

# مطالعه‌ای بر آثار متقابل دینامیک دوچرخه و دوچرخه‌سوار

احسان کریم‌زاده<sup>۱</sup>، مسعود مسیح‌طهرانی<sup>۲</sup>

۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲ استادیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، masih@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳

## چکیده

در این مقاله مطالعه‌ای بر طراحی دوچرخه‌های مختلف با در نظر گرفتن آثار حضور راننده صورت گرفته است. بدن دوچرخه‌سوار علاوه بر ایجاد حرکت از طریق پدال‌زدن، تأثیر بسزایی بر دینامیک دوچرخه نیز دارد؛ یکی از عوامل اصلی برهم خوردن تعادل نیز، بدن شخص دوچرخه‌سوار است. آثار مشابهی نیز از دوچرخه به بدن انسان منتقل می‌شود که بر راحتی و حتی سلامتی فرد تأثیر می‌گذارد. این آثار در مطالعات و پژوهش‌های فروانی مورد بررسی قرار گرفته است، اما فاکتورهای مهمی وجود دارد که در حال حاضر به‌طور جدی مطالعه‌ای روی آنها انجام نشده است. در این مقاله مهم‌ترین آثار دوچرخه و دوچرخه‌سوار بر تعادل، پایداری و دیگر مشخصه‌های حرکتی بررسی شده است. برای این منظور لازم است مدل‌های دینامیکی دوچرخه و بدن دوچرخه‌سوار تهیه شده و سپس با بررسی نیروهای بین بدن، دوچرخه و زمین، مطالعه‌ای جامع بر دینامیک بدن انسان حین راندن دوچرخه صورت پذیرد. تعادل و پایداری حرکت دوچرخه تا زمانی که دوچرخه تغییر زاویه فرمان ندهد و همزمان مرکز ثقل دقیقاً بالای چرخ‌ها قرار گیرد برقرار است، اما آثار مختلفی چون اثر ژيروسکوپ، تریل و موقعیت مرکز جرم، شتاب‌گیری و ترمزگیری بر تعادل و پایداری حرکت دوچرخه و در پی آن بر دوچرخه‌سوار تأثیر می‌گذارند که در این مقاله به بررسی این آثار پرداخته شده است.

## واژگان کلیدی

دینامیک دوچرخه، دینامیک دوچرخه‌سوار، هندسه دوچرخه، مدل‌سازی بدن انسان

### ۱. مقدمه

دیگر وسائل نقلیه مشکل بزرگی است. مانورپذیری ضعیف، یادگیری کار با دوچرخه را دشوار می‌کند و حتی می‌تواند منجر به

دوچرخه یکی از مهم‌ترین وسائل نقلیه به‌شمار می‌رود. اینکه چگونه یک دوچرخه در مسیر مورد نظر کنترل شود، مانند کنترل

تصادفات خطرناک شود. انواع مختلف دوچرخه‌ها کیفیت هندلینگ<sup>۱</sup> متفاوتی دارند که پارامترهای فیزیکی دوچرخه و دوچرخه‌سوار تعیین‌کننده کیفیت هندلینگ دوچرخه است. معمولاً کیفیت هندلینگ یک دوچرخه را از طریق نسبت‌دادن خصوصیات دینامیکی دوچرخه و دوچرخه‌سوار بررسی می‌کنند، اما برخی اطلاعات درباره کیفیت هندلینگ می‌تواند تنها از خصوصیات دینامیکی دوچرخه استخراج شود [۱].

طی ۱۵۰ سال اخیر، محققان بسیاری مدل‌های دینامیکی با فرض صلب‌بودن دوچرخه‌سوار ارائه داده‌اند و این وسیله مدت‌هاست به‌عنوان وسیله‌ای خودمتعاد<sup>۲</sup> شناخته می‌شود [۲]. این تعادل از دو روش آزمایشگاهی [۳] و مدل‌سازی‌های پیشرفته دینامیکی اثبات شده است. یک دوچرخه معمولی برای گستره سرعت‌های مختلف متعادل است. این گستره را می‌توان از محاسبه مقادیر ویژه قسمت حقیقی معادلات دینامیکی، زمانی که معادلات دینامیکی در سرعتی ثابت و وضعیت عمود بر زمین دوچرخه خطی‌سازی شده‌اند، به‌دست آورد. این گستره سرعت به پارامترهای فیزیکی متنوعی چون هندسه، موقعیت مرکز جرم و توزیع جرم بستگی دارد. ممکن است از لحاظ علمی تعادل دوچرخه به‌معنای خوش‌فرمانی آن نباشد، اما زمانی که کنترلر یا سوار<sup>۳</sup> به اندازه کافی برای تعادل و کنترل دوچرخه حرفه‌ای نیستند مانند کسی که در حال آموزش دوچرخه‌سواری است یا کسی که در شرایط غیر عادی دوچرخه را هدایت می‌کند، تعاد اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند. یک فرد تازه‌کار که با سرعت کم دوچرخه‌سواری می‌کند، همان شرایطی از تعادل را تجربه می‌کند که یک فرد عادی با گستره وسیعی از سرعت‌ها در آن شرایط قرار می‌گیرد.

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که چگونه تغییر دادن پارامترها به‌سمت مقادیر ایده‌آل می‌تواند بر گستره سرعتی که یک دوچرخه کنترل‌نشده در آن متعادل است تغییر ایجاد کند [۴]. به‌عنوان مثال نشان داده شده است که افزایش ممان اینرسی چرخ جلو می‌تواند سرعت تعادل دوچرخه را کاهش دهد، اما متناسب با این تغییر پارامتر، جرم چرخ جلو نیز مطابقاً افزایش می‌یابد که برای طراحی مدل محدودیت ایجاد خواهد کرد. وقتی بحث طراحی و تولید یک دوچرخه پیش می‌آید، هر کدام از پارامترهای فیزیکی را دیگر نمی‌توان مستقل از دیگر پارامترها تغییر داد. مناسب‌ترین روش

این است که گستره تغییرات سرعت دوچرخه متعادل زمانی که پارامترهای دینامیکی تنظیم می‌شوند، پیش‌بینی کرد.

دوچرخه وسیله نقلیه‌ای است که نیروی محرکه آن توسط قدرت انسان تأمین می‌شود. از لحاظ هندسه ظاهری، این وسیله محوری طولی دارد؛ در دو طرف این محور چرخ‌های جلو و عقب قرار دارند. واژه دوچرخه نخستین بار در سال ۱۸۴۷ م در فرانسه و برای نام‌گذاری نوعی کالسکه دوچرخ استفاده شد. روزنامه دیلی نیوز<sup>۴</sup> نیز در سال ۱۸۶۸ م برای شرح وسائل دو و سه‌چرخ شرکت‌کننده در یک رویداد ورزشی از این کلمه استفاده کرد [۵]. دوچرخه نخستین بار در قرن ۱۹ م معرفی شد و طبق آمار در سال ۲۰۰۳ م، بیش از یک میلیارد دوچرخه؛ یعنی دو برابر تعداد اتومبیل‌ها در سراسر جهان تولید شده است [۶]. دوچرخه‌ها در برخی از مناطق همچنان اصلی‌ترین وسیله حمل‌ونقل به‌شمار می‌آیند. از دوچرخه به‌عنوان اسباب‌بازی کودکان، وسیله ورزشی، ابزار پلیس و حتی مقاصد نظامی می‌توان استفاده کرد. اختراع دوچرخه تأثیر حیرت‌انگیزی بر فرهنگ و توسعه صنعت مدرن و مسائل نقلیه ایجاد کرده است. قطعاتی چون یاتاقان‌ها، تایرهای بادی و پرک‌های چرخ، که نقش مهمی در خودروها ایفا می‌کنند، پیشتر برای استفاده در دوچرخه‌ها ساخته شدند. نخستین دوچرخه تاریخ با نام دندی هورس<sup>۵</sup> در سال ۱۸۱۷ م در آلمان رونمایی شد. بعد از آن مک‌میلان<sup>۶</sup> اسکاتلندی در سال ۱۸۳۹ م نمونه کامل‌تری از آنچه وجود داشت را ارائه کرد. بعدها در سال ۱۸۶۰ م، دو مهندس فرانسوی به نام‌های میچاکس<sup>۷</sup> و لالمنت<sup>۸</sup> طرحی شبیه به طرح امروزی دوچرخه را ارائه کردند. آنها توانستند برای اولین بار با افزودن پدال به چرخ جلوی دوچرخه، از نیروی پای دوچرخه‌سوار به‌عنوان نیروی محرک آن استفاده کنند [۷]. در شکل ۱ دوچرخه دندی هورس نمایش داده شده است.



شکل ۱. دوچرخه دندی هورس [۷]

توماس مک‌کال<sup>۹</sup>، مهندس اتریشی، در سال ۱۸۶۹ م با جابه‌جا کردن پدال به چرخ عقب، به این نتیجه رسید که انتقال قدرت باید به چرخ عقب وارد شود تا دوچرخه‌اش سریع‌تر حرکت کند. در همان دوره، فرد دیگری در پاریس پرک‌های سیمی را جایگزین میله‌های سنگین قدیمی کرد [۸]. در سال ۱۸۸۵ م، کارخانه‌ی استرلی روور<sup>۱۰</sup> با اتصال پدال و چرخ عقب به کمک زنجیر، طرح دوچرخه‌های مدرن را به تولید انبوه رساند. آنها همچنین با سبک کردن فریم، پایین آوردن زین و کوچک کردن چرخ‌ها امنیت بیشتری را برای دوچرخه‌سوار فراهم کردند [۹].

سال ۱۸۹۰ م به دلیل نوآوری‌های متعدد در زمینه راحتی و فرمان‌گیری دوره‌ای طلایی در صنعت دوچرخه‌سازی به حساب می‌آید [۱۰]. علاوه بر مسأله اصول حرکتی دوچرخه، بدن دوچرخه‌سوار نیز به دلیل کنش و واکنش با دوچرخه، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در برخی از موارد استفاده مانند مسابقات تور<sup>۱۱</sup>، زمان زیادی که دوچرخه‌سوار مشغول رکاب‌زدن است ذهن ما را درگیر می‌کند که طراحی این وسیله چگونه بر راحتی، ایمنی و ذخیره انرژی دوچرخه‌سوار تأثیر می‌گذارد.

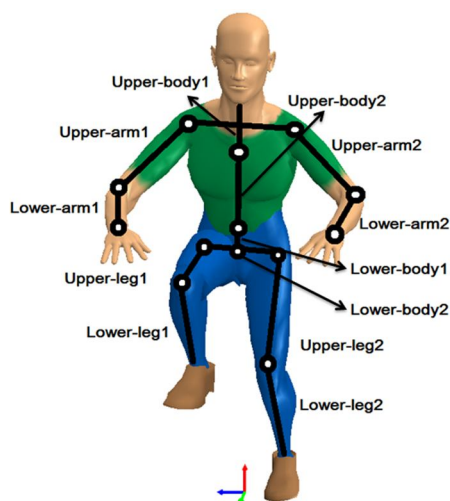
## ۲. بررسی وضعیت کلی دوچرخه‌سوار

پتانسیل وسایل نقلیه‌ای که محرک آنها نیروی انسان است، بیشتر از ۳۰۰ سال پیش مورد توجه قرار گرفت. این گونه خودروهایی که به وسیله انسان حرکت می‌کنند در مقایسه با خودروهایی که توسط اسب، نیروی باد یا نیروی بخار حرکت می‌کنند منبع انرژی قابل استفاده دیگری دارند که نیروی انسان است. گذشته از وسائلی که توسط چهارپایان رانده می‌شد، نخستین گام در طراحی خودروهایی دیگر، ایجاد یک محور فرمان‌پذیر به وسیله اهرم‌ها و مفاصل بود، اما این نسل از خودروها نسبت به نسل‌های بعدی که تنها روی دو چرخ حرکت می‌کردند، بسیار بدقلق بودند. در قدیمی‌ترین مدل‌های دوچرخه و موتورسیکلت، راننده تنها به‌عنوان یک جسم صلب با جرم مشخص که متصل به قاب عقب وسیله است در نظر گرفته شده است [۱۱-۱۲]. در منابع [۱۳] و [۱۴] پایین‌تنه دوچرخه‌سوار به‌عنوان جرمی ساکن و متصل به فریم عقب در نظر گرفته شده است، در حالی که بالاتنه همانند یک پاندول واژگون که توسط فنر و دمپر مقید شده و تنها یک درجه آزادی رول دارد مدلسازی شده است. مدلسازی شامل ۱۲ درجه آزادی برای دو نوع راننده است. نوع اول راننده‌ای است با قابلیت دوران بالاتنه در

حالی که در نوع دوم پایین‌تنه می‌تواند حرکت عرضی نسبت به فریم اصلی داشته باشد که هر دو نوع مدل توسط فنر و دمپرهای خطی به موقعیت‌های اصلی خود قابل بازگشت می‌باشند. شکل ۲ مدلسازی مذکور را نمایش می‌دهد [۱۵].

پارامترهای سیستم از طریق آزمایش و اطلاعات دوچرخه‌سوار از طریق آزمایش پاسخ‌های فرکانسی ارتعاشات ناشی از رول دوچرخه در اجزای مختلف بدن انسان به دست می‌آید. فرکانس و ضریب میرایی دمپر در مودهای ارتعاش با فرکانس بالا<sup>۱۲</sup> (ارتعاش سریع چرخ جلو) و ارتعاش موجی<sup>۱۳</sup> (حرکت موجی دوچرخه) در سرعت‌های مختلف محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی روی اندازه‌های مختلف دوچرخه‌ها مقایسه می‌شود. نشان داده می‌شود که ویژگی‌های ارتعاشی راننده بر مودهای ارتعاش با فرکانس بالا و ارتعاش موجی سیستم اثرگذار است. پارامترهای بالاتنه فرد بیشتر بر مود ارتعاش موجی تأثیرگذار است، در حالی که پارامترهای پایین‌تنه بر مود ارتعاش با فرکانس بالا تأثیر می‌گذارد. تأثیر پارامترهای فردی دوچرخه‌سوار به‌عنوان یک کنترلر فعال، در منبع [۱۶] مطالعه شده است. در این منبع نتیجه گرفته شده است که حرکات غیرعمد دوچرخه‌سوار می‌تواند آثار مهمی بر رفتار دوچرخه داشته‌باشد. تمرکز منبع [۱۶] بر این است که راننده را به‌عنوان یک متعادل‌کننده فیدبک در نظر گرفت که خطاهای زاویه رول دوچرخه را با فرمان‌گیری مناسب تنظیم کند. مشخصات یک کنترلر الکتریکی باید به گونه‌ای از رفتارهای عصبی راننده به‌عنوان کنترلر تقلید کند. راننده در اینجا به گونه‌ای مدلسازی می‌شود که توانایی کنترل رول بالاتنه خود را همزمان با کنترل گشتاور فرمان داشته‌باشد. مدل راننده‌ای که در منبع [۱۵] استفاده شد، در منبع [۱۷] نیز استفاده می‌شود تا به آن دسته از جنبه‌های کنترلی راننده دست یافت که بیشترین تأثیر را در رفتار مانورپذیری دوچرخه در حرکت سینگل لین‌چنج (لایه کشیدن یا تغییر خط در جاده) می‌گذارد. در این مورد، مدلسازی راننده، جرم‌های بالاتنه و پایین‌تنه که هر دو نسبت به رول بدنه دوچرخه آزادانه حرکت می‌کنند را مقایسه می‌کند. فرض شده است که دوچرخه‌سوار سه گشتاور کنترلی از سیستم فرمان به بالاتنه خود، از بالاتنه به پایین‌تنه خود و از پایین‌تنه به فریم عقب دوچرخه وارد می‌کند. در این مدلسازی، انسان به‌عنوان یک کنترلر حساس به فیدبک که وظیفه ماندن در مسیری معین دارد را به‌خوبی عمل می‌کند. نتایج مقایسه بر اهمیت ماهیت کنترلی گشتاور فرمان تأکید می‌کند. این

عضو صلب شامل دو عضو بالاتنه و دو عضو پایین‌تنه، قسمت بالایی و پایینی دست‌ها و بالایی و پایینی پاها مدل می‌کند. جرم و ممان اینرسی هر عضو طبق جدول ۱ مشخص شده است. این اعضاء توسط مفاصلی که اطلاعات آنها در جدول ۲ آورده شده است با درجات آزادی متفاوت به یکدیگر و قاب‌های اصلی دوچرخه متصل می‌شوند.



شکل ۳. مدل‌سازی بدن دوچرخه‌سوار متشکل از ۱۲ اهرم صلب. این شکل با نرم‌افزار 3dsspp کشیده شده است [۱۹]

در حالی است که امکان کنترل دوچرخه با مایل کردن پایین‌تنه دوچرخه‌سوار نیز وجود دارد که مستلزم گشتاورهای بزرگتری است. معمولاً کنترل پایین‌تنه برای کمک به کنترل گشتاور فرمان‌گیری به کار می‌رود، در حالی که کنترل بالاتنه تنها به منظور ایجاد موقعیت عمودی مناسب انجام می‌شود. در منبع [۱۸] طبق شکل ۳ مدل‌سازی پیچیده‌ای از دوچرخه‌سوار، بدن را مجموعه‌ای از ۱۲



شکل ۲. مدل‌سازی بدن دوچرخه‌سوار به صورت مجموعه‌ای از ۲ جرم صلب با عناوین بالاتنه و پایین‌تنه. این شکل با نرم‌افزار 3dsspp کشیده شده است

جدول ۱. جرم، مرکز جرم و ممان اینرسی (نسبت به مبدأ مختصات محل تماس چرخ عقب و زمین) ۱۲ عضو اصلی مدل‌سازی منبع [۷]

نام عضو	جرم (کیلوگرم)	مرکز جرم (X,Y,Z) (متر)	اینرسی ( $I_x, I_y, I_z$ ) (کیلوگرم متر مربع)
بالاتنه ۱	۱۳/۸	(-0.139,0,0.122)	(0.794,1,2.44)
بالاتنه ۲	۰/۰۱	(-0.2,0,0.82)	(0.001,0.001,0.001)
پایین‌تنه ۱	۲۰/۵	(-0.2,0,0.95)	(2.45,1,0.5)
پایین‌تنه ۲	۰/۰۱	(-0.25,0,0.8)	(0.001,0.001,0.001)
بازوی چپ	۱/۷	(-0.1,0.28,1.14)	(0.001,0.001,0.001)
بازوی راست	۱/۷	(-0.1,-0.28,0.14)	(0.001,0.001,0.001)
ساعد چپ	۱	(0.1,0.35,1.03)	(0.001,0.001,0.001)
ساعد راست	۱	(0.1,-0.35,1.03)	(0.001,0.001,0.001)
ران چپ	۵/۹۸	(-0.125,0.17,0.75)	(0.001,0.001,0.001)
ران راست	۵/۹۸	(-0.125,-0.17,0.75)	(0.001,0.001,0.001)
ساق چپ	۲/۴	(-0.075,0.25,0.525)	(0.001,0.001,0.001)
ساق راست	۲/۴	(-0.075,-0.25,0.525)	(0.001,0.001,0.001)

جدول ۲. مفاصل بین اهرم‌های مدلسازی شده، نوع مفاصل و اطلاعات فنر و دمپر معادل‌سازی شده با اعضاء

نام عضو	اعضای متصل شده به مفصل	نوع مفصل	سختی فنر (نیوتن بر رادیان)	میرایی دمپر (نیوتن بر رادیان)
آرنج چپ	بازو و ساعد چپ	R	-	-
آرنج راست	بازو و ساعد راست	R	-	-
مچ دست چپ	ساعد چپ - فرمان	R-R	-	-
مچ دست راست	ساعد راست - فرمان	R-R	-	-
کتف راست	بازوی راست - بالاتنه ۱	S	-	-
کتف چپ	بازوی چپ - بالاتنه ۱	S	-	-
ستون فقرات ۱	بالاتنه ۱ - بالاتنه ۲	R	۱۰۰۰	۵۰۰
ستون فقرات ۲	بالاتنه ۲ - پایین تنه ۱	R	۱۰۰۰	۱۰۰
ستون فقرات ۳	پایین تنه ۱ - پایین تنه ۲	R	۱۰۰	۵۰
لگن	پایین تنه ۲ - زین	P(yz)	۵۰۰۰	۱۰۰
مفصل ران چپ	پایین تنه ۲ - ران چپ	R	۵۰۰	۱۰
مفصل ران راست	پایین تنه ۲ - ران راست	R	۵۰۰	۱۰
زانو چپ	ران و ساق چپ	S	-	-
زانو راست	ران و ساق راست	S	-	-
مچ پای چپ	ساق و رکاب چپ	S	-	-
مچ پای راست	ساق و رکاب راست	S	-	-

R مفصل لولایی

S مفصل کروی

P مفصل صفحه‌ای

R-R مفصل دولولایی

### ۳. حرکات دوچرخه‌سوار

در یک سیکل عادی دوچرخه‌سواری، معمولاً حرکات دوچرخه‌سوار به چهار حرکت اصلی اعم از فرمان‌گیری، لینینگ<sup>۱۴</sup> (کج شدن به طرفین)، لیفتینگ<sup>۱۵</sup> (جایابی عمودی بدن) و رکاب‌زدن قابل تقسیم‌بندی می‌باشد [۱۸]. برای آنکه بتوان مدلسازی دوچرخه‌سوار و حرکات بدنش را بهتر تصور کرد، باید ابتدا کاربری دوچرخه، مدلسازی خود دوچرخه، اهرم‌ها و مفاصل و محور مختصات حاکم بر آن را بیان نمود.

#### ۳-۱. موقعیت دوچرخه‌سوار در سیکل‌های مختلف

در دوچرخه‌سواری جاده‌ای و هنگام شتاب گرفتن، دوچرخه‌سوار مانند شکل ۴ روی دوچرخه می‌نشیند. در این حالت بالاتنه و پایین تنه دوچرخه‌سوار زاویه‌ای نزدیک به ۹۰ درجه نسبت به هم دارند تا بدن دوچرخه‌سوار علاوه بر اینکه متحمل فشار زیادی نمی‌شود، ضریب اثرودینامیکی قابل قبولی نیز ایجاد می‌کند [۲۰].

حال اگر دوچرخه‌سوار بخواهد انرژی خود را بازیابی کند و در حال حرکت استراحت کند، طبق شکل ۵ بالاتنه و دستان خود را جابه‌جا می‌کند. در دوچرخه‌سواری کراس<sup>۱۶</sup>، دوچرخه‌سوار ملزم به تولید ضریب درگ بسیار کم است؛ لذا طبق شکل ۶ تا حد زیادی بالاتنه و سر خود را به بدنه دوچرخه نزدیک می‌کند و دست‌های خود را از آرنج روی فرمان دوچرخه قرار می‌دهد. در این حالت بیشترین فشار کاری روی عضلات ران و ساق پای دوچرخه‌سوار قرار می‌گیرد. در این نوع دوچرخه‌سواری نیاز به انجام مانورهای شدید وجود ندارد. در دوچرخه‌سواری کوهستان و فیتنس<sup>۱۷</sup>، دوچرخه‌سوار بالاتنه خود را مانند شکل ۷ با زاویه بیشتر از ۹۰ درجه نسبت به پایین تنه نگه می‌دارد تا حین تقسیم فشار بین پاها و شکم و کمر، دوچرخه‌سوار تعادل خود را طی مانورهای مختلف حفظ نماید [۲۰].

#### ۴. کاربری دوچرخه

##### ۴-۱. دوچرخه کراس

دوچرخه‌های کراس، که در پیست‌ها به‌منظور رسیدن به حداکثر سرعت طولی طراحی می‌شوند، اغلب فرمان‌های خاصی دارند که موقعیت دوچرخه‌سوار را طوری تنظیم کنند تا نیروی درگ کمتری تولید شود. طبق استاندارد، عرض این فرمان نباید از ۲۰ سانتی‌متر

بیشتر باشد. تایرهای بادی به‌دلیل امکان تولید نیروی رانش بیشتر در فشار کم و بدون صدمه دیدن رینگ و تایر، پرفرمدارترین نوع تایر در این کلاس دوچرخه‌ها است [۲۲]. این دوچرخه‌ها به‌دلیل استفاده از تنها یک چرخ‌زنجیر، تک‌سرعت هستند [۲۳].



شکل ۵. دوچرخه‌سواری جاده‌ای در حالت استراحت [۲۱]



شکل ۴. دوچرخه‌سواری جاده‌ای در حالت شتاب‌گیری [۲۱]



شکل ۷. دوچرخه‌سواری فیتنس-کوهستان [۲۱]



شکل ۶. دوچرخه‌سواری کراس [۲۱]

##### ۴-۳. دوچرخه تناسب اندام و کوهستان

دوچرخه‌های کوهستان و فیتنس از لحاظ تجهیزات و طراحی مهندسی شبیه به یکدیگرند با این تفاوت که دوچرخه‌های کوهستان به‌دلیل وجود موانع بزرگ و در بعضی موارد نوک تیز، نیازمند تعلیق قدرتمند و تایرهای مقاوم هستند. اغلب این دوچرخه‌ها دارای فرمان رایزر<sup>۲۰</sup>، بدنه‌های بسیار سبک و مستحکم، سیستم انتقال قدرت با نسبت دنده گسترده (گستره زیاد نسبت دنده)، تجهیزات جانبی مانند گلگیر، باربند و چراغ می‌باشند.

##### ۴-۲. دوچرخه جاده‌ای

این دوچرخه‌ها، که در مسافت‌هایی طولانی مانند قاره‌پیمایی استفاده می‌شوند، بیشترین حساسیت را در زمینه راحتی، خستگی و قابلیت حمل تجهیزات دوچرخه‌سوار دارند. دوچرخه‌هایی با فرمان‌های دراپ<sup>۱۸</sup>، طول ویل بیس<sup>۱۹</sup> زیاد (راحتی بیشتر و عدم برخورد پدال با کیف حمل تجهیزات)، بدنه انعطاف‌پذیر (به‌منظور راحتی) و چرخ‌های مخصوص (برای تحمل وزن زیاد) برای این کلاس دوچرخه مناسب‌ترند [۲۴].

#### ۴-۴. دوچرخه برقی

دوچرخه برقی یا همان دوچرخه هیبرید برقی با نیروی انسانی با استفاده از کنترلرهای مناسب و یک موتور کمکی بازدهی مناسب و ایده‌آلی برای مقاصد مختلف دوچرخه‌سواری فراهم می‌کند. در این نوع دوچرخه‌ها محل قرارگیری موتور می‌تواند روی تویی چرخ عقب یا روی پدال طراحی شود [۲۵].

#### ۵. دستگاه مختصات حاکم بر دینامیک دوچرخه

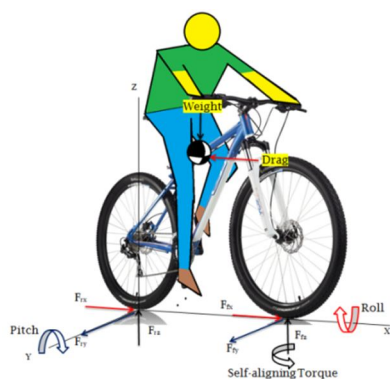
طبق شکل ۸ مبدأ مختصات در محل تماس چرخ عقب دوچرخه و زمین در نظر گرفته می‌شود. محوری که در راستای حرکت مستقیم دوچرخه است  $X$ ، محور عمود بر آن در صفحه افقی  $Y$  و محور عمود بر زمین  $Z$  در نظر گرفته می‌شود. دوچرخه‌ای که در مسیر مستقیم حرکت می‌کند، تنها در جهت  $X$  حرکت و شتاب دارد و نیروهای عرضی در جهت  $Y$  در این نوع حرکت وجود ندارند، مگر در صورت وجود نیروهای اثرودینامیکی جانبی [۲۶]. اگر دوچرخه به میزان  $\phi_b$  حین حرکت حول محور  $X$  دوران کند، مختصات جدید  $x, y$  و  $z$  در حالت جدید تعریف می‌شود. دوران دوچرخه حول محور طولی را رول  $\alpha$  یا غلتش می‌گویند [۲۶].

#### ۵-۱. نیروهای خارجی وارد بر مدل دوچرخه و دوچرخه‌سوار

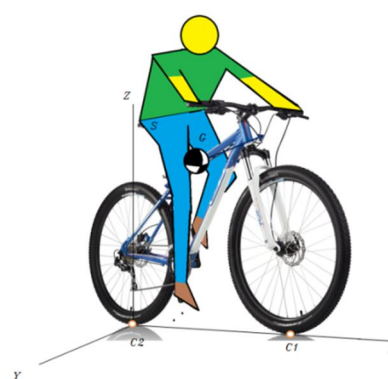
زمانی که دوچرخه‌سوار در حال حرکت با دوچرخه خود در مسیر مستقیم است، علاوه بر نیروهای عکس‌العمل زمین که خلاف نیروی وزن به چرخ‌ها وارد می‌شود، نیروی درگ خلاف جهت حرکت دوچرخه و نیروهای اصطکاکی در سطح تماس چرخ‌ها و زمین نیز به دوچرخه وارد می‌شوند. اگر چرخ جلو به‌منظور فرمان‌گیری سر پیچ پیچیده شود، نیروهای عرضی در جهت چرخش به چرخ‌ها و علاوه بر آن بر اثر رول بدنه یک گشتاور حول محور  $X$  نیز به‌وجود می‌آیند [۲۷]. در صورتی که دوچرخه با شتاب حرکت کند، گشتاور واجهشی حول محور  $Y$  ایجاد می‌شود. شکل ۹ نیروهای خارجی وارد بر مدل دوچرخه و دوچرخه‌سوار را نشان می‌دهد [۱].

#### ۵-۲. نیروهای داخلی میان دوچرخه و دوچرخه‌سوار

در بررسی نیروهای داخلی، به نشیمنگاه و فرمان دوچرخه هر کدام نیروی تکیه‌گاهی، نیروی اصطکاکی و گشتاور ممتوم از طرف دوچرخه‌سوار وارد می‌شود. همچنین نیروی تکیه‌گاهی و اصطکاکی نیز از طریق رکاب‌زدن به چرخ‌دنده اصلی وارد می‌شود.



شکل ۹. نیروهای خارجی وارد بر مدل دوچرخه و دوچرخه‌سوار



شکل ۸. مختصات دینامیکی دوچرخه [۷]



شکل ۱۰. نیروها و گشتاورهای وارد بر دوچرخه از طرف دوچرخه‌سوار [۲۸]

## ۶. دینامیک عرضی

### ۶-۱. تعادل

یک دوچرخه در حال حرکت و مانور در حالی متعادل است که نیروهای عکس‌العمل زمین، تمام نیروهای داخلی و خارجی مانند نیروی جاذبه هنگام لینینگ، نیروی اینرسی هنگام دورزدن، نیروی ژيروسکوپیی<sup>۲۲</sup> هنگام فرمان‌گرفتن وارد را خنثی کنند [۲۹]. خاصیت خودمتعادلی یک دوچرخه حاصل از ترکیب چند اثر متفاوت است که خود این آثار وابسته به هندسه، توزیع جرم و سرعت طولی دوچرخه می‌باشند. تایرها، تعلیق، دمپر فرمان و انعطاف‌پذیری بدنه نیز در این آثار تغییر ایجاد می‌کنند.

### ۶-۲. سرعت طولی

در سرعت‌های بالا، اعمال زاویه فرمان کوچکی سبب جابه‌جاشدن نقطه اتصال چرخ و زمین در جهت عرضی می‌شود؛ در سرعت‌های پایین، برای جابه‌جاشدن نقطه اتصال چرخ و زمین به همان مقدار قبلی نیاز به زاویه فرمان بیشتری وجود دارد. به‌همین دلیل حفظ تعادل دوچرخه در سرعت‌های بالا ساده‌تر است [۳۰].

### ۶-۳. موقعیت مرکز جرم

چون مرکز جرم مدل ترکیبی دوچرخه و دوچرخه‌سوار نزدیک به محور جلوی دوچرخه است، چرخ جلوی دوچرخه ملزم به حرکات کمتری برای حفظ تعادل می‌باشد [۳۱]. این موضوع می‌تواند در طراحی دوچرخه‌هایی با طول ویل بیس زیاد بیشتر مورد توجه قرار گیرد [۳۲]. همچنین در دوچرخه‌های تور به‌دلیل جرم زیاد چرخ عقب، این موضوع می‌تواند مشکل‌زا شود [۳۳]. جرم زیاد چرخ عقب به‌سادگی قابل کنترل است، به شرطی که ارتفاع مرکز جرم محور عقب پایین‌تر از محور جلو باشد [۳۴]. طبق آنچه در فصل‌های قبل نیز گفته شد، مدل دوچرخه را می‌توان مانند یک پاندول معکوس در نظر گرفت. بنابراین متعادل کردن یک دوچرخه با ارتفاع مرکز جرم بلند، ساده‌تر از دوچرخه‌ای با مرکز جرم پایین‌تر است.

### ۶-۴. تریل

در طرح‌های تجاری دوچرخه‌ها با قراردادن محور فرمان پشت محور عمود بر زمین و ایجاد تریل مثبت، فرمان‌دهی چرخ جلو را مستقل از سرعت طولی می‌سازند [۳۱]. این در حالی است که بیش از حد بزرگ بودن تریل مثبت، فرمان‌گیری را سخت می‌کند.

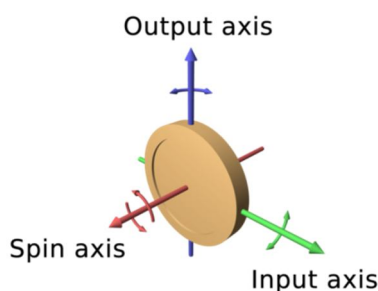
معمولاً دوچرخه‌های جاده‌ای تریل بیشتری نسبت به دوچرخه‌های تور دارند، اما نسبت به دوچرخه‌های کوهستان تریل کوچکتری دارند. دوچرخه‌های با تریل منفی نامتعادل‌تر از دوچرخه‌های با تریل مثبت می‌باشند.

### ۶-۵. ویل بیس

به ازای جابه‌جایی مشخص چرخ جلو، میزان زاویه مسیر دوچرخه از مبدأ مختصات به نسبت عکس طول ویل بیس قابل تغییر است. همچنین به ازای زاویه فرمان و لینینگ مشخص، مقدار شعاع انحنای مسیر به نسبت مستقیم با طول ویل بیس تغییر می‌کند [۳۵].

### ۶-۶. اثر ژيروسکوپیی

نقش اثر ژيروسکوپیی در اغلب دوچرخه‌ها، کمک به فرمان‌گیری چرخ جلو در جهت لینینگ می‌باشد. نرخ تغییرات انحراف از مسیر که طی آن اثر ژيروسکوپیی تولید می‌شود به نسبت عکس سرعت دورانی چرخ تغییر می‌کند. نیروی اصطکاک بین زمین و چرخ مانع از انحراف مسیر چرخ عقب مانند چرخ جلو می‌شود که در نتیجه آن دوچرخه حرکت لینینگ را ادامه می‌دهد [۳۶]. در سرعت طولی کم، انحراف از مسیر بسیار سریع است که تمایل به بیش فرمانی<sup>۳۳</sup> و در نتیجه واژگونی دوچرخه را حاصل می‌شود. در سرعت طولی بالا، انحراف از مسیر کند است و تمایل به کم فرمانی<sup>۳۴</sup> را زیاد می‌کند و دوچرخه بدون اینکه به موقعیت عمودی برسد واژگون می‌شود [۳۴]. شکل ۱۱ اثر ژيروسکوپیی روی چرخ جلوی دوچرخه را نشان می‌دهد. در نتیجه مباحث فوق، دوچرخه‌ای که با سرعت بالا در حرکت است ساده‌تر قابل متعادل شدن است.



شکل ۱۱. اثر ژيروسکوپیی روی چرخ جلوی دوچرخه [۳۴]

### ۶-۷. شتاب طولی

شتاب طولی تأثیرات پیچیده‌ای بر دینامیک عرضی دوچرخه دارد. در حالت کلی شتاب مثبت ویژگی خود متعادلی را از بین می‌برد و شتاب منفی سرعت‌های تعادل خودبه‌خود را تغییر می‌دهد.



## ۶-۸. دور زدن

برای دور زدن در مسیر دلخواه، چرخ جلو باید در جهت مشخصی قرار گیرد. اصطکاک بین چرخ و زمین، شتاب جانب مرکز مورد نظر برای دور زدن را فراهم می‌کند.

## ۶-۹. لینینگ

برخلاف دیگر وسائل نقلیه، دوچرخه هنگام دور زدن باید دارای زاویه لینینگ باشد تا نیروهای اینرسی، جاذبه، اصطکاک و عکس‌العمل زمین بالانس شوند. در منبع [۳۷] نشان داده شده است که برای دور زدن باید نیروهای جاذبه و عکس‌العمل زمین با یکدیگر کوپل شوند.

## ۶-۱۰. فرمان‌گیری معکوس

برای دور زدن در جهتی که دوچرخه در آن جهت زاویه لینینگ دارد، فرمان ابتدا باید در جهت معکوس چرخیده شود. این فرمان‌دهی نیروی عرضی در محل تماس چرخ و زمین به وجود می‌آورد که در نتیجه آن گشتاوری حول محور طولی دوچرخه در جهت زاویه لینینگ ایجاد می‌شود که فرآیند دور زدن را راحت‌تر می‌کند [۳۶].

## ۶-۱۱. دور زدن پایدار

برای آنکه دوچرخه در شعاع انحنای ثابت و سرعت طولی ثابت دور بزند، گشتاور فرمانی نیاز است که به سرعت طولی، هندسه و توزیع جرم دوچرخه بستگی دارد [۳۴].

## ۶-۱۲. فرمان‌گیری بدون دست

در حرکت با دوچرخه‌ها دور زدن در حالت بدون دست نیز امکان‌پذیر است. اگر دوچرخه‌سوار نسبت به دوچرخه به سمتی متمایل شود، بر اثر گشتاور به وجود آمده دوچرخه به سمت دیگر متمایل می‌شود. در این حالت مرکز جرم کلی تقریباً در صفحه عمودی مرکز جرم اولیه قرار می‌گیرد. در نتیجه این حرکت دوچرخه‌سوار دوچرخه در راستای تمایل دوچرخه دور می‌زند [۳۸].

## ۶-۱۳. تایرها

تایرها تأثیر بسزایی بر کیفیت هندلینگ دوچرخه‌ها دارند. تأثیر تایرها بر دینامیک دوچرخه از دو راه صورت می‌گیرد:

۱. زاویه آج: در منبع [۳۹] نشان داده شده است که افزایش زاویه آج چرخ جلوی دوچرخه سبب خنثی‌شدن اثر خودمعدالی و افزایش زاویه آج چرخ عقب تأثیر معکوس چرخ جلو دارد.

۲. تولید نیرو: تأیر علاوه بر نیروی عرضی لازم برای دور زدن، گشتاور بازگرداننده‌ای<sup>۲۵</sup> نیز به‌خاطر تقارن محوری در سطح تماسش با زمین تولید می‌کند. علاوه بر این گشتاور دیگری در عرض سطح تماس چرخ و زمین تولید می‌شود که حاصل از لینینگ تأیر به یک سمت هنگام دور زدن می‌باشد. ترکیب این دو گشتاور متضاد با یکدیگر، در چرخ جلو تولید گشتاور یاو می‌کند.

## ۶-۱۴. مانورپذیری

مانورپذیری و هندلینگ<sup>۲۶</sup> دوچرخه‌ها موضوع پیچیده‌ای است؛ زیرا هندسه دوچرخه به‌ویژه زاویه محور فرمان در آنالیزهای سینماتیکی به‌سادگی قابل بیان نیست [۲]. از طرفی دوچرخه‌ها در هر شرایطی باید تحت کنترل دوچرخه‌سوار باشند، در نتیجه مهارت دوچرخه‌سوار نقش مهمی در عملکرد دوچرخه تحت مانورهای مختلف ایفا می‌کند [۳۵].

## ۶-۱۵. ورودی‌های کنترلی دوچرخه‌سوار

اولین ورودی کنترلی که دوچرخه‌سوار می‌تواند به دوچرخه وارد کند، تغییرات زاویه فرمان از طریق اعمال گشتاور به دسته فرمان است. ورودی کنترلی بعدی تغییرات زاویه لینینگ از طریق متمایل کردن بدن به دوچرخه می‌باشد.

## ۶-۱۶. معادلات حرکت عرضی

اگرچه معادلات حرکت می‌توانند خطی‌سازی شوند، اما دوچرخه دارای سیستم غیرخطی است [۴۰]. همچنین متغیرها را نیز نمی‌توان در قالب معادلات خطی از اجزای مستقل نوشت. عموماً معادلات غیرخطی غیرقابل حل و نامفهوم هستند. از طرفی دوچرخه یک سیستم غیر هولونومیک است؛ زیرا خروجی‌های آن تابع مسیر می‌باشند.

## ۷. دینامیک طولی

در شتاب‌گیری و ترمزگیری، انتقال بار بین محور جلو و عقب اتفاق می‌افتد. این انتقال بار در شتاب‌گیری و ترمزگیری مفید

است؛ زیرا میزان نیروی اصطکاک متناسب با افزایش یا کاهش بار تغییر می‌کند [۳۵]. نیروی درگ ناشی از مقاومت در برابر هوا، معمولاً به صورت نیرویی وارد بر یک نقطه به نام مرکز فشار در نظر گرفته می‌شود. در سرعت‌های بالا این پدیده سبب ایجاد گشتاور حول چرخ عقب و انتقال بار خالص بین محورها می‌شود. همچنین با توجه به شکل دوچرخه و بادشکن‌ها نیروی لیفت<sup>۲۷</sup> نیز در انتقال بار بین محورها تأثیر می‌گذارد [۴۱].

## ۷-۱. پایداری

یک دوچرخه تحت شتاب‌گیری یا ترمزگیری می‌تواند ناپایدار باشد. همچنین وقتی مرکز جرم مدل دوچرخه‌سوار به اندازه کافی بالا و نزدیک محور عقب باشد یا دوچرخه‌سوار حین پدال‌زدن مرکز جرم بدنش را به عقب جابه‌جا کند، چرخ جلوی دوچرخه از زمین جدا می‌شود که به این حرکت در اصطلاح تک‌چرخ گفته می‌شود [۳۸].

## ۷-۲. ترمزگیری

بیشتر نیروی لازم برای ترمزگیری از جانب چرخ جلو تولید می‌شود. اگر ترمزها به اندازه کافی توان داشته باشند، زمانی که چرخ جلو نیروی ترمزی مناسبی تولید کند، چرخ عقب به سادگی می‌تواند بلغزد. یکی از حرکات نمایشی زمانی صورت می‌پذیرد که طی ترمزگیری شدید از جانب چرخ جلو، چرخ عقب از زمین بلند شود و تا حد واژگونی پیش برود.

## ۸. نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله مطالعه‌ای جامع بر طراحی انواع دوچرخه‌ها در حضور راننده و تأثیر حضور راننده بر حرکت دوچرخه می‌باشد، همچنین فاکتورهایی از دوچرخه‌سوار که بر حرکت و تعادل دوچرخه تأثیر گذارند نیز بررسی شده است. مدلسازی بدن انسان که به صورت مجموعه‌ای از اهرم‌ها و مفاصل در نظر گرفته می‌شود، در منابع مختلف دارای درجات آزادی متفاوتی است. ساده‌ترین مدلسازی به صورت یک مدل دو اهرم<sup>۲۸</sup> بالاتنه و

## ۹. مآخذ

- and review, proceedings of the Royal Society a: Mathematical, Physical and Engineering sciences, Vol. 463, No. 2084. pp. 1955–1982, 2007.
- [3] J. D. G. Kooijman, A. L. Schwab, J. P. Meijaard, Experimental validation of a model of an

پایین‌تنه، و دقیق‌ترین مدلسازی به صورتی که هر عضو بدن به‌عنوان یک اهرم در نظر گرفته شود صورت گرفته است. علاوه بر مدلسازی تعیین انواع حرکاتی که یک دوچرخه‌سوار در سیکل حرکتی خود ممکن است انجام دهد و در قالب چهار حرکت فرمان‌گیری، لینینگ، لیفتینگ و رکاب‌زدن می‌باشد نیز در تحلیل دینامیکی لازم است.

با توجه به دسته‌بندی انواع دوچرخه‌ها، موقعیت قرارگیری دوچرخه‌سوار روی دوچرخه نیز دستخوش تغییرات می‌شود. دوچرخه‌سوار حتی در یک سیکل حرکتی با هر نوع دوچرخه، اقدام به حرکات مختلفی می‌نماید و موقعیت اندام‌های خود را دائماً تغییر می‌دهد. در دوچرخه‌سواری جاده‌ای دوچرخه‌سوار در دو حالت شتاب‌گیری و استراحت به حالات مختلفی روی دوچرخه‌سوار می‌شود. هنگام حرکت بر دوچرخه‌های کراس و دوچرخه‌های کوهستان نیز حالات نشستن دوچرخه‌سوار حائز اهمیت می‌باشد. در هر موقعیتی که دوچرخه‌سوار نسبت به دوچرخه قرار می‌گیرد، نیروهایی که به اندام‌هایش وارد می‌شوند، انرژی تولیدشده از هر عضو، ارتعاشات هر عضو و دیگر پارامترهای دینامیکی مهم بدن دوچرخه‌سوار حائز اهمیت فراوان است. علاوه بر آنالیز بدن دوچرخه‌سوار، خود دوچرخه نیز بسته به کاربرد و تجهیزات دارای ویژگی‌های دینامیکی متفاوت است. هندسه دوچرخه، نوع سیستم انتقال قدرت، نوع فرمان، ویژگی‌های بدنه، نوع ترمز، نوع سیستم تعلیق، نوع تایرها و تجهیزات جانبی برای هر نوع دوچرخه طبق استانداردهای خاصی در نظر گرفته می‌شود. تعیین دستگاه مختصات و درجات آزادی دوچرخه نیز برای انجام تحلیل‌های دینامیکی یکی از الزامات پژوهشی می‌باشد. در بررسی تقابل بین دینامیک دوچرخه و دوچرخه‌سوار، ضمن توجه به نوع دوچرخه و بررسی نیروهای خارجی و داخلی وارد بر دوچرخه، به بررسی ویژگی‌های دینامیک عرضی اعم از تعادل، دور زدن و مانورپذیری و ویژگی‌های دینامیک طولی اعم از پایداری و ترمزگیری دوچرخه پرداخته می‌شود.

- [1] M. Estivalet, P. Brisson, Parametric study of bicycle stability, *Engineering*, 2009, p. 682.
- [2] J. P. Meijaard, J. M. Papadopoulos, A. Ruina, A. L. Schwab, Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark

- uncontrolled bicycle, *multibody syst. dyn.*, Vol. 19, No. 1–2, pp. 115–132, 2008.
- [4] K. J. Astrom, R. E. Klein, A. Lennartsson, Bicycle dynamics and control: adapted bicycles for education and research, *control systems, IEEE*, Vol. 25, No. 4. pp. 26–47, 2005.
- [5] Oxford english dictionary, <http://www.oxforddictionaries.com>, accessed Feb 1, 2015.
- [6] Bicycles produced in the world-worldometers,, <http://www.worldometers.info/bicycles>, Feb 1, 2016.
- [7] Baron von drais bicycle, canada science and technology museum, <http://cstmuseum.techno-science.ca>, Aug 30, 2016.
- [8] T. Sixieme, Improvements in the wheels of bicycles, *Bulletin of the laws of the French Republic (1873) 12th series*, Vol. 6, p. 648, patent no. 86,705, 1869.
- [9] W. W. I. Collaboration, M. Gaze, Professional cycle racing a bibliography, p. 235, 2014.
- [10] S. Brown, One-speed bicycle coaster brakes, 2010.
- [11] F. J. W. Whipple, The stability of the motion of a bicycle, *q. j. pure appl. math.*, Vol. 30, pp. 312–348, 1899.
- [12] R. S. Sharp, Dynamical analysis of vehicle systems, *cism international centre for mechanical sciences*, Vol. 497. pp. 183–230, 2009.
- [13] C. Koenen, H. B. Pacejka, Vibrational modes of single-track vehicles in curves, *veh. syst. dyn.*, Vol. 8, No. 2–3, pp. 128–133, 1979.
- [14] C. Koenen, H. B. Pacejka, The influence of frame elasticity and simple rider body dynamics on free vibrations of motorcycles in curves, *veh. syst. dyn.*, Vol. 10, No. 2–3, pp. 70–73, 1981.
- [15] T. Nishimi, A. Aoki, T. Katayama, Analysis of straight running stability of motorcycles, in *proc. 10<sup>th</sup> int. technical conf. experimental safety vehicles*, oxford, 1–5 july 1985, pp. 1080–1094.
- [16] D. H. Weir, J. W. Zellner, Lateral-directional motorcycle dynamics and rider control, *soc. auto. Eng*, paper 780304, 1978, pp. 7-31.
- [17] T. Katayama, A. Aoki, T. Nishimi, Control behaviour of motorcycle riders, *vehicle system dynamics*, Vol. 17, No. 4. pp. 211–229, 1988.
- [18] H. Imaizumi, Rider model by use of multibody dynamics analysis, *JSAE review*, Vol. 17, No. 1. pp. 75–77, 1996.
- [۱۹] م. هویت‌طلب، ح. خاکی، تحلیل الکترومییوگرافی عضلات پا هنگام دوچرخه‌سواری، هجدهمین همایش سالانه مهندسان مکانیک، ۱۳۸۹.
- [20] I. Walker, Drivers overtaking bicyclists: objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender, accident analysis and prevention, Vol. 39, No. 2. pp. 417–425, 2007.
- [21] <http://www.bike.bikegremlin.com>, Feb 01, 2017.
- [22] <http://velonews.competitor.com>, Feb 01, 2017.
- [23] Cyclo-Cross Bicycle, <http://en.wikipedia.org>, 2016.
- [24] Touring bicycle, <http://en.wikipedia.org>, 2016.
- [۲۵] س. شب‌زنده‌دار، م. مسیح طهرانی، بررسی تأثیر استراتژی توزیع توان بر عملکرد یک دوچرخه‌الکتریکی و مصرف کالری راننده آن، هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی مکانیک ایران، رشت، گیلان، مهر ۱۳۹۳.
- [26] P. Wang and J. Yi, Dynamic stability of a rider-bicycle system: analysis and experiments, *proceedings of the American Control conference*, Vol. 2015-july. pp. 1161–1166, 2015.
- [27] Q. He, X. Fan, D. M. Cim, Full Bicycle Dynamic Model for Interactive Bicycle Simulator, *journal of computing and information science in engineering*, pp. 373–380, 2005.
- [۲۸] ع. رهی، ن. هدایی، مدل‌سازی و مطالعه دینامیک حاکم بر دوچرخه، اولین کنفرانس بین‌المللی دوچرخه شهری، ۱۳۹۰.
- [29] E. L. Wang, M. L. Hull, A model for determining rider induced energy losses in bicycle suspension systems, *vehicle system dynamics*, Vol. 25, No. 3. pp. 223–246, 1996.
- [30] W. Frank, D. G. Wilson, *Bicycling science*, second edition, Massachusetts Institute of Technology, 1982, pp. 188, 198–233, 1982.
- [۳۱] س. هاشم‌نیا، م. شریعت‌پناهی، کنترل تعادل دوچرخه بدون سرنشین با استفاده از یک سیستم طبقه بند بهبودیافته، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۳۹۲.
- [32] J. Heine, Where to carry a load - the best option for you depends on your bicycle adventure cyclist, <http://adventurecycling.org>, 2016.

- [33] J. D. G. Kooijman, A. L. Schwab, A review on bicycle and motorcycle rider control with a perspective on handling qualities, vehicle system dynamics, Vol. 51, No. 11, proceedings of the ASME 2011 international design engineering technical conferences & computers and information in engineering conference, Washington, pp. 1722–1764, 2011.
- [34] M. Moto, Motorcycle touring tips part 3. preparing the bike, 2008-06-28.
- [35] D. Gordon, J. Papadopoulos, Bicycling science, Third Edition, The MIT Press, 2004, pp. 263-390.
- [36] C. Vittore, Motorcycle dynamics, Second Edition, pp. 241–342, 2006.
- [37] J. Fajans, Steering in bicycles and motorcycles, American Association of Physics Teachers, 1999.
- [38] C. Nakagawa, Y. Suda, K. Nakano, S. Takehara, Stabilization of a bicycle with two-wheel steering and two-wheel driving by driving forces at low speed, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 4. pp. 980–986, 2009.
- [39] G. K. Wertheim, Bicycle stability in no-hands riding, Phys. Today, Vol. 60, No. 6, pp. 14–16, 2007.
- [40] R. S. Sharp, On the stability and control of the bicycle, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (ASME), p. 61, 2008.
- [41] R. S. Sharp, Motorcycle steering control by road preview, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (ASME), Vol. 129, pp. 373–381, 2008.

## بی نوشت

- 
1. handling quality
  2. self-stability
  3. rider
  4. Daily News
  5. Dandy horse
  6. Kirkpatrick MacMillan
  7. Pierre Michaux
  8. Pierre Lallement
  9. Thomas McCall
  10. Starley's Rover
  11. Bicycle Touring
  12. wobble
  13. weave
  14. lining

- 
15. lifting
  16. cross
  17. fitness
  18. drop handlebar
  19. wheel-base
  20. riser handlebar
  21. roll
  22. gyroscopic force
  23. over steer
  24. under steer
  25. self-aligning moment
  26. handling
  27. lift