2010. "Highway safety manual". First Edition, AASHTO, 1057 p.

Karyawan, I. D. M. A., Widianty, D. and Sideman, I. A. O. S. 2017. "Analisis Kelandaian Melintang sebagai Elemen Geometrik pada Beberapa Tikungan Ruas Jalan Mataram-Lembar". Spektrum Sipil, 2(1): 12-21.

Kobryń, A. 2017. "Transition curves for highway geometric design". Springer.

Lee, J. Y., Lee, J. D., Bärgerman, J., Lee, J. and Reimer, B. 2018. "How safe is tuning a radio?: using the radio tuning task as a benchmark for distracted driving". Accident Anal. Preven., 110: 29-37.

Lin, Y. and Niu, J. 2011. "Effect of highway horizontal alignment on driver decision behavior on trajectory path". ICTE, 2011: 2683-2688.

Marchionna, A. and Perco, P. 2007. "A proposal to update the clothoid parameter limiting criteria of the Italian standard". International Societa Italiana Infrastructure Viarie Congress.

Marjanen, Y. 2010. "Validation and improvement of the ISO 2631-1(1997) standard method for evaluating discomfort from whole-body vibration in a multi-axis environment". PhD Thesis, Loughborough University. <https://hdl.handle.net/2134/6250>

Monajem, S. 2012. "Highway engineering design and traffic". 6th ed., Tehran.

Mustakim, A., Yosomulyono, S. and Juniardi, F. 2017. "Evaluasi kelayakan geometrik jalan pada ruas jalan raya singkawang-bengkayang". Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Tanjungpura, 6(3).

AASHTO. 2018. "A policy on geometric design of highways and streets" 7th Edition..

Othman, S., Thomson, R. and Lannér, G. 2012. "Using naturalistic field operational test data to identify horizontal curves". J. Transport. Eng., 138(9): 1151-1160.

Shao, Y. M. and Xu, J. 2016. "Effects of geometric features of highway horizontal alignment on steering behavior of passenger car". J. Vibroeng., 18(6): 4086-4104.

Torbic, D. J., O'Laughlin, M. K., Harwood, D. W., Bauer, K. M., Bokenkroger, C. D., Lucas, L. M., . . . , Brown, A. and Varunjikar, T. 2014. "Superelevation criteria for sharp horizontal curves on steep grades". NCHRP Report 774.

Türkay, S. and Akçay, H. 2005. "A study of random vibration characteristics of the quarter-car model". J. Sound Vib., 282(1-2): 111-124.

Van Petegem, J. H. and Wegman, F. 2014. "Analyzing road design risk factors for run-off-road crashes in the Netherlands with crash prediction models". J. Safety Res., 49: 121-127.

- Zegeer, C., Stewart, R., Reinfurt, D., Council, F., Neuman, T., Hamilton, E., Miller, T. and Hunter, W. 1991a. "Cost-effective geometric improvements for safety upgrading of horizontal curves". FHWA/RD-90-021, 237 p.
- Zegeer, C. V., Stewart, J. R., Council, F. M. and Reinfurt, D. W. 1991b. "Safety effects of geometric improvements on horizontal curves". UNC/HSRC-91-8-3, 32 p.

