



عوامل موثر بر کیفیت هوا و کنترل توزیع آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری

محمد کردوانی

دانشجوی کارشناسی ارشد

امیر امیدوار*

دانشیار

مسعود خراتی کوپایی

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

چکیده: امروزه به واسطه ی افزایش جمعیت و کمبود فضای کافی برای ساخت و ساز، احداث ساختمان‌های بلند مرتبه در شهرهای بزرگ رواج پیدا کرده که این امر باعث پیدایش شکل خاصی از ساختارهای شهری، تحت عنوان دره خیابان‌های شهری شده است. شکل و توپوگرافی ساختارهای شهری بر نحوه توزیع و تهویه ی آلاینده‌ها در شهرهای بزرگ بسیار تاثیرگذار است. در این مقاله در ابتدا شاخص‌ها و استانداردهای کیفیت هوا در کشورهای مختلف بررسی و مقایسه شده است. سپس میزان تأثیر عوامل ساختاری مختلف بر توزیع آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری بررسی و مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که عواملی نظیر پیکربندی ساختمان، سرعت باد، جهت باد و کاشت درختان تأثیر زیادی بر نرخ تهویه و کیفیت هوا در دره خیابان‌های شهری دارد. اما گرمایش دیواره‌های ساختمان، نوع پوشش دهی سطوح جاده و نرخ ترافیک و آمد و شد وسایل نقلیه به نسبت تأثیر کمتری بر کیفیت هوا در دره خیابان‌های شهری دارد.

واژه‌های راهنما: آلودگی هوا، دره خیابان شهری، آلاینده، شاخص کیفیت هوا، ترافیک

Mohammad
Kordavani
MSc. Student

Amir Omidvar*
Associate Professor

Masoud Kharati
Koopae
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Shiraz
University of Technology,
Shiraz

Factors affecting air quality and controlling the pollution distribution in urban canyon streets

Abstract: Today, due to rapid urbanization, population density growth, and lack of sufficient space for construction, the tendency to build high-rise buildings has become widespread in large cities. This has led to the rising of a particular form of an urban structure called the urban canyon streets. The shape and topography of urban structures have a significant impact on the ventilation and distribution of air pollutants in different areas of large cities. In this article, firstly, air quality metrics and standards in different countries are reviewed and compared. Then, the effect of different structural factors on the distribution of pollutants in the urban canyon streets was studied and compared. The results showed that factors such as building configuration, wind speed, wind direction, and tree planting significantly impact ventilation rate and air quality in urban canyon streets. However, the thermal condition of buildings' envelope, the covering type of the road surfaces, and the traffic rate have relatively more minor effects on the air quality in the urban canyon streets.

Keywords: Air pollution, Urban canyon street, Pollution, Air quality index, Traffic.

۱- مقدمه

مدل کوچک شده در فضای باز [۱۱] و استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی اشاره نمود [۱۲-۱۷]. به واسطه این‌که شبیه‌سازی‌های عددی از نظر دقت و هزینه، بهینه‌تر و به صرفه‌تر از سایر روش‌های مطالعاتی ذکر شده هستند، بیشتر بررسی‌های صورت گرفته در این حوزه را شامل می‌شوند که عمده این شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر مدل‌های میانگین رینولدز ناویر-استوکس و شبیه‌سازی گردابه بزرگ است [۱۸].

در تحقیق حاضر سعی شده است در ابتدا شاخص‌های کاربردی و رایج اندازه‌گیری و تعیین آلودگی هوا در مناطق شهری و استانداردهای مربوط به آن معرفی و مقایسه گردد. در ادامه، به پدیده دره خیابان شهری و عوامل مهم در تعیین میزان سطح آلاینده در این حوزه پرداخته شده است. تحقیقات مختلفی که در زمینه انتشار آلاینده‌ها در دره‌های خیابان‌های شهری معرفی خواهد شد و عوامل مؤثر بر آن و همچنین راهکارهای کنترل سطح آلاینده‌ها در دره‌های خیابان‌های شهری معرفی خواهد شد.

۲- آلودگی هوا و شاخص‌های تعیین کیفیت هوا

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای گزارش سطح شدت آلودگی هوا و اطلاع رسانی آن به مردم استفاده از شاخص‌های کیفیت هوا^۴ یا شاخص‌های آلودگی هوا^۵ است. در شاخص‌های کیفیت هوا، اطلاعات مربوط به آلودگی هوا ترکیب شده و استاندارد جهت مقایسه ارائه می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده با روش‌های مختلف تجمیع شده و به یک شاخص واحد تبدیل می‌شوند. این بدان معناست که سیستم‌های نمایه‌سازی^۶ و توصیفگرهای آلودگی هوا اغلب از یک کشور یا منطقه به کشور یا منطقه دیگر متفاوت است که در واقع یعنی هیچ روش پذیرفته شده جهانی و یکتایی وجود ندارد که برای همه کشورها مناسب باشد و بتوان بر اساس یک روش کلی مشخص، یک شاخص جهانی برای تمام کشورها و مناطق تعریف نمود [۱۹].

هدف اساسی هر شاخص کیفیت هوا، تبدیل غلظت اندازه‌گیری شده از آلاینده‌های هوا به یک شاخص عددی واحد با استفاده از مکانیسم مناسب است. بر این اساس می‌توان با در نظر گرفتن موارد زیر به یک معیار طراحی اصولمند برای شاخص کیفیت هوای ایده‌آل رسید [۱۹]:

۱- برای عموم افراد جامعه قابل درک باشد.

آلودگی هوا همواره یکی از تهدیدهای مهم برای سلامتی انسان‌ها بوده است. سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۰۶ اعلام کرد که حدود ۲۵ درصد از کل مرگ و میرها در کشورهای در حال توسعه را می‌توان به طور مستقیم به عوامل محیطی نسبت داد [۱]. زمانی که سطح آلاینده‌ها در هوا از حد تعریف شده و مجاز آن بیشتر شود می‌تواند برای اقل‌احساس جامعه خطر آفرین باشد، بطوریکه قرار گرفتن طولانی مدت در معرض این آلاینده‌ها باعث تشدید بیماری‌های قلبی و ریوی خواهد شد [۲]. در سال ۲۰۱۶، در یک بررسی مشخص گردید که آلودگی هوا باعث مرگ ۴/۲ میلیون نفر در سال می‌شود که یک رقم قابل توجه است [۳]. در مطالعه دیگری که بر روی افراد ساکن در حاشیه آزادراه‌ها انجام شد نشان داده است که به خاطر دریافت سطح بیشتر آلاینده‌های مخرب می‌تواند با کاهش بیشتر عملکرد ریه در این افراد مرتبط باشد [۴]. یک سوال مهم و اساسی این است که آیا آن‌چه باعث بوجود آمدن آلودگی هوا می‌شود تنها وسایل یا منابعی هستند که آلاینده یا آلاینده‌هایی را از خود ساطع می‌کنند یا عوامل مهم دیگری نیز وجود دارند که باعث تشدید آلودگی هوا و به خطر انداختن سلامت انسان‌ها می‌شود و با شناسایی و بهینه‌سازی این عوامل تا چه میزان می‌توان کیفیت هوای شهری را بهبود بخشید. یکی از عوامل تاثیرگذار بر کیفیت هوا نحوه تهویه آلاینده‌های تولید شده در مناطق شهری است. در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و نیاز انسان‌ها به حضور در کلان شهرها برای استفاده از امکانات شهری بیشتر از یک طرف و کمبود فضای ساختمانی از سوی دیگر مهندسان را به ساخت بناهای بلندمرتبه سوق داده است. این ساختمان‌های بلندمرتبه باعث بوجود آمدن ساختارهای شهری ویژه‌ای تحت عنوان دره خیابان شهری^۱ شده است. دره خیابان‌های شهری می‌تواند بر عوامل محلی نظیر کیفیت هوا، دما، سرعت باد و جهت باد تاثیرگذار باشد [۵، ۶]. دره خیابان‌های شهری مهم‌ترین تاثیر را بر روی کیفیت هوای ساکنان این مناطق می‌گذارد و یک زمینه جدید مطالعاتی برای بررسی سطح کیفیت هوا، نحوه تهویه و انتشار آلودگی‌های تولید شده در این مکان‌ها را پیش روی محققان قرار داده است. محققان، پدیده انتشار آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری را به طرق مختلفی مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند که می‌توان به اندازه‌گیری میدانی [۷، ۸]، شبیه‌سازی تونل باد [۹، ۱۰]، آزمایش

⁴ Air quality index

⁵ Air pollution index

⁶ Indexing

¹ Urban Canyon Street

² Reynolds-averaged Navier-Stokes

³ large eddy simulation

۲- قابل گسترش برای سایر آلاینده‌ها و میانگین زمان باشد.

مجاز است به جز یک مورد، هشدار آلودگی را بدهد).
با توجه به ویژگی‌های فوق الذکر، تاکنون شاخص‌های متنوعی برای تعیین کیفیت هوا در سطح جهان توسعه و معرفی شده است که در جدول ۱ لیستی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت هوای موجود در جهان تا به امروز آمده است.

۳- اجتناب از آلاینده‌های پنهان^۱ (گرفتگی زمانی رخ می‌دهد که شاخص آلودگی هوا نشان‌دهنده کیفیت بد هوا نباشد، علی‌رغم این‌که غلظت یک یا چند آلاینده هوا ممکن است به مقادیر غیر قابل قبولی برسد).

۴- اجتناب از ابهام (ابهام زمانی رخ می‌دهد که یک شاخص آلودگی هوا به‌رغم این واقعیت که غلظت همه آلاینده‌ها در حد

جدول ۱ بررسی برخی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت هوای موجود [۱۹].

شاخص کیفیت هوا	سال طراحی	فرد طراح یا سازمان طراح	هدف یا کاربرد
Oak Ridge Air Quality Index (ORAQI)	۱۹۷۵	Thomas and Ott	ارزیابی وضعیت کیفیت هوا در کلان شهرها
AQI System of U.S. EPA	۱۹۷۶	U.S. EPA, AQI	برای گزارش مداوم وضعیت کیفیت هوا به عموم استفاده می‌شود
Integral Air Pollution Index (IAPPI)	۱۹۹۳	Bezuglaya	استفاده از API امکان دستیابی به درجه پیچیده‌ای از آلودگی هوای شهری را فراهم می‌کند.
Air Quality Depreciation Index (AQDI)	۲۰۰۶	Singh G	تعریف استهلاک کیفیت هوا با توجه به استاندارد
Aggregate Air Quality Index (AQI)	۲۰۰۷	Kyrkilis	بر اساس اثرات ترکیبی پنج آلاینده معیار (PM ₁₀ و O ₃ ، NO ₂ ، SO ₂ ، CO) با در نظر گرفتن استانداردهای اروپایی. مفید برای اطلاع رسانی به شهروندان و حفظ سلامت انسان در یک مجموعه شهری.
Common Air Quality Index (CAQI)	۲۰۰۸	CITEAIR II Project, Europe	مقایسه کیفیت هوای شهری در زمان واقعی
New Air Quality Index (NAQI)	۲۰۰۹	Bishoi	برای تعریف وضعیت هوا به صورت نسبی
Pollution Index (PI)	۲۰۰۹	Cannistraro	برای اطلاع رسانی به شهروندان در مورد وضعیت کیفیت هوای یک منطقه زباله شهری مفید است.
The Aggregate Risk Index (ARI)	۲۰۱۱	Sciard	اندازه‌گیری شاخص خطر مرگ و میر / مرگ و میر مرتبط با قرار گرفتن همزمان در معرض آلاینده‌های معمولی هوا و یک روش آماده برای مقایسه سهم نسبی هر آلاینده با خطر کل ارائه می‌دهد. یک مقیاس شاخص دلخواه ارتباط ریسک را تسهیل می‌کند. مقادیر شاخص ممکن است برای مناطق بسیار آلوده فراتر از ۰ باشد.
Fuzzy Air Quality Index	۲۰۱۲	Mandal	یک رویکرد تجمعی جدید برای ارزیابی کیفیت هوا پیشنهاد شده است
AQI Based on PCA-Neural Network Model	۲۰۱۳	Kumar and Goyal	-

¹ Eclipsing

انتشار آلاینده‌ها و بوجود آمدن آلودگی هوا است که از جمله شایع‌ترین آلاینده‌های منتشر شده از این وسایل می‌توان به مونوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، هیدروکربن‌های نسوخته، ذرات معلق (PM10 و PM2.5)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۳ و سایر ترکیبات آلی اشاره نمود [۲۰].

همان‌طور که گفته شد شاخص‌های کیفیت هوا تمام آلاینده‌ها را در نظر نمی‌گیرند و بر این اساس هر کشور یا منطقه با توجه به موقعیت جغرافیایی، سیاست‌های کلان دولت و وضع سلامت ساکنان خود اقدام به بررسی و پایش تعداد محدودی از آلاینده‌ها می‌کنند [۲۱]. جدول ۳ به مقایسه انواع آلاینده‌های مورد بررسی در برخی از کشورها می‌پردازد. همان‌طور که نوع و تعداد آلاینده‌های مورد بررسی از یک کشور یا منطقه تا کشور یا منطقه دیگر متفاوت است حد استاندارد غلظت آلاینده‌ها نیز برای تعیین شاخص کیفیت هوا در کشورهای مختلف متفاوت است. در جدول ۴ به حدود استاندارد غلظت برخی آلاینده‌ها برای برخی از کشورهای جهان اشاره شده است.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت هوا در جهان شاخصی است که توسط سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده با اندازه‌گیری پنج آلاینده رایج در دنیا بر اساس رابطه ۱ و استخراج اطلاعات متناسب با هر آلاینده از جدول ۲ محاسبه و منتشر می‌شود.

$$I_P = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1)$$

که در این رابطه:

I_P : شاخص کیفیت هوا برای آلاینده P است.

I_{Hi} : مقدار شاخص کیفیت هوا منطبق با BP_{Hi} است.

I_{Lo} : مقدار شاخص کیفیت هوا منطبق با BP_{Lo} است.

BP_{Hi} : نقطه شکستی که بزرگتر یا مساوی C_P است.

BP_{Lo} : نقطه شکستی که کوچکتر یا مساوی C_P است.

C_P : غلظت اندازه‌گیری شده (گردشده) برای آلاینده P است.

بر این اساس می‌توان بر حسب عدد بدست آمده سطح آلودگی هوا را به شش دسته‌ی خوب، متوسط، ناسالم برای گروه‌های حساس، ناسالم و خطرناک تقسیم‌بندی نمود. برای محاسبه میزان آلودگی هوا نیاز به شناخت انواع مختلف آلاینده‌ها است. اگر روز وسایل نقلیه موتوری منبع مهمی برای

جدول ۲ نقاط شکست کیفیت هوا [۱۹].

طبقه‌بندی کیفیت هوا	AQI	نقاط شکست						(۱) O ₃ (ppm) ۸ ساعته	O ₃ (ppm) یک ساعته	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	CO (ppm) ۸ ساعته	SO ₂ (ppm) ۲۴ ساعته	NO ₂ (ppm) یک ساعته
خوب	۰-۵۰	۰-۰/۰۵۳	۰-۰/۰۳۴	۰-۴/۴	۰/۰-۱۵/۴	۰-۵۴	-	۰-۰/۰۵۹	-	-	-	-	-	-
متوسط	۵۱-۱۰۰	۰/۰۵۴-۰/۱	۰/۰۳۵-۰/۱۴۴	۴/۵-۹/۴	۱۵/۵-۳۵/۰	۵۵-۱۵۴	-	۰/۰۶-۰/۰۷۵	-	-	-	-	-	-
ناسالم برای گروه‌های حساس	۱۰۱-۱۵۰	۰/۱۰۱-۰/۳۶۰	۰/۱۴۵-۰/۲۲۴	۹/۵-۱۲/۴	۳۵/۱-۶۵/۴	۱۵۵-۲۵۴	۰/۱۲۵-۰/۱۶۴	۰/۰۷۶-۰/۰۹۵	-	-	-	-	-	-
ناسالم	۱۵۱-۲۰۰	۰/۳۶۱-۰/۶۴۰	۰/۲۲۵-۰/۳۰۴	۱۲/۵-۱۵/۴	۶۵/۵-۱۵۰/۴	۲۵۵-۳۵۴	۰/۱۶۵-۰/۲۰۴	۰/۰۹۶-۰/۱۱۵	-	-	-	-	-	-
خیلی ناسالم	۲۰۱-۳۰۰	۰/۶۵-۱/۲۴	۰/۳۰۵-۰/۶۰۴	۱۵/۵-۳۰/۴	۱۵۰/۵-۲۵۰/۴	۳۵۵-۴۲۴	۰/۲۰۵-۰/۴۰۴	۰/۱۱۶-۰/۳۷۴	-	-	-	-	-	-
خطرناک	۳۰۱-۴۰۰	۱/۲۵-۱/۶۴	۰/۶۰۵-۰/۸۰۴	۳۰/۵-۴۰/۴	۲۵۰/۵-۳۵۰/۴	۴۲۵-۵۰۴	۰/۴۰۵-۰/۵۰۴	(۲)	۰/۵۰۵-۰/۶۰۴	۵۰۵-۶۰۴	۳۵۰/۵-۵۰۰/۴	۴۰/۵-۵۰/۴	۰/۸۰۵-۱/۰۰۴	۱/۶۵-۲/۲۰۴
							۰/۵۰۵-۰/۶۰۴							

(۱) در بیشتر مناطق AQI بر حسب مقادیر ازن هشت ساعته گزارش می‌شود اما در برخی از مناطق AQI بر اساس مقادیر ازن یک ساعته به احتیاط نزدیکتر است. در این شرایط AQI می‌بایست هم برای مقادیر ازن هشت ساعته و هم برای مقادیر ازن یک ساعته محاسبه شود هر کدام بیشتر باشد، گزارش شود.

(۲) وقتی ازن هشت ساعته از ۰/۳۷۴ فراتر رود مقدار AQI، ۳۰۱ یا بالاتر باید با استفاده از غلظت ازن یک ساعته محاسبه

³ Volatile organic compounds

¹ Break Point

² particulate matter

جدول ۳ انواع آلاینده‌های مورد بررسی در هر کشور یا ناحیه بر اساس سیاست‌های محیط زیستی هر کشور [۱۶].

نوع آلاینده مورد بررسی													کشور یا منطقه
Benzo(a) pyrene	As	NH3	TSP	Ni	Benzene	O3	Pb	SO2	NO2	CO	PM 2.5	PM 10	
×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	اتحادیه اروپا
×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ایالات متحده
×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	استرالیا
×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	آرژانتین
×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	کره جنوبی
×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	چین
✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	هند

جدول ۴ حدود استاندارد غلظت آلاینده در برخی از کشورها [۱۷].

حد استاندارد غلظت آلاینده						کشور یا منطقه
O3	SO2	NO2	CO	PM2.5	PM10	
120µg/m3	125µg/m3	80µg/m3	10mg/m3	25µg/m3	50µg/m3	اتحادیه اروپا
140µg/m3	140µg/m3	80µg/m3	9mg/m3	35µg/m3	150µg/m3	ایالات متحده
200µg/m3	150µg/m3	80µg/m3	10mg/m3	75µg/m3	150µg/m3	چین
180µg/m3	80µg/m3	80µg/m3	4mg/m3	60µg/m3	150µg/m3	هند

۳- دره خیابان شهری

ساختمان‌ها [۲۸]، واکنش‌های شیمیایی [۲۹] و حجم ترافیک [۳۰] از جمله عوامل مهم برای بررسی نحوه انتشار آلاینده‌ها در دره خیابان‌های شهری هستند. در ادامه به بررسی هر کدام از این عوامل پرداخته خواهد شد.



شکل ۱ نمونه‌ای از دره خیابان شهری در نیویورک [۳۱].

در لایه سایبان شهری^۱ یعنی پایین‌ترین قسمت لایه مرزی شهری، ویژگی‌های پراکندگی باد و آلاینده‌ها مستقیماً تحت تأثیر موانع و جریان هوا قرار می‌گیرد [۱۴]. دره خیابان شهری مطابق شکل ۱ به مکان‌هایی گفته می‌شود که خیابان، توسط ساختمان‌هایی از دو طرف احاطه می‌شود. بواسطه نرخ ترافیک، مقدار دود خروجی که از آگزوز وسایل نقلیه موتوری خارج و پراکنده می‌شود، دارای شدت متفاوتی است که منجر به قرار گرفتن ساکنان در معرض آلاینده‌های هوا می‌شود. بنابراین، بسته به ویژگی‌های جریان هوا، پراکندگی آلاینده‌ها می‌تواند نگران کننده باشد. در بیشتر شبیه‌سازی‌های عددی معمولاً اثرات یک عامل یا ترکیبی از عوامل مشخص می‌تواند در وجود آوردن تفاوت در شدت و یا نحوه پراکندگی آلاینده در دره خیابان شهری موثر باشد که عواملی نظیر نسبت ضریب منظری [۲۲]، جهت باد [۲۳]، اثرات دما [۲۴]، اثرات پوشش‌دهی جاده [۲۵]، اثرات وجود موانع [۲۶، ۲۷]، اثرات پیکربندی و سقف

^۲ Urban boundary layer

^۱ Urban canopy layer

۳-۱- نسبت ضریب منظری

یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی جریان در دره خیابان‌های شهری نسبت ضریب منظری^۱ (نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان) است که بر این اساس مطابق مطالعات انجام شده سه رژیم جریانی مختلف در نسبت‌های منظری (AR) مختلف وجود خواهد داشت [۳۲]:

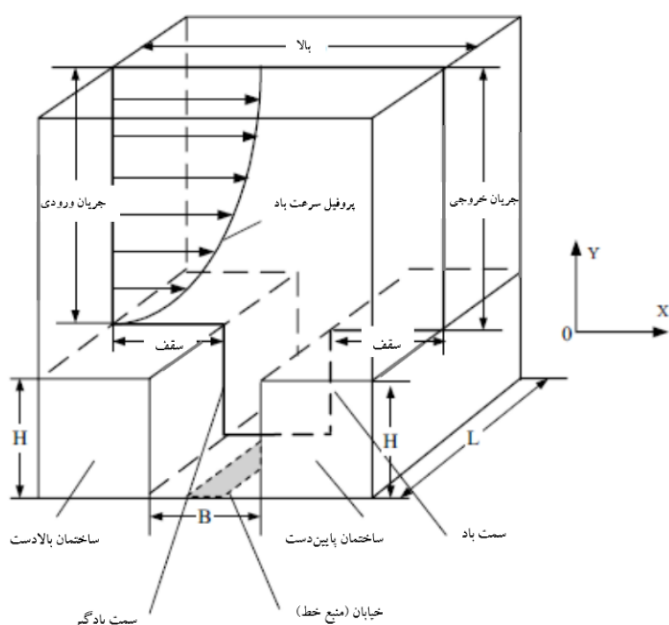
- جریان هوای ناهموار جدا شده ($AR < 0.3$)
- جریان هوای مداخله گردابه ($0.3 < AR < 0.7$)
- جریان هوای اسکیمینگ^۴ ($AR < 0.7$)

در سال ۲۰۰۲ چان و همکاران [۳۳] دره خیابانی مطابق شکل ۲ را برای نسبت‌های منظری متفاوت به کمک شبیه‌سازی عددی و در محیط فلوئنت بر اساس مدل RANS برای سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ Realizable مورد بررسی قرار دادند. این دره خیابان دارای دامنه فیزیکی واقعی 0.18 متر عرض و 0.24 متر ارتفاع بود که در نسبت منظری واحد، ارتفاع ساختمان و عرض خیابان برابر با 0.06 متر است. باد به صورت عمود بر دره خیابان در حال وزیدن است، همچنین گاز اتان به عنوان یک آلاینده از یک منبع با ابعاد 0.01 در 0.012 متر با نرخ 4 لیتر بر ساعت به دره خیابان تزریق می‌شد. آن‌ها برای ساده سازی، این مسئله را به صورت ۲ بعدی و با فرض این که هوای درون دره خیابان را می‌توان به صورت یک جریان آشفته تراکم ناپذیر با چگالی هوا و آلاینده ثابت در نظر گرفت مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی برای نسبت منظری یک مطابق شکل ۳ مشخص شد که همواره میزان غلظت آلاینده بدون بعد که می‌توان آن را طبق رابطه ۲ محاسبه نمود (که در آن C کسر حجمی اتان است، H ارتفاع ساختمان است، L طول منبع خط است و Q_e نرخ جریان حجمی اتان است)، برای سمت بادگیر بسیار بیشتر از سمت رو به باد ساختمان‌ها است. مطابق شکل ۳-الف میزان غلظت آلاینده بدون بعد در سمت بادگیر به صورت تصاعدی از کف تا سقف ساختمان کاهش می‌یابد اما در صورتی که، غلظت آلاینده بدون بعد مطابق شکل ۳-ب در سمت رو به باد ساختمان پایین دست تقریباً با تغییرات ارتفاع ثابت است.

$$K = \frac{C \cdot U_{ref} \cdot H \cdot L}{Q_e} \quad (2)$$

همانطور که از شکل ۳ مشخص است با کاهش نسبت منظری میزان غلظت آلاینده بدون بعد در هر دو سمت رو به باد و بادگیر ساختمان‌های پایین دست و بالا دست کاهش می‌یابد و مطابق شکل ۴ با افزایش نسبت منظری میزان غلظت آلاینده بدون بعد در هر دو سمت رو به باد و بادگیر به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

نتایج محاسبه شده نشان داده است که چرخش گردابه‌ها منجر به تغییر توزیع غلظت آلاینده در امتداد سطح دیوار ساختمان‌ها با نسبت منظری مختلف در دره خیابان شده است. به‌طور مثال برای دره خیابان با نسبت منظری واحد مطابق شکل ۵، چرخش تنها یک گردابه و برای نسبت ابعادی $\frac{1}{4}$ وجود چرخش دو گردابه باعث توزیع آلاینده‌ها در خیابان می‌شود.



شکل ۲ حوزه محاسباتی برای یک دره خیابان ایزوله، $B/H = 1$ [۳۳].

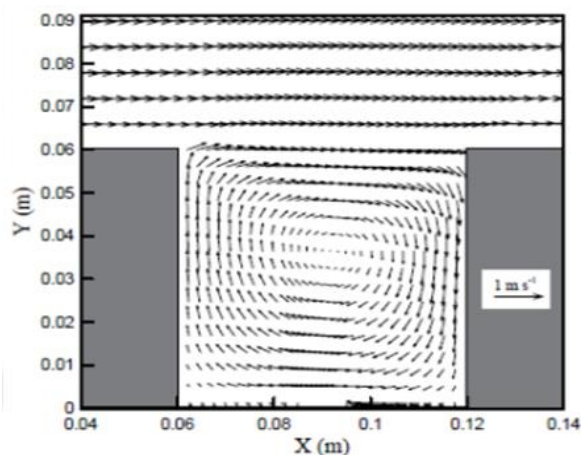
نتایج نشان می‌دهد که عریض‌تر کردن خیابان و کمتر نمودن ارتفاع ساختمان‌ها برای تهویه هوا و حذف آلاینده در دره خیابان شهری مطلوب‌تر است و باعث ایجاد کیفیت هوای بهتر برای ساکنان دره خیابان خواهد شد. از این رو پیکربندی دره خیابان تاثیر قابل توجهی بر نحوه پراکندگی آلاینده و میزان آن در دره خیابان شهری خواهد داشت.

^۱Wake interference airflow

^۴ Skimming airflow

^۱ Aspect ratio

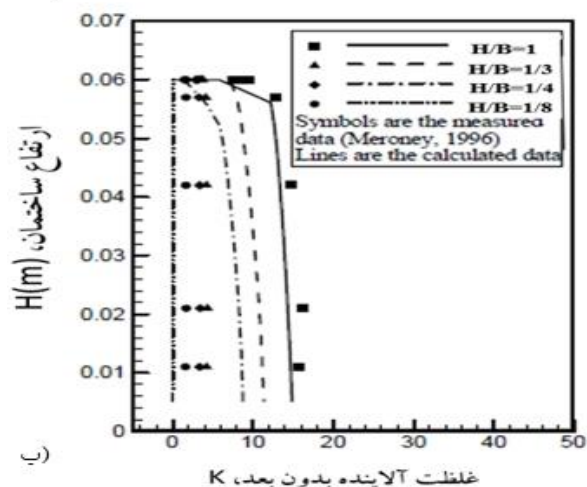
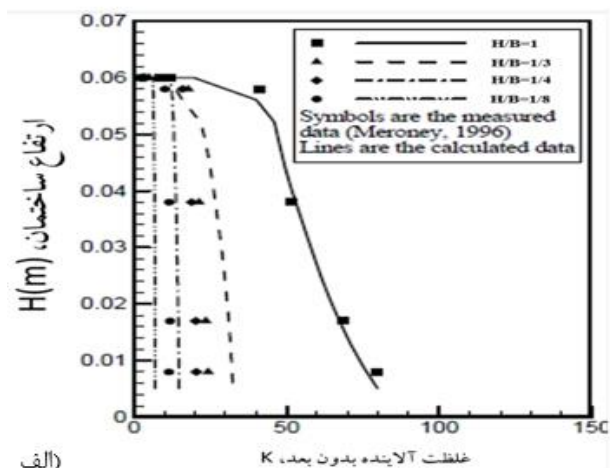
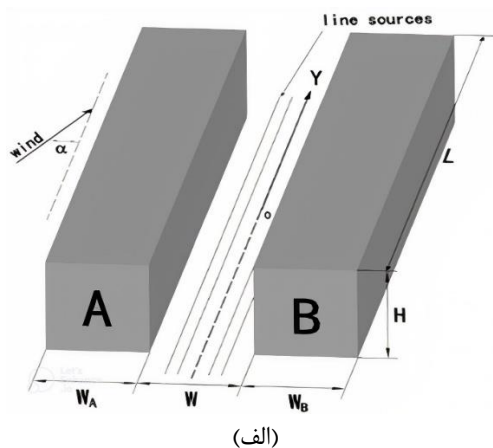
^۲ Isolated roughness airflow



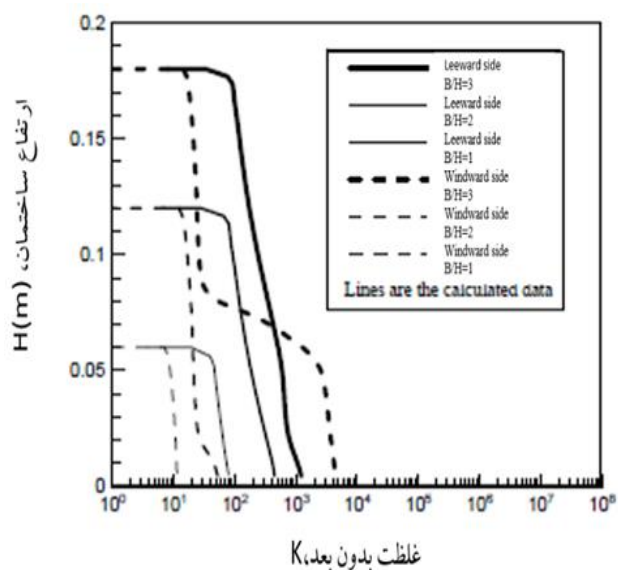
شکل ۵ گردش یک گرداب برای نسبت منطری واحد [۳۳].

۳-۲- تاثیر جهت باد

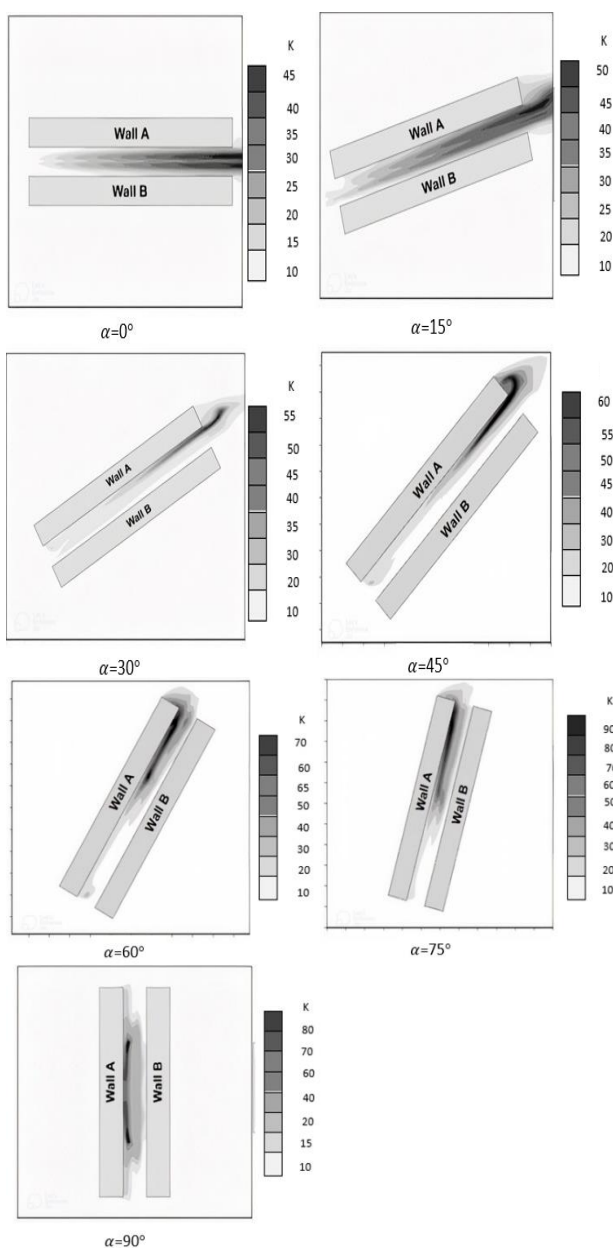
هانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۲۳]، اثر جهت باد بر جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها در یک دره خیابان طولانی به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار فلوئنت را بررسی کردند. مطابق شکل ۶ هنده مورد مطالعه شامل دو ساختمان مشابه که به موازات یکدیگر مرتب شده‌اند و نسبت طول خیابان به ارتفاع ساختمان برابر ۱۰ بود. هر ساختمان دارای سطح مقطع مربعی بودند. چهار منبع مولد خطی آلاینده به صورت موازی در کف خیابان تعبیه شده بود تا انتشار گازهای خروجی خودرو در جاده‌ای با ۴ خط را شبیه سازی نماید. از این منابع، گاز قابل ردیابی هگزا فلوراید گوگرد با سرعت ثابت آزاد می‌شد. در شکل ۶، α زاویه بین راستای باد و محور خیابان است. این بررسی از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی بر اساس معادلات RANS و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد جهت پیش‌بینی الگوی جریان و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های به دست آمده از آزمایش تونل باد استفاده شد. بررسی‌ها برای هفت جهت باد (۰ درجه، ۱۵ درجه، ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، ۶۰ درجه، ۷۵ درجه و ۹۰ درجه)، انجام شد.



شکل ۳ غلظت آلاینده بدون بعد برای نسبت منطری‌های متفاوت؛
الف) در سمت بادگیر ساختمان بالادست، ب) در سمت رو به باد
ساختمان پایین دست [۳۳].



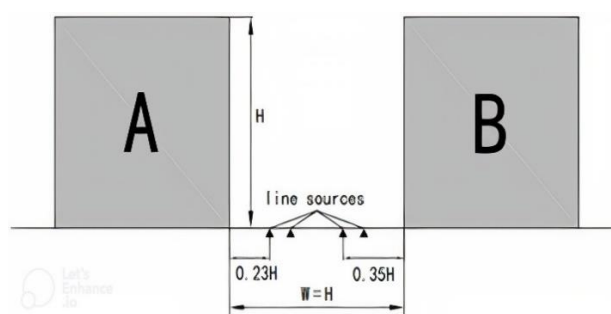
شکل ۴ غلظت آلاینده بدون بعد در سمت رو به باد و بادگیر
ساختمان برای نسبت منطری‌های متفاوت [۳۳].



شکل ۷ وضعیت قرارگیری ساختمان‌ها در برابر زاویه‌های مختلف باد [۲۳].

۳-۳- اثرات دما

همواره در روز، شرایط جوی تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد، زمانی که تابش خورشید باعث گرم شدن سطح نما، سقف ساختمان‌ها و سطوح زمین می‌شود که به نوبه خود دمای محیط در مجاورت ساختمان‌ها را گرم می‌کند و شرایط ناپایدار حرارتی ایجاد می‌کند. مطالعات نشان داده است که وضعیت پایداری جو و دیوارهای مختلف ساختمان گرم شده نیز به تغییرات جریان هوا و پراکندگی آلاینده‌ها در دره‌های خیابان کمک می‌کند [۳۴]. به طور کلی می‌توان دیواره‌هایی که توسط تابش خورشید در معرض گرم شدن قرار می‌گیرند را ۳ دیواره اصلی شامل سطح زمین (به طور مثال ساعت ۱۲ ظهر که خورشید به صورت عمود



سال سی و یکم، شماره دوم، خرداد و تیر ۱۴۰۱

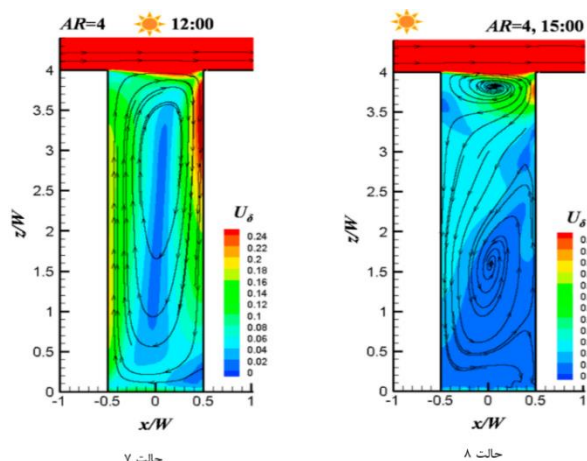
شکل ۶ الف) هندسه دره خیابان؛ ب) موقعیت‌های چهار منبع خطی تولید آلاینده قرار داده شده در کف خیابان [۲۳].

مطابق شکل ۷ بر روی دیوار سمت بادگیر، غلظت میانگین دیوار با α بسیار افزایش می‌یابد و مقادیر حداکثر غلظت روی دیوار زمانی که α ۷۵ درجه و کمترین آن‌ها زمانی که α صفر درجه است، اتفاق می‌افتد. در مقابل، در دیوار سمت باد، میانگین و حداکثر غلظت آلاینده‌ها بر روی دیوار هنگامی که α صفر درجه باشد، بیشترین است. سرانجام، در ارتفاع تنفس انسان (حدود ۱/۵ متر)، بیشترین غلظت در مسیر پیاده‌رو در کنار دیوار سمت بادگیر هنگامی که α برابر ۷۵ درجه باشد، رخ می‌دهد در حالی که بیشترین غلظت در مسیر پیاده‌روی نزدیک به دیوار سمت باد در زمان α صفر درجه مشاهده می‌شود. در جدول ۵ مقادیر ماکزیمم و میانگین غلظت آلاینده بدون بعد K بر روی دیواره‌های ساختمان A و B آورده شده است [۲۳]. در دیوار A غلظت میانگین با زاویه α بسیار افزایش می‌یابد (به عنوان مثال، غلظت میانگین تحت α برابر با ۹۰ درجه، ۳/۸۲ برابر زمانی است که α صفر درجه است). میانگین غلظت روی دیوار A به طور قابل توجهی بیشتر از دیوار B برای هر یک از جهت‌های وزش مایل و عمود است. حداکثر غلظت بر روی دیوار A برای هر یک از جهت‌های مایل و عمود بر باد بسیار بیشتر از دیوار B است.

جدول ۵ مقادیر غلظت بدون بعد آلاینده بر روی دیواره‌های

ساختمان [۲۳]

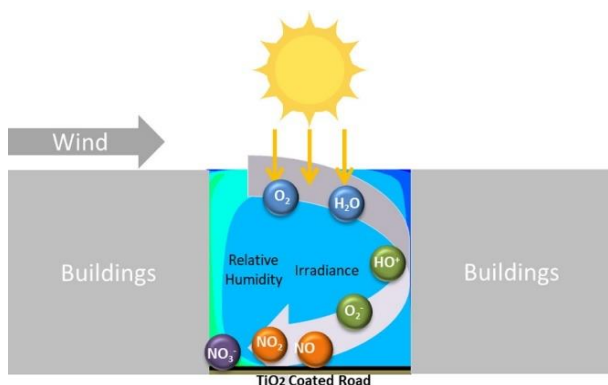
جهت باد (درجه)	میانگین غلظت بدون بعد		ماکزیمم غلظت بدون بعد	
	دیوار A	دیوار B	دیوار A	دیوار B
۰	۷/۴۰	۷/۳۹	۲۹/۰۷	۲۹/۰۸
۱۵	۹/۴۶	۴/۹۸	۳۰/۵۰	۱۵/۶۴
۳۰	۱۳/۲۵	۲/۶۹	۴۸/۸۴	۷/۴۸
۴۵	۱۴/۲۲	۲/۶۲	۵۶/۷۳	۷/۲۴
۶۰	۱۷/۲۸	۴/۳۹	۷۴/۸۲	۱۸/۰۰
۷۵	۲۳/۴۹	۵/۹۶	۱۰۱/۳۰	۱۴/۷۸
۹۰	۲۸/۲۵	۷/۰۸	۷۳/۱۳	۱۴/۸۵



شکل ۸ میدان جریان و سرعت نرمال شده (U_δ) در امتداد بخش مرکزی دره برای نسبت منطری ۱ (حالات ۱-۴) و نسبت منطری ۴ (حالات ۵-۸) با شرایط بدون گرما و با گرمایش دیواره‌ها بر اساس ساعت روز و جهت تابش خورشید [۳۵].

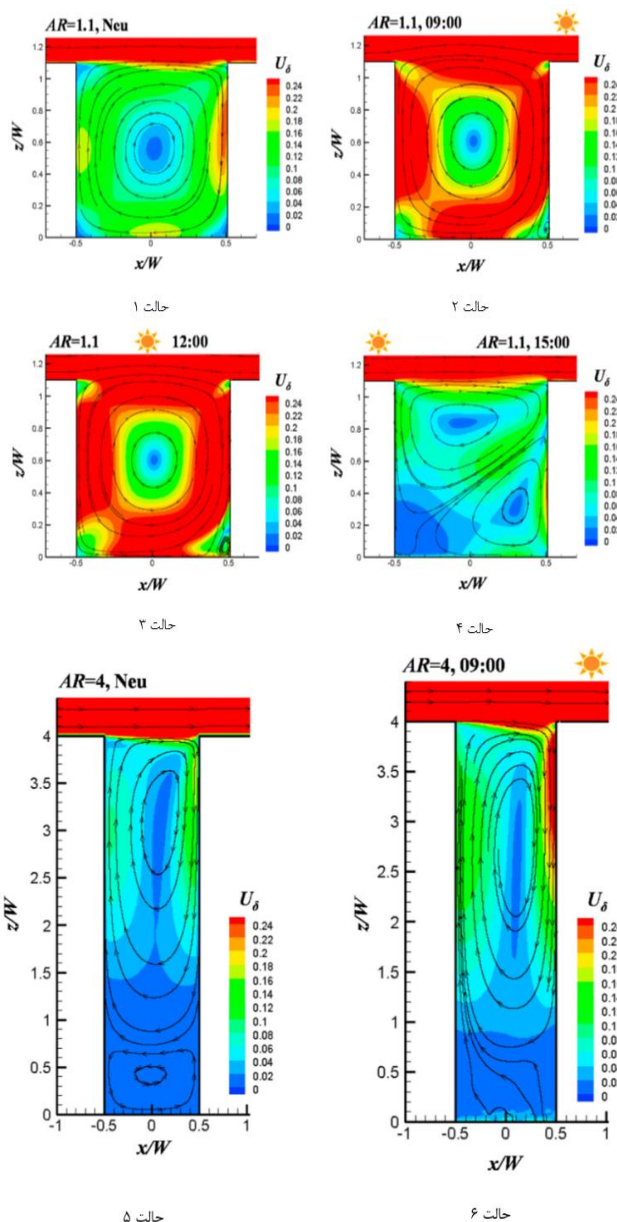
۴-۳- اثرات پوشش دهی جاده

زی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۰ تاثیرات پوشش دهی سطوح جاده بر کاهش غلظت آلاینده در یک دره خیابان شهری را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک دره خیابان با نسبت ابعاد واحد که در آن ارتفاع ساختمان و عرض خیابان برابر با ۲۰ متر و سطح خیابان آن به کمک نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم پوشش دهی شده بود را مطابق شکل ۹ و ۱۰ را به کمک نرم افزار فلوئنت به صورت ۲ بعدی و با در نظر گرفتن واکنش شیمیایی بین آلاینده‌ها و شرط مرزی همدمای برای تمامی دیواره‌ها شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی که تغییرات رطوبت نسبی و میزان تابش در نظر گرفته شده بود، مشخص گردید که پوشش دهی سطح جاده باعث کاهش غلظت آلاینده‌های نیتریک اکسید و نیتروژن دی اکسید به میزان ۳/۷ و ۴/۳۱ درصد خواهد شد. علاوه بر آن در این بررسی مشخص شد که با افزایش رطوبت نسبی میزان غلظت آلاینده کاهش ولی با افزایش میزان تابش سطوح، غلظت آلاینده افزایش خواهد یافت.



شکل ۹ دره خیابان مورد بررسی به صورت گرافیکی [۲۵].

بر سطح زمین می‌تابد، دیواره سمت بادگیر (ساعت ۹ صبح) و دیواره رو به باد (ساعت ۳ بعد از ظهر) در نظر گرفت. چن و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۲۱ به بررسی اثرات گرمایش ناشی از تابش خورشید بر دیواره‌های یک دره خیابان با در نظر گرفتن نسبت‌های ابعادی متفاوت مطابق شکل ۸ پرداختند بر این اساس زمانی که دیواره بادگیر یا سطح زمین گرم شوند در دره‌های کم عمق (حالت ۲ و ۳) گردش تک گردابه اصلی تقویت و در دره‌های عمیق (حالت ۶ و ۷) ساختار دو گردابه‌ای به یک گردابه‌ای تبدیل می‌شوند، که باعث بهبود کیفیت هوا در دره خیابان می‌شود. اما زمانی که دیواره رو به باد گرم شود در دره‌های کم عمق (حالت ۴) گردابه اصلی تغییر شکل داده و به تدریج یک گردابه فرعی در نزدیکی پایین دره ایجاد می‌شود همچنین برای دره‌های عمیق (حالت ۸) با تخریب ساختار جریان یک گردابه‌ای فرعی را به لایه پایینی اضافه می‌کند.



۳-۵-۱-۱- یرچین ها^۱

۳-۵-۱-۲-درختان

شکل ۱۰ دره خیابان مورد بررسی، توسط زی و همکاران [۲۵].

۳-۵- اثر وجود موانع

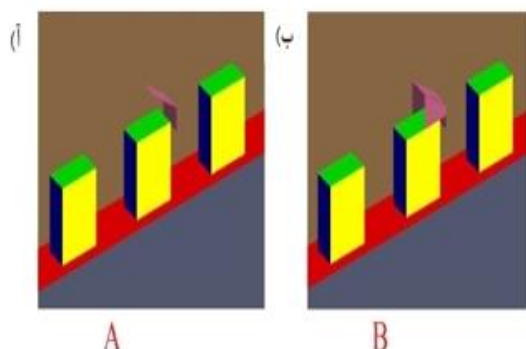
٣-٥-١- موانع متخلخل

پوشش‌های گیاهی از جمله درختچه‌ها و درختان به عنوان یک مانع متخلخل بین منابع آلاینده (اگزوز وسایل نقلیه)، ساکنان

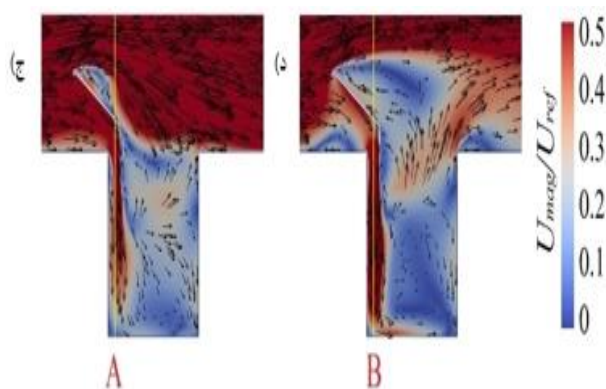
۱۲

۳-۵-۲-۱- بادگیرها

مطابق شکل ۱۱ بادگیرها سازه‌هایی هستند که بر روی ساختمان‌های مشخص برای رقیق‌تر کردن غلظت آلاینده‌ها در دره خیابان مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مهم‌ترین مزایا بادگیرها عدم اشغال فضای دره خیابان است. استفاده از بادگیرها می‌تواند سطوح غلظت آلاینده‌ها را در بهترین حالت تا ۳۷ درصد کاهش دهد [۴۶].



شکل ۱۱ الف) بادگیر و ب) بادگیر با دیواره‌های جانبی [۴۷].



ادامه شکل ۱۱ خطوط و بردارهای سرعت نرمال شده در دره خیابان برای (ج) بادگیر و (د) بادگیر با دیواره‌های جانبی [۴۷].

۳-۵-۲-۲- ساختمان‌های بالا برده شده

مطابق شکل ۱۲ به ساختمان‌های بلند مرتبه‌ای گفته می‌شود که معمولاً طبقه همکف یا اول آن‌ها به صورت توخالی ساخته می‌شود که با ایجاد یک نفوذپذیری به ساختمان باعث بهبود شرایط باد و کاهش میزان غلظت آلاینده در سطح تنفس انسان می‌شود. لازم به ذکر است که این سازه‌ها محیط خیلی ناراحت

خیابان بهبود می‌یابد [۴۵]. اولیواردیا و همکاران [۲۰]، در سال ۲۰۲۱ رفتار اکسیدهای نیتروژن^۱ و اوزون^۲ را به عنوان آلاینده‌های واکنشی در یک دره خیابان واقعی با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی همراه با یک مدل واکنش شیمیایی و مدل تاج درخت برای ۴ حالت زیر مورد مطالعه قرار دادند؛

۱- در حالت اول از کلیه واکنش‌های شیمیایی یا فتوشیمیایی و گونه درختی صرف‌نظر شد.

۲- در حالت دوم، واکنش‌های شیمیایی توسط مدل‌های سی بی ام چهارم^۳ مدلسازی شد، اما گونه درختی استفاده نشد.

۳- در حالت سوم فرض شد که درختان در کنار جاده کاشته شده‌اند و واکنش‌های شیمیایی نیز در نظر گرفته شد. تراکم سطح برگ^۴ پوشش تاج درخت ۰/۴۲ در نظر گرفته شد.

۴- در حالت چهارم، درختان در کنار جاده کاشته شدند و واکنش‌های شیمیایی نیز در نظر گرفته شد. تراکم سطح برگ پوشش تاج درخت ۱/۵۹ در نظر گرفته شد.

نتایج نشان داد که تأثیر تاج درخت بر سرعت باد به میدان جریان بستگی داشت و در مکان‌هایی که سرعت باد بیشتر بود معنی‌دارتر بود. از طرفی تأثیر تاج درخت بر غلظت آلاینده‌ها در جاهایی که سرعت باد کمتر بود، معنی‌دار بود، زیرا سرعت باد کمتر، باعث رکود آلاینده‌ها و ایجاد فرصت برای واکنش شیمیایی می‌شد. با توجه به این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که واکنش‌های شیمیایی و اثر آیرودینامیکی تاج درخت بر رفتار آلاینده‌های واکنش پذیر در دره خیابان‌ها تأثیر مؤثری دارد. بدین ترتیب مطابق با اثرات آیرودینامیکی سایبان درختان، غلظت محلی اکسیدهای نیتروژن در آزمایش‌ها به ترتیب در بدترین حالت تا ۵۱ درصد افزایش و در بهترین حالت تا ۱۱ درصد کاهش یافت.

۳-۵-۲- موانع غیرمتخلخل

از جمله موانع غیرمتخلخل می‌توان به اتومبیل‌های پارک شده، موانع صوتی^۵ بادگیرها، ساختمان‌های بالا برده شده^۶ و نظایر آن اشاره نمود. برخی از موانع غیر متخلخل تأثیرات بیشتری در نحوه پراکندگی آلاینده‌های ناشی از دود خودروها و در نتیجه بهبود کیفیت هوا خواهند داشت.

⁵ Noise Barrier

⁶ Lift-up buildings

¹ NO_x

² O₃

³ Carbon Bond Mechanism IV

⁴ Leaf Area Density

غلظت آلاینده در دره خیابانی که خیابان آن به عرض ۱۲ متر و طول ۸۰ متر، توسط ساختمان‌هایی به ارتفاع ۱۲ متر محصور شده است را به کمک روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ در فلوئنت شبیه‌سازی کردند. آن‌ها چهار حالت مختلف زیر را در نظر گرفتند.

۱- دره خیابان بدون بالکن باشد.

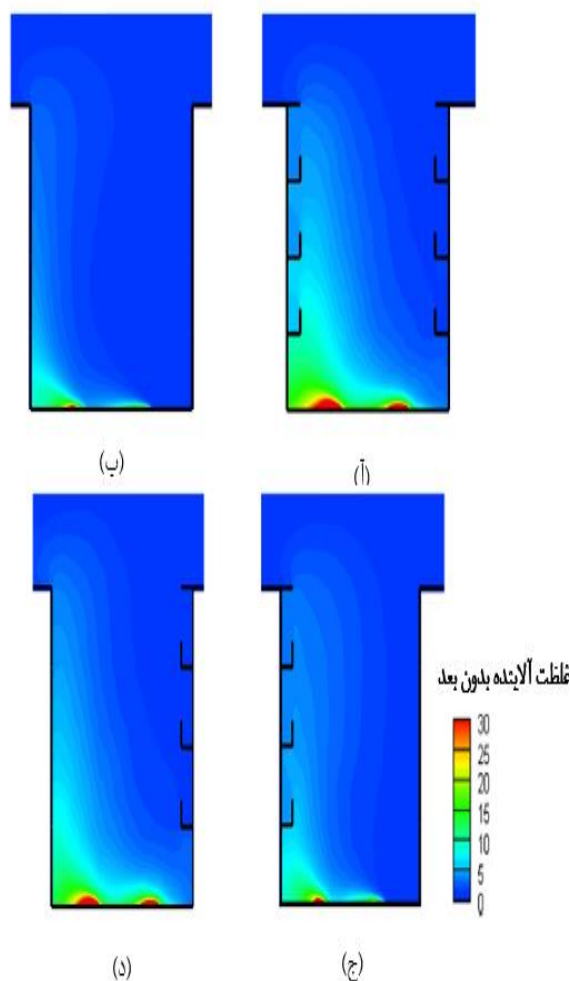
۲- بالکن‌ها در دو دیواره رو به باد و پشت باد قرار گرفته باشند.

۳- بالکن‌ها فقط در دیواره رو به باد قرار گرفته باشد.

۴- بالکن‌ها فقط در دیواره پشت به باد قرار گرفته باشد.

مطابق با شکل ۱۳ اساساً وجود بالکن باعث بیشتر شدن غلظت آلاینده در دره خیابان خواهد شد که وجود بالکن در سمت رو به باد بیشترین تاثیر را در بدتر کردن کیفیت هوای ساکنین خواهد داشت.

در جدول ۷ مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف وجود بالکن در برابر نبودن بالکن در دره خیابان شبیه‌سازی شده، آمده است.



شکل ۱۳ حالت‌های مختلف در نظر گرفتن بالکن در دره خیابان [۵۰].

(آ) هر دو سمت بالکن باشد، (ب) هر دو سمت بالکن نباشد،

(ج) سمت بادگیر بالکن باشد، (د) سمت رو به باد بالکن باشد.

کننده‌ای بواسطه افزایش سرعت باد برای عابران و ساکنان خود در فصول سرد سال ایجاد نمی‌کنند [۳۶]. در صورت استفاده از روش ساختمان‌های بالا برده شده می‌توان میزان غلظت آلاینده‌ها را مطابق جدول ۶ کاهش داد.



شکل ۱۴ یک ساختمان بالابر با ستون‌های جانبی در دانشگاه پلی تکنیک، هانگ هوم، هنگ کنگ [۴۸].

جدول ۶ میزان کاهش غلظت آلاینده برحسب طبقات [۴۹].

میزان کاهش غلظت آلاینده (به درصد)	بالا بردن طبقه از سطح زمین ساختمان (۱)
۳۴-۵۰	طبقه هم‌کف
۲۹-۳۸	طبقه اول
۶-۲۵	طبقه دوم

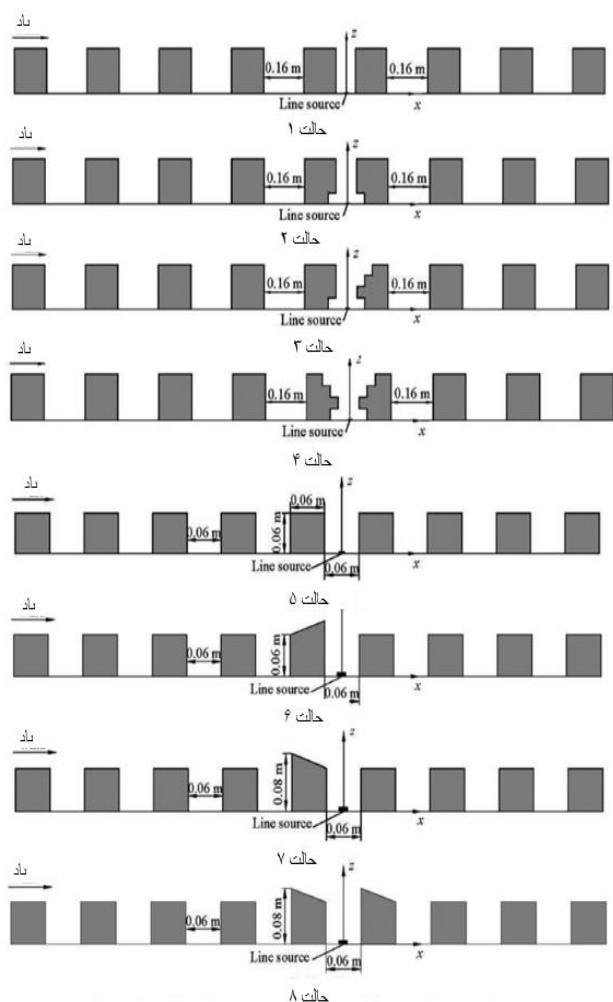
(۱) بالا بردن طبقه ساختمان از سطح زمین یعنی در نظر گرفتن یک فضای خالی مثلاً به ازای هر طبقه ۳ متر از سطح زمین که تنها در این فاصله ستون‌های ساختمانی قرار گرفته‌اند.

۳-۲-۵-۳- اثرات بالکن

در بررسی‌های انجام شده مشخص شد که یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان غلظت آلاینده در دره‌های خیابان شهری وجود بالکن‌ها در ساختمان‌ها می‌باشد. اثرات بالکن بر پراکندگی آلاینده در بیشتر شبیه‌سازی‌های عددی بواسطه‌ی ساده‌سازی‌های هندسی در نظر گرفته نمی‌شود که باعث کمتر تخمین زدن میزان آلاینده‌های موجود در دره خیابان می‌شود. خوشبختانه محققان در سال‌های اخیر به اهمیت در نظر گرفتن بالکن جهت نزدیک شدن نتایج حاصل از شبیه‌سازی به نتایج واقعی پرداخته‌اند. در سال ۲۰۲۲ ژنگ و همکاران [۵۰] تاثیر چیدمان بالکن‌ها در ساختمان‌های رو به باد و بادگیر بر میزان

۳-۶- اثرات پیکربندی و سقف ساختمان‌ها

پیکربندی ساختمان‌ها بر ساختار و نحوه پراکندگی آلاینده‌های تولیدی در دره خیابان‌ها اثر می‌گذارد [۲۸]. هیوانگ و همکاران [۵۳]. با استفاده از تونل باد دانشگاه علم و فناوری شانگهای به بررسی تاثیر پیکربندی‌های مختلف ساختمان و همچنین تاثیر شکل سقف ساختمان‌ها بر روی پراکندگی آلاینده‌ها پرداختند. آن‌ها مطابق شکل ۱۵ برای یک دره خیابان شهری ۸ حالت مختلف را در نظر گرفتند. غلظت آلاینده (دود) در داخل دره‌ها بر اساس روش پراکندگی نور اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۱۶ آمده است. بر این اساس مشخص می‌شود، زمانی که ساختمان‌ها به صورت ۳ سطحی، با یک عقب نشینی که ایجاد راهرو در دو طرف خیابان می‌کند (حالت‌های ۳ و ۴) میزان غلظت آلاینده در سمت رو به باد بیشتر از سمت بادگیر است.

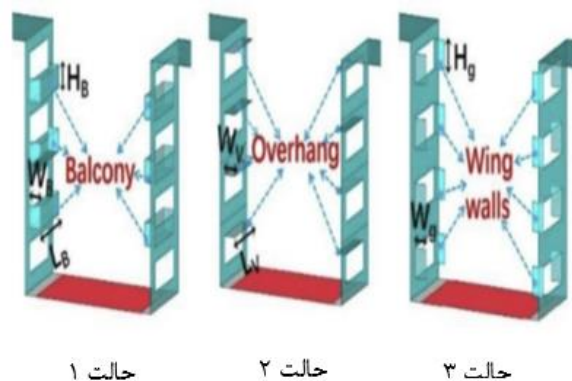


شکل ۱۵ پیکربندی‌های مختلف ساختمان‌ها در دره خیابان مورد مطالعه [۵۳].

جدول ۷ تاثیر بالکن بر سرعت متوسط و غلظت بدون بعد [۵۰].

وجود بالکن در سمت پشت به باد	وجود بالکن در سمت رو به باد	وجود بالکن در هر دو سمت	
سرعت متوسط در مرکز	کاهش نسبت به حالت بدون بالکن	کاهش نسبت به حالت بدون بالکن	۵۱ درصد
غلظت بدون بعد	افزایش نسبت به حالت بدون بالکن	افزایش نسبت به حالت بدون بالکن	۱۰۶ درصد

مورنا و مله [۵۱] در سال ۲۰۱۶ با الهام از اقلیم شهر ناپل به بررسی تاثیر عمق بالکن و فاصله‌ی افقی دو بالکن بر نحوه‌ی انتشار آلاینده در دره خیابانی با نسبت ابعاد ۳ پرداختند. در این بررسی مشخص شد که عمق و فاصله‌ی افقی دو بالکن دو عامل مهم در تشدید غلظت آلاینده در دره خیابان‌های عمیق خواهد بود. بر این اساس وجود بالکن به نوبه‌ی خود بر ساختار جریان تاثیر می‌گذارد و یک سوال اساسی این است که آیا شکل پوششی ساختمان (نمای ساختمان) هم در میزان غلظت آلاینده تاثیرگذار است؟ در سال ۲۰۲۰ کوی و همکاران [۵۲] سه حالت مختلف را برای برآمدگی دیواره‌های یک دره خیابان با نسبت‌های منطقی مختلف در نظر گرفتند. آن‌ها مطابق شکل ۱۴ تاثیر بالکن‌ها^۱، طاق‌نماها^۲ و دیوارهای جانبی^۳ را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند و دریافتند که دیوار جانبی کمترین تاثیر و طاق‌نما بیشترین تاثیر را بر افزایش غلظت آلاینده در یک دره خیابان خواهد داشت و برجسته‌ترین تفاوت در نسبت ابعاد ۳ و بیشتر اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۱۴ حالت‌های متفاوت بالکن در یک دره خیابان شهری [۵۲].

³ Wing walls

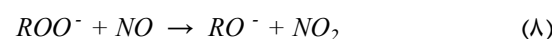
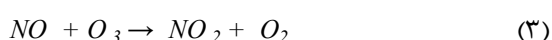
⁴ Light scattering technique

¹ Balcony

² Overhang

۳-۷- واکنش‌های شیمیایی

یکی از اصلی‌ترین ساده‌سازی‌ها جهت کاهش هزینه محاسباتی در شبیه‌سازی‌ها در نظر نگرفتن واکنش‌های شیمیایی بین آلاینده‌های منتشر شده از اگزوز خودروها و منابع آلاینده است. طبق گفته واردالوکیس و همکاران [۵۵]، اکثر آلاینده‌های موجود در دره خیابان مانند مونوکسیدکربن و سایر ترکیبات کربنی را می‌توان به عنوان گونه‌های عملاً بی اثر در نظر گرفت زیرا مدت زمان لازم برای واکنش دادن این آلاینده‌ها با یکدیگر بسیار بیشتر از زمانی است که این آلاینده‌ها در دره خیابان حضور دارند (زمان ماند). اما نکته‌ی حائز اهمیت وجود سایر آلاینده‌ها از جمله: اکسیدهای نیتروژن، اوزن و ترکیبات آلی فرار است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. NO که بیشتر NOx منتشر شده به عنوان گاز خروجی خودرو را تشکیل می‌دهد، با اوزن موجود در جو واکنش می‌دهد تا از طریق به اصطلاح واکنش تیتراسیون، NO2 تولید کند. NO2 با فوتولیز در حضور نور ماوراء بنفش به NO و رادیکال‌های اکسیژن تبدیل می‌شود. رادیکال‌های اکسیژن با اکسیژن واکنش داده و O3 تولید می‌کنند. ترکیبات آلی فرار همچنین رادیکال تولید می‌کنند و تبدیل NO به NO2 را افزایش می‌دهند. بنابراین، غلظت NO، NO2 و O3 در هوای کنار جاده نه تنها تحت تأثیر غلظت محیط و سطح انتشار هر آلاینده، بلکه تحت تأثیر تابش خورشیدی و غلظت ترکیبات آلی فرار نیز قرار می‌گیرد. روابط ۳-۸ این واکنش‌ها را بیان می‌کند [۲۰].

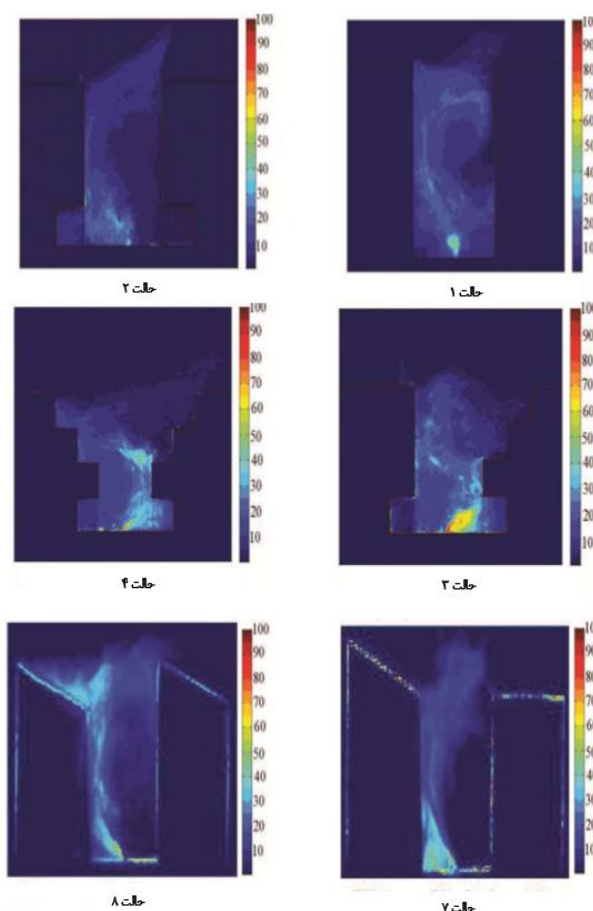


در نظر گرفتن واکنش‌های شیمیایی کمک شایانی به نزدیک‌تر شدن نتایج با واقعیت می‌کند.

۳-۸- حجم ترافیک

یکی از مواردی که می‌توان به کمک آن وضعیت کیفیت هوای دره خیابان‌های شهری را بهبود بخشید، تلاش برای کاهش آلاینده‌های تولیدی از سوی وسایل نقلیه موتوری است، که

زمانی که سقف ساختمان‌ها به صورت گوه‌ای شکل رو به بالا و یا رو به پایین ساخته شود (حالت ۸) در میزان غلظت آلاینده و نحوه‌ی پراکندگی آن نیز تغییرات عمده‌ای ایجاد می‌کند و در این حالت‌ها به طور کلی غلظت آلاینده در سمت بادگیر بسیار بیشتر از سمت رو به باد است. چنانچه از ترکیب سقف گوه‌ای- مسطح (حالت ۶) استفاده شود تمرکز آلاینده‌ها در پایین سمت بادگیر و اگر از ترکیب سقف گوه‌ای رو به پایین - گوه‌ای رو به پایین (حالت ۸) استفاده شود تمرکز آلاینده در بالای سمت بادگیر خواهد بود. شیب سقف‌های شیبدار ساختمان‌های واقع در یک دره خیابان شهری تأثیر بسیار مهمی در پراکندگی آلاینده‌ها و میزان غلظت آلاینده در خیابان دارد. ون و اپشتین [۵۴] در سال ۲۰۱۸ یک مطالعه‌ی پارامتری ۲بعدی برای مشخص کردن تأثیر ارتفاع سقف در پراکندگی آلودگی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. در این بررسی نشان داده شده است که سقف‌های شیبدار منجر به افزایش میانگین غلظت آلودگی هوا و در برخی حالات ایجاد کانون‌های شدید آلودگی در سمت بادگیر می‌شوند و سقف‌های شیبدار به ندرت برای تهویه دره خیابان‌ها مفید هستند.



شکل ۱۶ توزیع آلاینده در صفحه مرکزی دره در حالت‌های مختلف [۵۳].

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی شاخص‌ها و استانداردهای آلودگی هوا می‌پردازد. برای کاهش بیماری‌های قلبی و ریوی لازم است آلاینده‌ها را به صورت منظم پایش نمود و هر چه تعداد آلاینده‌های مورد بررسی بیشتر باشد شاخص انتخاب شده برای کیفیت هوا قابل اطمینان‌تر است. برای دقیق‌تر شدن نتایج می‌توان از شاخص‌هایی که واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌ها را هم در نظر می‌گیرند استفاده نمود. دره خیابان‌های شهری به مکان‌هایی گفته می‌شود که خیابان توسط ساختمان‌های بلند مرتبه احاطه شده باشد. این ساختارها باعث تشدید آلودگی هوا می‌شود که کیفیت هوای ساکنین را تهدید کرده و سلامت آن‌ها را به خطر می‌اندازد. یکی از گام‌های مهم برای بهبود کیفیت هوای شهری، شهرسازی بر اساس در نظر گرفتن عوامل موثر بر تهویه دره خیابان شهری است که می‌توان به سرعت باد، جهت باد غالب، نسبت منطری، اثرات دما، کاشت درختان، موانع، اثرات سقف، نرخ ترافیک، میزان آلاینده‌گی وسایل نقلیه اشاره نمود. هر یک از عوامل یاد شده تأثیری متفاوت بر بهبود تهویه دره خیابان‌های شهری دارد که بیشترین تأثیر را عواملی نظیر نسبت منطری، سرعت باد، جهت باد غالب، پیکربندی ساختمان، شکل سقف و کاشت درختان دارند اما در مقابل کمترین تأثیر را اثرات دما، گرمایش دیواره‌های ساختمان، پوشش‌دهی جاده و نرخ ترافیک وسایل نقلیه ایفا می‌کند. در تحقیقات اخیر سعی شده تا اثرات تعاملی و ترکیبی پارامترهای موثر نیز مد نظر قرار گیرد. این امر به نزدیک‌تر شدن نتایج به واقعیت‌های موجود در دره خیابان‌های شهری کمک می‌کند و بررسی‌ها را از حالت ایده‌آل به حالت واقعی نزدیک‌تر می‌کند. نتایج این تحقیق می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان عرصه شهرسازی و محیط زیست در مدیریت درست انباشتگی ساخت و سازهای شهری و کنترل کیفیت هوا در شهرهای بزرگ کمک نماید.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

نسبت ابعاد	AR
نقطه شکستی که بزرگتر یا مساوی C_p	BP_{Hi}
نقطه شکستی که کوچکتر یا مساوی C_p	BP_{Lo}
غلظت اندازه‌گیری شده (گردشده) برای آلاینده P	C_p
نورخورشید	hv
شاخص کیفیت هوا برای آلاینده p	I_p

می‌توان از طریق روش‌های مختلف نظیر آرام کردن ترافیک و کاهش حجم ترافیک و یا عدم اجازه تردد به وسایل نقلیه‌ای که حداقل‌های تعیین شده آلاینده‌گی را ندارند برآورده نمود. مارک بوگاچکی و همکاران [۵۶]. در سال ۲۰۲۰ ارزیابی تأثیر سازمان‌دهی مجدد ترافیک جاده‌ای بر کیفیت هوا در یک دره خیابان در شهر کراکوف لهستان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مطابق شکل ۱۷ یک خیابان که شامل ۳۶ متر عرض و ۱۲۰ متر طول که توسط ساختمان‌هایی با ارتفاع ۱۸ تا ۲۱ متر محصور شده بود را با ۳ سناریو زیر؛

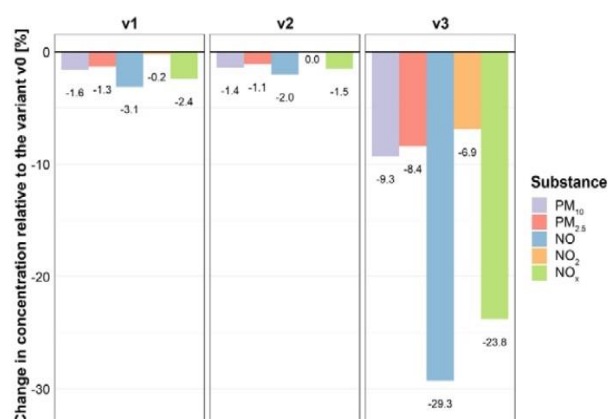
۱- باریک کردن مقطع خیابان با حذف یک لاین در هر دو جهت.
۲- محدود کردن حداکثر سرعت از ۷۰ کیلومتر در ساعت به ۵۰ کیلومتر در ساعت.

۳- مجاز کردن فقط خودروهای سواری و تجاری سبک در خیابان‌هایی که استاندارد یورو ۴ یا بالاتر را دارند،

را مورد ارزیابی قرار دادند. در این بررسی مطابق شکل ۱۸ بهترین نتیجه برای سناریو ۳ رقم خورد. سناریویی که باعث کاهش میانگین سالانه غلظت PM_{10} و $PM_{2.5}$ ، حدود ۸-۹٪ و برای NO_x تقریباً ۳۰٪ می‌شود.



شکل ۱۷ خیابان مورد بررسی در شهر کراکوف لهستان [۵۶].



شکل ۱۸ مقایسه سناریوهای مختلف جهت کاهش سطح آلاینده [۵۶].

- [9] Gromke, C., & Ruck, B., Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—experimental investigation of the flow and concentration field, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 16, pp. 3287-3302, (2007).
- [10] Allegrini, J., A wind tunnel study on three-dimensional buoyant flows in street canyons with different roof shapes and building lengths, *Building and Environment*, Vol. 143, pp. 71-88, (2018).
- [11] Dallman, A., Magnusson, S., Britter, R., Norford, L., Entekhabi, D., & Fernando, H. J., Conditions for thermal circulation in urban street canyons, *Building and Environment*, Vol. 80, pp. 184-191, (2014).
- [12] Chew, L. W., Glicksman, L. R., & Norford, L. K., Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales, *Building and Environment*, Vol. 146, pp. 77-87, (2018).
- [13] Salim, S. M., Buccolieri, R., Chan, A., & Di Sabatino, S., Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: Comparison between RANS and LES, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 2-3, pp. 103-113, (2011).
- [14] Reiminger, N., Vazquez, J., Blond, N., Dufresne, M., & Wertel, J., CFD evaluation of mean pollutant concentration variations in step-down street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 196, pp. 104032, (2020).
- [15] Akhter, M. N., Ali, M. E., Rahman, M. M., Hossain, M. N., & Molla, M. M., Simulation of air pollution dispersion in Dhaka city street canyon. *AIP Advances*, Vol. 11, No. 6, pp. 065022, (2021).
- [16] Niroobakhsh, A., Hassanzadeh, S., & Hoseinibalam, F., Flow and pollution concentration large-Eddy simulation and transition conditions for different street canyons and wind speeds: Environmental pollution reduction approach, *Urban Climate*, Vol. 35, pp. 100731, (2021).
- [17] Zheng, X., & Yang, J., Impact of moving traffic on pollutant transport in street canyons under perpendicular approach wind: An CFD analysis using large-eddy simulations, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 82, pp. 103911, (2022).
- [18] Zhang, Y., Gu, Z., & Yu, C. W., Impact factors on airflow and pollutant dispersion in urban street canyons and comprehensive simulations: A review. *Current Pollution Reports*, Vol. 6, No. 4, pp. 425-439, (2020).

I_{Hi}	مقدار شاخص کیفیت هوا منطقه با BP_{Hi}
R^-	رادیکال آزاد
I_{Lo}	مقدار شاخص کیفیت هوا منطقه با BP_{Lo}
$K-\varepsilon$	مدل توربولانسی ۲ معادله‌ای
NO	نیتروژن اکسید
NO_2	نیتروژن دی اکسید
NO_x	اکسیدهای نیتروژن
O_3	گاز اوزن
O_2	گاز اکسیژن
PM_{10}	ذراتی که دارای قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر

۶- مراجع

- [1] Pruss-Ustun, A., Wolf, J., Corvalán, C. F., Bos, R., Neira, M., Preventing disease through healthy environments: towards an estimate of the environmental burden of disease, *World Health Organization*, (2006).
- [2] Organization, W. H., Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks, *World Health Organization*, (2009).
- [3] Organization, W. H., & Environment, W. E. C. f., WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, *World Health Organization*, (2021).
- [4] Brugge, D., Durant, J. L., & Rioux, C., Near-highway pollutants in motor vehicle exhaust: a review of epidemiologic evidence of cardiac and pulmonary health risks, *Environmental health*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-12, (2007).
- [5] Nunez, M., & Oke, T. R., The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 16, No. 1, pp. 11-19, (1977).
- [6] Lien, F., Yee, E., & Cheng, Y., Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, No. 2, pp. 117-158, (2004).
- [7] Richmond-Bryant, J., Isukapalli, S., & Vallero, D., Air pollutant retention within a complex of urban street canyons, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 40, pp. 7612-7618, (2011).
- [8] Karra, S., Malki-Epshtein, L., & Neophytou, M. K.-A., Air flow and pollution in a real, heterogeneous urban street canyon: A field and laboratory study, *Atmospheric Environment*, Vol. 165, pp. 370-384, (2017).

- [29] Gonzalez Olivardia, F. G., Zhang, Q., Matsuo, T., Shimadera, H., & Kondo, A, Analysis of pollutant dispersion in a realistic urban street canyon using coupled CFD and chemical reaction modeling. *Atmosphere*, Vol. 10, No. 9, pp. 479, (2019).
- [30] Zhao, Y., Jiang, C., & Song, X., Numerical evaluation of turbulence induced by wind and traffic, and its impact on pollutant dispersion in street canyons. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 74, pp. 103142, (2021).
- [31] Alamy Stock Photo., Broadway urban canyon, URL <https://www.alamy.com/stock-photo-broadway-urban-canyon-soho-manhattan-new-york-city-124313203.html>, (2016).
- [32] Oke, T. R., Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings*, Vol. 11, No. 1-3, pp. 103-113, (1988).
- [33] Chan, T. L., Dong, G., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Hung, W., Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon, *Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 5, pp. 861-872, (2002).
- [34] Yazid, A. W. M., Sidik, N. A. C., Salim, S. M., & Saqr, K. M., A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies, *Simulation*, Vol. 90, No. 8, pp. 892-916, (2014).
- [35] Chen, L., Hang, J., Chen, G., Liu, S., Lin, Y., Mattsson, M., Sandberg, M., & Ling, H., Numerical investigations of wind and thermal environment in 2D scaled street canyons with various aspect ratios and solar wall heating, *Building and Environment*, Vol. 190, pp. 107525, (2021).
- [36] Buccolieri, R., Carlo, O. S., Rivas, E., & Santiago, J. L., Urban Obstacles Influence on Street Canyon Ventilation: A Brief Review. *Environmental Sciences Proceedings*, Vol. 8, No. 1, pp. 11, (2021).
- [37] Huang, Y., Lei, C., Liu, C.-H., Perez, P., Forehead, H., Kong, S., & Zhou, J. L., A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons, *Environmental Pollution*, Vol. 280, pp. 116971, (2021).
- [38] Gallagher, J., Baldauf, R., Fuller, C. H., Kumar, P., Gill, L. W., & McNabola, A., Passive methods for improving air quality in the built environment: A review of porous and solid barriers, *Atmospheric Environment*, Vol. 120, pp. 61-70, (2015).
- [39] Jeanjean, A. P., Monks, P. S., & Leigh, R. J., Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and
- [19] Kanchan, K., Gorai, A. K., & Goyal, P., A review on air quality indexing system, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, Vol. 9, No. 2, pp. 101-113, (2015).
- [20] Gonzalez Olivardia, F. G., Matsuo, T., Shimadera, H., & Kondo, A., Impacts of the Tree Canopy and Chemical Reactions on the Dispersion of Reactive Pollutants in Street Canyons, *Atmosphere*, Vol. 12, No. 1, pp. 34, (2021).
- [21] Fino, A., Vichi, F., Leonardi, C., & Mukhopadhyay, K., An overview of experiences made and tools used to inform the public on ambient air quality, *Atmosphere*, Vol. 12, No. 11, pp. 1524, (2021).
- [22] Li, X.-X., Liu, C.-H., & Leung, D. Y., Development of $k-\epsilon$ model for the determination of air exchange rates for street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 38, pp. 7285-7296, (2005).
- [23] Huang, Y.-D., Hou, R.-W., Liu, Z.-Y., Song, Y., Cui, P.-Y., & Kim, C.-N., Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 19, No. 5, pp. 1152-1171, (2019).
- [24] Fellini, S., Ridolfi, L., & Salizzoni, P., Street canyon ventilation: Combined effect of cross-section geometry and wall heating. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146, No. 730, pp. 2347-2367, (2020).
- [25] Xie, X., Hao, C., Huang, Y., & Huang, Z., Influence of TiO₂-based photocatalytic coating road on traffic-related NO_x pollutants in urban street canyon by CFD modeling. *Science of the Total Environment*, Vol. 724, pp. 138059, (2020).
- [26] Sun, D. J., & Zhang, Y., Influence of avenue trees on traffic pollutant dispersion in asymmetric street canyons: Numerical modeling with empirical analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 65, pp. 784-795, (2018).
- [27] Li, Z., Ming, T., Liu, S., Peng, C., de Richter, R., Li, W., Zhang, H., & Wen, C.-Y., Review on pollutant dispersion in urban areas-part A: Effects of mechanical factors and urban morphology. *Building and Environment*, Vol. 190, pp. 107534, (2021).
- [28] Nguyen, V. T., Nguyen, T. C., & Nguyen, J., Numerical simulation of turbulent flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *Atmosphere*, Vol. 10, No. 11, pp. 683, (2019).

- [48] Zhang, X., Tse, K.-T., Weerasuriya, A. U., Li, S., Kwok, K. C., Mak, C. M., Niu, J., & Lin, Z., Evaluation of pedestrian wind comfort near 'lift-up' buildings with different aspect ratios and central core modifications, *Building and Environment*, Vol. 124, pp. 245-257, (2017).
- [49] Sha, C., Wang, X., Lin, Y., Fan, Y., Chen, X., & Hang, J., The impact of urban open space and 'lift-up' building design on building intake fraction and daily pollutant exposure in idealized urban models, *Science of the Total Environment*, Vol. 633, pp. 1314-1328, (2018).
- [50] Zheng, X., Montazeri, H., & Blocken, B., Impact of building façade geometrical details on pollutant dispersion in street canyons, *Building and Environment*, Vol. 212, pp. 108746, (2022).
- [51] Murena, F., & Mele, B., Effect of balconies on air quality in deep street canyons, *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1004-1012, (2016).
- [52] Cui, D., Li, X., Du, Y., Mak, C. M., & Kwok, K., Effects of envelope features on wind flow and pollutant exposure in street canyons, *Building and Environment*, Vol. 176, pp. 106862, (2020).
- [53] Huang, Y.-d., Zeng, N.-b., Liu, Z.-y., Ye, S., & Xuan, X., Wind tunnel simulation of pollutant dispersion inside street canyons with galleries and multi-level flat roofs, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 28, No. 5, pp. 801-810, (2016).
- [54] Wen, H., & Malki-Epshtein, L., A parametric study of the effect of roof height and morphology on air pollution dispersion in street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 175, pp. 328-341, (2018).
- [55] Vardoulakis, S., Fisher, B. E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N., Modelling air quality in street canyons: a review, *Atmospheric Environment*, Vol. 37, No. 2, pp. 155-182, (2003).
- [56] Bogacki, M., Oleniacz, R., Rzeszutek, M., Bzdziuch, P., Szulecka, A., & Gorzelnik, T., Assessing the impact of road traffic reorganization on air quality: a street canyon case study, *Atmosphere*, Vol. 11, No. 7, pp. 695, (2020).
- deposition at a city scale, *Atmospheric Environment*, Vol. 147, pp. 1-10, (2016).
- [40] Abhijith, K., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., & Pulvirenti, B., Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments—A review, *Atmospheric Environment*, Vol. 162, pp. 71-86, (2017).
- [41] Gromke, C., Jamarkattel, N., & Ruck, B., Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons, *Atmospheric Environment*, Vol. 139, pp. 75-86, (2016).
- [42] Santiago, J.-L., Buccolieri, R., Rivas, E., Calvete-Sogo, H., Sanchez, B., Martilli, A., Alonso, R., Elustondo, D., Santamaría, J. M., & Martin, F., CFD modelling of vegetation barrier effects on the reduction of traffic-related pollutant concentration in an avenue of Pamplona, Spain. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 48, pp. 101559, (2019).
- [43] Kumar, P., Zavala-Reyes, J. C., Tomson, M., & Kalaiarasan, G., Understanding the effects of roadside hedges on the horizontal and vertical distributions of air pollutants in street canyons, *Environment international*, Vol. 158, pp. 106883, (2022).
- [44] Huang, Y.-d., Li, M.-z., Ren, S.-q., Wang, M.-j., & Cui, P.-y., Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon, *Building and Environment*, Vol. 165, pp. 106385, (2019).
- [45] Santiago, J.-L., Martilli, A., & Martin, F., On dry deposition modelling of atmospheric pollutants on vegetation at the microscale: Application to the impact of street vegetation on air quality, *Boundary-layer meteorology*, Vol. 162, No. 3, pp. 451-474, (2017).
- [46] Lauriks, T., Longo, R., Baetens, D., Derudi, M., Parente, A., Bellemans, A., Van Beeck, J., & Denys, S., Application of improved CFD modeling for prediction and mitigation of traffic-related air pollution hotspots in a realistic urban street, *Atmospheric Environment*, Vol. 246, pp. 118127, (2021).
- [47] Chew, L. W., Nazarian, N., & Norford, L., Pedestrian-level urban wind flow enhancement with wind catchers, *Atmosphere*, Vol. 8, No. 9, pp. 159, (2017).



رهیافتی بر طراحی یک جفت چرخدنده مربعی مشابه و ساخت به روش برشکاری لیزری

سامان
خلیل پور آذری*

استادیار،

دانشکده انرژی های تجدیدپذیر،
گروه مهندسی ساخت و تولید،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

چکیده: امروزه از چرخدنده های غیردایروی در مقاصد مختلفی که بارزترین آن ایجاد تغییرات سیکی در میزان سرعت و گشتاور در یک دور کامل است، برای طراحی و ساخت دستگاه های مختلف در صنایع رباتیک، نساجی و بسته بندی استفاده می شود. در این مقاله به بررسی روش طراحی یک جفت چرخدنده مربعی مشابه از جنس پلاستیک پرداخته شده است. طراحی پروفیل دندانه های چرخدنده با توجه به محاسبات ریاضی انجام و ترسیم شکل سه بعدی چرخدنده ها براساس این محاسبات آغاز گردید. سپس مدل سه بعدی چرخدنده ها در نرم افزار مونتاژ و حرکت آنها شبیه سازی شد. برای تولید چرخدنده های مربعی از فرآیند برشکاری لیزری استفاده گردید. بررسی نتایج و عدم بروز موانعی نظیر گیرکردن چرخدنده ها در هنگام چرخش، لقی دورانی نامناسب و یا عدم امکان مونتاژ پذیری به دلیل طراحی ابعاد نادرست، بیانگر صحت طراحی انجام شده می باشد. تطبیق نمودار سرعت زاویه ای چرخدنده محرک با شماره لوب نیز بیانگر صحت اجرای فرآیند شبیه سازی چرخدنده های مربعی می باشد.

واژه های راهنما: چرخدنده مربعی، طراحی، تولید، مونتاژ، برشکاری لیزری

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

An approach to design a pair of similar square gears and manufacture by laser cutting process

Saman

Khalilpourazary *

Assistant Professor,
Department of Renewable
Energy, Faculty of
Mechanical Engineering,
Urmia University of
Technology, Urmia

Abstract: Non-circular gears for their ability to create cyclic changes in the velocity and torque of the gears in each revolution employed for various purposes such as robotics, textile, and packaging industries. In this paper, the design methodology of a similar pair of plastic square gears is investigated. The design of gear profiles was performed according to complex mathematical calculations and the three-dimensional model of the gears was designed. Then the assembly of the gears was performed in CAD software and their motion was simulated. The laser cutting process was utilized to manufacture square gears. Examination of the results and the absence of special errors such as the gear's inappropriate meshing during rotation, improper backlash, or the impossibility of assembly due to incorrect dimensions design, indicate the accuracy of the design methodology. Moreover, the use of thin plastic sheets as raw material in the laser cutting process has prevented the laser beam from diverging and technical faults of gear samples. Comparing the angular speed of the driver gear with the lobe number also shows the accuracy of the square gear simulation process.

Keywords: Square gear, Design, Manufacturing, Assembly, Laser cutting process

۱- مقدمه

چرخنده‌های غیردایروی ابتکاری مهندسی و خلاقانه برای جایگزینی همزمان خواص بادمک‌ها و چرخنده‌های مرسوم با دایره گام دایروی در طراحی و ساخت تجهیزات مهندسی می‌باشد [۱]. همانند تمام چرخنده‌های رایج در دنیای ساخت و تولید، چرخنده‌های غیردایروی نیز برای انتقال حرکت دورانی بین محورها مورد استفاده قرار می‌گیرد با این تفاوت که در آنها برخلاف سایر انواع چرخنده‌ها، انتقال حرکت دورانی با تغییرات ممتد در نمودارهای سرعت و شتاب زاویه‌ای همراه می‌باشد. به عبارت دیگر تبدیل سرعت ورودی ثابت به سرعت خروجی متغیر و ایجاد حرکات نوسانی به شکل حرکت- سکون در هر سیکل چرخشی از مزایای مهم استفاده از چرخنده‌های غیردایروی است [۱]. این ویژگی زمینه را برای استفاده از این نوع چرخنده‌ها در مکانیزم‌های نیازمند سرعت‌های متغیر در طول سیکل حرکتی مشخص مانند دستگاه‌های نساجی، بسته‌بندی و نیز صنایع رباتیک فراهم آورده است [۲]. باید توجه داشت که آزادی عمل تولیدکننده برای طراحی و ساخت یک چرخنده غیردایروی بسیار بالا بوده و می‌تواند آنها را در اشکال متفاوتی مانند شکل‌های بیضوی و چندگوشه طراحی نماید که با استفاده از هر شکل خاص چرخنده، می‌توان حرکت خروجی متفاوتی را از مکانیزم ساخته شده، انتظار داشت. تفاوت دیگر چرخنده‌های غیردایروی با چرخنده‌های مرسوم دایروی را می‌توان مسطح بودن هندسه کلی این نوع چرخنده‌ها دانست که استفاده از آنها را به منظور بهینه‌سازی فضای مورد استفاده در ماشین‌های محرک و داشتن طراحی فشرده و کم‌حجم، تسهیل می‌نماید. از این رو در طی روند تاریخی توسعه چرخنده‌های غیردایروی همواره تلاش بر به کارگرفتن آنها در طراحی ماشین‌های اتوماتیک و ابزارهای اندازه‌گیری خاص بوده است. اولین تلاش‌ها در زمینه کاربرد عملی چرخنده‌های غیردایروی را می‌توان در تحقیقات کاربردی بورمستر در ساخت مکانیزم‌های حرکتی با سرعت متغیر در سال ۱۸۸۸ جستجو نمود [۲]. البته باید توجه داشت که تا سال‌های متمادی، فقدان روش ساخت مناسب برای چرخنده‌های غیردایروی، عاملی محدودکننده در کاربرد آنها بود. امروزه تمام محاسبات موردنیاز برای طراحی و ساخت چرخنده‌های غیردایروی براساس این تحقیقات و بر پایه طراحی چرخنده‌های بیضوی استوار است [۲]. به عبارت دیگر برای ورود به این حیطه از طراحی لزوم آشنایی با روند طراحی چرخنده‌های بیضوی ضروری است تا از طریق بسط، ترکیب و افزودن پارامترهای دیگر بتوان سایر انواع چرخنده‌های غیردایروی را

طراحی و تولید نمود. ساندی و همکاران در طی تحقیقات کاربردی انجام شده بر روی چرخنده‌های بیضوی علاوه بر معرفی دقیق‌تر مکانیزم حرکتی آنها، چرخنده‌های فوق را از نظر رابطه بین شکل چرخنده و سرعت حرکتی بررسی نمودند [۳]. آنها توانستند روشی خلاقانه و بهینه‌تر را برای تعیین شکل دندانه‌ها و منحنی گام چرخنده بیضوی ارائه دهند. همچنین آنها از طریق پیاده‌سازی سیستم طراحی و ساخت یکپارچه به کمک کامپیوتر موفق به تولید این نوع از چرخنده‌های غیردایروی به صورت کنترل اتوماتیک بر روی ماشین سی-ان-سی پنج محوره گردیدند [۳].

با توجه به موضوع مقاله حاضر و تمرکز خاص بر روی چرخنده‌های مربعی لازم به توضیح است که مقالات علمی در این زمینه به دلیل جدید بودن بحث، بسیار محدود بوده و تحقیق مستقلی با اشاره خاص در زمینه طراحی و ساخت چرخنده‌های مربعی وجود ندارد و در بیشتر مقالات به صورت جمعی به تمام چرخنده‌های غیر دایروی به صورت بسیار مختصر پرداخته شده است. از طرف دیگر اقتضای طراحی هر نوع چرخنده غیردایروی استفاده از روشی مستقل و کاراً است که مستقیماً بر کیفیت چرخنده‌ها و عملکرد آنها تأثیرگذار می‌باشد. بنابراین با توجه به گسترش روزافزون کاربرد این نوع چرخنده‌ها در صنایع مختلف و نبود تحقیقات مشابه در ایران، نوآوری اصلی این مقاله را می‌توان ارائه روشی منظم و دقیق برای طراحی و شبیه‌سازی حرکتی چرخنده‌های مربعی دانست که قبلاً در هیچ مقاله‌ای به آن به صورت موضوعی مستقل پرداخته نشده است. همچنین به دلیل پیچیدگی و هزینه بالای ساخت قالب در فرآیند تزریق پلاستیک و مشکلات این روش در ساخت قطعات با اندازه و پهنای زیاد و ضخامت کم مانند چرخنده‌های غیردایروی، در این مقاله روش برشکاری لیزری برای اولین بار جهت ساخت چرخنده‌های مربعی نوع پلاستیکی پیشنهاد گردیده است. در ادامه نویسنده جهت تبیین هر چه بیشتر عملکرد چرخنده‌های مربعی به دو مقاله کاربردی جدید اشاره نموده است.

انتقال گشتاور در ربات‌های با اندازه‌های مختلف، یکی از کاربردهای چرخنده مربعی می‌باشد. در یکی از تحقیقات ارائه شده، از چرخنده مربعی برای انتقال حرکت قابل کنترل در ربات رفع گرفتگی لوله‌های فاضلاب استفاده شده است. در این ربات با شناسایی مانع، روتور محرک شروع به حرکت کرده و گشتاور بالا را از طریق چرخنده‌های مربع شکل به چرخ‌های ربات منتقل می‌کند. تحقیقات نشان داد که استفاده از چرخنده‌های مربعی به عنوان گیربکس انتقال نیرو در این ربات سبب پایداری در انتقال نیرو شده و در موارد موردنیاز می‌توان حتی قدرت‌های

در درگیری چرخنده‌های غیردایروی، پروفیل دندانه‌ها باید به درستی با استفاده از یک چرخنده شانه‌ای مرجع مش‌بندی شود [۶]. این شرط زمانی محقق خواهد شد که خط مرجع چرخنده شانه‌ای به درستی بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی حرکت نماید. خط غلتش چرخنده غیردایروی (L)، در شکل ۱ و در مختصات قطبی به صورت $r(\rho) = L$ توصیف شده است. همچنین خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع (S) با فرم مشخص بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی حرکت می‌نماید. در اینصورت مختصات نقطه تماس P در درگیری دو چرخنده به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۶]:

$$P[X, Y] = [r(\rho) \cos(\rho), r(\rho) \sin(\rho)] \quad (1)$$

در اینصورت زاویه بین خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع و خط غلتش چرخنده غیردایروی به شکل رابطه (۲) است [۶]:

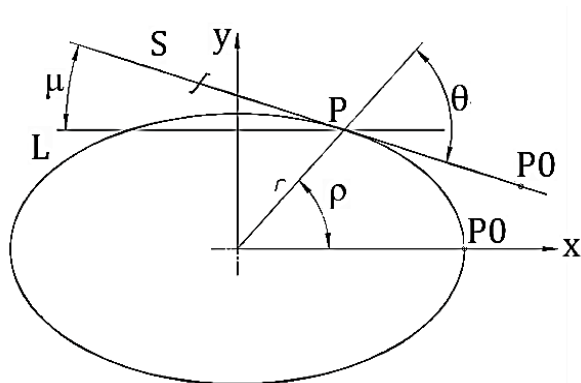
$$\theta = \arctg\left(\frac{r(\rho)}{\frac{dr}{d\rho}}\right) \quad (2)$$

بنابراین:

$$\mu = \rho - \theta \quad (3)$$

باید توجه داشت غلتش دو چرخنده در حالت $\rho = 0$ اتفاق می‌افتد و در این حالت خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی غلتیده و نقطه P_0 به نقطه P می‌رسد. بنابراین طول بین P_0 و P از خط L برابر با طول P_0 و P روی خط S می‌باشد. اگر L از i بخش l_i تشکیل شده باشد، نقطه تحلیل شده P مربوط به طول بخش‌های l_1 و l_2 از رابطه (۴) به دست می‌آید [۶]:

$$|w| = \sum_{n=1}^j l_n \quad (4)$$



شکل ۱ نحوه غلتش خط گام چرخنده شانه‌ای مرجع (S) بر روی خط غلتش چرخنده غیردایروی (L) [۶]

بیشتری را نیز از طریق گیربکس مربعی به چرخ‌ها منتقل نمود [۴]. در طرح تحقیقاتی دیگری برای طراحی سیستم انتقال قدرت در وسایل حمل و نقل اتوماتیک با کاربرد در سیستم‌های ذخیره‌سازی و انبارداری از چرخنده‌های مربعی استفاده شده است. برای کنترل تغییرات قدرت منتقل شده به چرخ‌ها در این سیستم‌های اتوماتیک از یک موتور جریان مستقیم استفاده شد که قابلیت انتقال گشتاور در محدوده سی کیلوگرم-سانتیمتر و میزان چرخش تا بازه ۵۰۰ دور را دارا بود. کاربرد این نوع چرخنده‌ها در این سیستم‌های محرک کارآیی مناسب آنها را برای انتقال و پایداری سیستم تأیید نموده است [۵].

در تحقیق حاضر، یک جفت چرخنده غیردایره‌ای مربعی شکل مشابه از جنس پلاستیک با تعیین پارامترهای هندسی طراحی شده و سپس مدل‌های کامپیوتری از آنها در نرم‌افزار تهیه شد. بعد از مونتاژ چرخنده‌ها و اجرای تحلیل بر روی نحوه حرکت و درگیری چرخنده‌ها و با تأیید نتایج به دست آمده، هر دو چرخنده با استفاده از فرآیند برشکاری لیزری تولید شد. روش برشکاری لیزری روشی مؤثر و دقیق برای تولید اینولوت خاص ایجاد شده در چرخنده‌های غیردایروی با دقت‌های بالا بوده و امروزه از آن می‌توان به عنوان یکی از روش‌های ماشینکاری مدرن به صورت وسیعی در تولید چرخنده‌های غیردایروی استفاده نمود.

۲- معرفی اصول طراحی چرخنده‌های غیردایروی

طراحی چرخنده‌های غیردایره‌ای دارای مشکلات زیادی به خاطر پیچیدگی فرم خاص دندانه‌ها می‌باشد که شامل محاسبات پیچیده ریاضی بوده و در اکثر نرم‌افزارهای طراحی مرسوم روش مناسبی برای طراحی این گونه از چرخنده‌ها ارائه نشده است. در این بخش ابتدا به روش محاسباتی برای طراحی فرم چرخنده‌های غیردایره‌ای اشاره می‌گردد. در چرخنده‌های غیردایره‌ای، هر سطح پهلویی هر دندانه متفاوت از دندانه مجاور است تا بتواند غلتش صحیح دو چرخنده را در طی دوران کامل و در زوایای متنوع تأمین نماید. البته در موارد بسیار نادر خصوصاً زمانی که بخشی از چرخنده غیردایروی دارای حالت مدور یا دایره‌ای باشد، می‌توان از اشکال یکسان برای طراحی دندانه‌ها فقط در آن قسمت چرخنده استفاده نمود [۱]. همین تفاوت فرم دندانه‌های مستقر بر روی محیط بیرونی چرخنده غیردایروی، کنترل کیفیت این نوع چرخنده‌ها را به امری بسیار حساس و دقیق بدل نموده و برای این کار به ناچار باید از دستگاه‌های خاصی استفاده نمود. به منظور جلوگیری از مشکلات احتمالی

چرخنده‌های بیضوی شکل، این مقدار برابر با عدد یک و در چرخنده‌های مثلثی و مربعی شکل، شماره لوب به ترتیب برابر با عدد سه و چهار می‌باشد که با افزایش شماره لوب تعداد گوشه‌های چرخنده غیردایروی افزایش یافته و شکل هندسی چرخنده تغییر می‌نماید.

۳- مواد و روشها

۳-۱- حصول به پارامترهای طراحی در چرخنده مربعی

در این تحقیق چرخنده‌های غیردایروی، مشابه و از نوع مربعی است، از این رو با توجه به روابط ارائه شده در قسمت قبل می‌توان پارامترهای اساسی برای طراحی چرخنده مربعی با شماره لوب چهار را تعیین نمود. برای این کار نویسنده تعداد دندانهای چرخنده مربعی را سی و دو عدد فرض کرده و براساس آن مقدار مدول چرخنده را با استفاده از روابط ارائه شده در بخش قبلی محاسبه نموده است. مقادیر زاویه فشار و ضریب اصلاح چرخنده‌ها نیز به صورت پیش‌فرض به ترتیب برابر با بیست درجه و عدد صفر در نظر گرفته شد. سپس این مقادیر به عنوان مقادیر ورودی برای حصول به مقطع دوبعدی چرخنده مربعی به نرم‌افزار گیرآتیس موشن منتقل گردید. به عبارت دیگر با توجه به اینکه ابزارهای تسهیل‌کننده طراحی چرخنده‌های غیردایروی در نرم‌افزارهای مرسوم طراحی و نقشه‌کشی صنعتی نظیر کتیا و سالیدورکس وجود ندارد، برای طراحی مدل سه‌بعدی این چرخنده‌ها، ابتدا شکل مقطع کلی آنها در قالب مدل دوبعدی توسط نرم‌افزار خاص طراحی چرخنده با نام گیرآتیس موشن به دست آمد. این نرم‌افزار دارای ابزارهای دقیق و توانمندی برای رسم مقاطع دوبعدی شکل پروفیل دندانهای چرخنده‌های غیردایروی بر حسب پارامترهای ورودی به آن می‌باشد. بدیهی است اجرای اتوماتیک ترسیم مدل‌های دوبعدی مقاطع چرخنده‌ها، فرآیند طراحی را از نظر زمانی به میزان زیادی کاهش داده و راندمان را افزایش می‌دهد. بنابراین برای حصول به مدل دوبعدی چرخنده‌های غیردایروی در نرم‌افزار گیرآتیک موشن، ابتدا پارامترهای پیش‌فرض و محاسبه شده تعداد دندان، زاویه فشار، ضریب اصلاح، شماره لوب و مقدار مدول چرخنده طبق شکل ۲، به صورت عددی به نرم‌افزار وارد گردید. با اعمال این پارامترها فرآیند ترسیم مقاطع چرخنده‌ها به صورت اتوماتیک انجام گرفته و مقادیر خروجی با توجه به پارامترهای

بنابراین اگر خط غلتش چرخنده غیردایروی به Z بخش که برابر با تعداد دندانهای چرخنده غیردایروی است تقسیم گردد، می‌توان مدول (m) چرخنده را از رابطه (۵) به دست آورد [۶].

$$m = \frac{|L|}{\pi Z} = \frac{\sum_{n=1}^j l_n}{\pi Z} \quad (5)$$

می‌توان شعاع گام چرخنده‌های محرک و متحرک و مقادیر سرعت زاویه‌ای را نیز به صورت $S = r(\theta)$ و $L = r(\rho)$ فرض کرده و توسط روابط (۶) تا (۸) به دست آورد [۶]:

$$S = \frac{v_\theta}{w_\theta} = \frac{\frac{d\theta}{dt}}{\frac{d\theta}{dt}} \quad (6)$$

$$L = \frac{v_\rho}{w_\rho} = \frac{\frac{d\rho}{dt}}{\frac{d\rho}{dt}} \quad (7)$$

$$v_\theta = v_\rho \quad (8)$$

از روابط (۶) تا (۸) به آسانی می‌توان نسبت سرعت‌های چرخشی را توسط رابطه (۹) محاسبه نمود [۶].

$$\frac{d\rho}{d\theta} = \frac{S}{L} \quad (9)$$

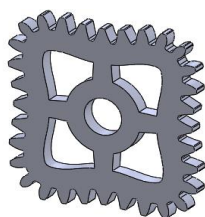
در نهایت تابع نسبت چرخنده باید در یک سیکل چرخشی T تابعی از سیکل چرخنده‌های محرک (T_1) و متحرک (T_2) باشد [۶، ۸]:

$$T = \frac{T_1}{n_2} = \frac{T_2}{n_1} \quad (10)$$

که در آن n شماره لوب^۱ چرخنده است. شماره لوب چرخنده عددی بدون دیمانسیون بوده و نشانگر تعداد گوشه‌های چرخنده غیردایروی طراحی شده می‌باشد. اثر این عدد در نسبت سیکل چرخشی بین چرخنده‌های غیردایروی درگیر با هم می‌باشد که تأثیر مستقیمی بر روی دامنه سیکل نوسانی سرعت و شتاب زاویه‌ای چرخنده محرک در یک دور کامل خواهد داشت. با افزایش شماره لوب تعداد سیکل نوسانی سرعت و شتاب زاویه‌ای چرخنده محرک در یک دور کامل افزایش می‌یابد. بنابراین طراح می‌تواند بر حسب نیاز طراحی خود شماره لوب را برای کنترل نوسانات سیکلی در چرخنده‌های غیردایروی تغییر دهد. بدیهی است که تغییر در شماره لوب سبب تغییر در فرم هندسی چرخنده‌های غیردایروی می‌گردد به طور مثال در

¹ Lobe number

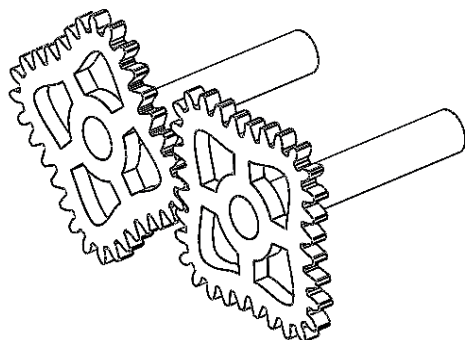
جنس پلاستیکی که باید چرخنده‌ها از آن تولید می‌شد انتخاب گردید. لازم به ذکر است که تغییرات مورد نیاز از نظر قطر سوراخ مرکزی چرخنده‌ها و اشکال توخالی شده فرم‌دار در چرخنده‌های مربعی بعد از ساخت مدل سه‌بعدی آنها در نرم‌افزار سالیدورکس روی چرخنده‌ها اعمال گردیده است. در شکل ۳ نمایی از چرخنده مربعی سه‌بعدی طراحی شده در نرم‌افزار سالیدورکس ارائه گردیده است.



شکل ۳ مدل سه‌بعدی چرخنده مربعی طراحی شده

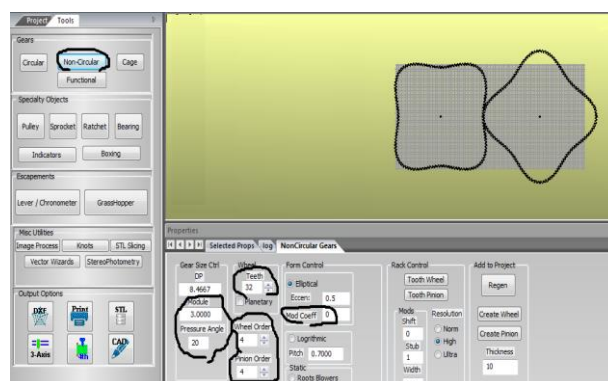
۳-۲- تحلیل حرکتی چرخنده‌های مربعی

با ساخت مدل سه‌بعدی چرخنده‌های مربعی در نرم‌افزار سالیدورکس، این چرخنده‌ها در محیط مونتاژ توسط قیدهای هندسی مورد نیاز بر روی دو شفت مجزا مونتاژ گردید. در شکل ۴، نمایی از مدل سه‌بعدی چرخنده‌های مربعی مونتاژ شده در نرم‌افزار سالیدورکس ارائه شده است. سپس تداخل بین دندانه‌های دو چرخنده در یک سیکل کامل چرخشی در این محیط بررسی شده و تحلیل سینماتیک آنها در نرم‌افزار سالیدورکس انجام گرفت. خروجی تحلیل سینماتیک در این نرم‌افزار دستیابی به نمودار سرعت زاویه‌ای است که می‌توان از آن برای بررسی تعداد پیک‌ها در نمودار سیکل چرخشی و تطابق آن با نمودارهای مرسوم این نوع چرخنده جهت اطمینان از طراحی استفاده نمود.



شکل ۴ چرخنده‌های مربعی درگیر در حالت سه‌بعدی

وارد شده به نرم‌افزار به صورت گزارش از آن دریافت شد. در جدول ۱ مجموعه پارامترهای ورودی و پارامترهای استخراج شده از نرم‌افزار شامل شعاع‌های کوچک و بزرگ چرخنده مربعی شکل، ارتفاع دندانه و فاصله مرکز محورهای دو شفت چرخنده‌ها ارائه گردیده است.



شکل ۲ اعمال پارامترهای ورودی به نرم‌افزار و حصول به شکل دوبعدی چرخنده‌های مربعی شکل

جدول ۱ پارامترهای طراحی و ساخت چرخنده‌های مربعی

پارامتر	چرخنده مربعی
شماره لوب	۴
زاویه فشار (درجه)	۲۰
تعداد دندانه	۳۲
شعاع بزرگ چرخنده (میلیمتر)	۶۱/۶
شعاع کوچک چرخنده (میلیمتر)	۴۷/۲۵
مدول نرمال	۳
ضریب اصلاح	۰
قطر سوراخ مرکزی (میلیمتر)	۲۰
ارتفاع کل دندانه (میلیمتر)	۷/۴
فاصله مراکز محورهای دو شفت چرخنده (میلیمتر)	۱۰۳

با تعیین این پارامترها، فرآیند ترسیم مدل دوبعدی چرخنده‌های مربعی و تبدیل آن به مدل سه‌بعدی آغاز می‌گردد. با ایجاد شکل مقطع دوبعدی چرخنده‌های مربعی در نرم‌افزار گیرآئیک موشن می‌توان آنها را در قالب پسوند دی-اکس-اف^۱ که یک پسوند دوبعدی ساز است ذخیره و به نرم‌افزار دیگری برای تبدیل به مدل سه‌بعدی منتقل نمود. کار بعدی به مقاطع دوبعدی در این مقاله با نرم‌افزار سالیدورکس^۲ انجام شده و در آنجا این مدل‌ها به صورت تک به تک با استفاده از دستور اکستروود به مدل‌های سه‌بعدی با ضخامت معادل با هشت میلیمتر تبدیل گردید تا شکل سه‌بعدی چرخنده‌های مربعی ایجاد شود. میزان ضخامت چرخنده‌های مربعی به توصیه شرکت برشکار لیزر و با توجه به

^۱ *.Dxf

^۲ Solid works

۳-۳- ساخت چرخنده مربعی به روش برشکاری لیزری

جهت تولید نمونه‌های واقعی چرخنده در این تحقیق از فرآیند برشکاری لیزری استفاده شده است. فایل دوبعدی چرخنده مربعی در قالب پسوند دی-اِکس-اِف به دستگاه برشکاری لیزری منتقل و فرآیند برشکاری بر روی ورق پلاستیکی به ضخامت هشت میلیمتر از جنس پلی لاکتیک شفاف طبیعی که یک ترموپلاستیک است انجام گرفت. از ویژگی‌های اصلی پلی لاکتیک شفاف می‌توان به سختی بالای آن اشاره نمود. همچنین این ترموپلاستیک به دلیل استحصال از مواد طبیعی مانند ذرت دارای قابلیت زیست تخریبی بوده و به مرور زمان در مجاورت خاک تجزیه می‌گردد.

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق دستگاه برش لیزر مدل ۱۸۱۳ باکس است که در آن از یک لیزر CO₂ با توان یکصد و بیست وات و سرعت روبشی حداکثر ششصد میلیمتر بر ثانیه استفاده شده است. این دستگاه قابلیت حکاکی و برش بر روی تمام غیرفلزات را دارا بوده و ابعاد میز کارگیر آن نیز ۱۲۰ در ۹۰ سانتیمتر می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از این دستگاه ارائه شده است.



شکل ۵ دستگاه برش با لیزر مدل ۱۸۱۳ باکس

۳- بحث و بررسی

شکل ۶، نمایی از ابعاد مهم بر روی چرخنده غیردایروی نوع مربعی را که در این تحقیق طراحی شده است، نشان می‌دهد. توجه به این نکته ضروری است که برای درگیری مناسب بین دو چرخنده غیردایروی علاوه بر برابری مقادیر مدول چرخنده‌ها، باید نسبت شماره لوب هر چرخنده به تعداد دندانه‌های آن با

برای اجرای فرآیند شبیه‌سازی حرکتی هر دو چرخنده مربعی طراحی شده را به محیط مونتاژ نرم‌افزار سالدورکس منتقل کرده و متناسب با سوراخ مرکزی دو چرخنده مربعی، دو شفت با طول دلخواه برای استقرار چرخنده‌ها بر روی آنها نیز به صورت سه‌بعدی طراحی و آن دو شفت نیز به محیط مونتاژ منتقل می‌شود. سپس سوراخ مرکزی هر دو چرخنده با شفت مربوط به خود با استفاده از ابزار قیود هندسی در محیط مونتاژ نرم‌افزار به صورت هم‌مرکز قیدگذاری گردید. برای اینکه هر دو چرخنده مربعی در یک امتداد نسبت به هم قرار گیرند، باید رویه جلویی هر دو چرخنده طبق شکل ۴ به صورت هم‌سطح باشد که برای این کار قید کوین‌سیدنت^۱ به کار گرفته شد. استفاده از همین قید طبق شکل ۴ برای ایجاد هم‌سطحی بین رویه مسطح جلویی استوانه شفت با رویه جلویی چرخنده مربوط به آن نیز انجام گرفت. در انتهای این مرحله از قیدگذاری بین شفت‌ها و چرخنده‌ها، هر چرخنده مربعی می‌تواند به صورت مستقل روی شفتی که با آن قیدگذاری شده دارای دوران آزاد باشد. سپس دو چرخنده از نظر تداخل بین دندانه‌ها با استفاده از موس در موقعیت صحیحی قرار گرفته و برای شبیه‌سازی حرکتی آنها از ماژول موшин‌استادی^۲ استفاده می‌گردد. ابتدا با استفاده از قید تماس^۳ در این ماژول هر دو چرخنده را انتخاب و میان آنها این قید ایجاد گردید. بعد از انجام این کار برای شناساندن عناصر مونتاژ به صورت قطعات فیزیکی به نرم‌افزار از آیکون محاسبه انیمیشن^۴ در این ماژول استفاده می‌شود. برای دوران دادن به چرخنده‌ها از آیکون موتور استفاده شده و روی یکی از چرخنده‌ها که باید چرخنده محرک باشد موتور دورانی با تعداد مشخص دور تعبیه می‌گردد. با آغاز شبیه‌سازی، هر دو چرخنده مربعی به صورت درگیر با هم شروع به حرکت می‌نمایند. مرحله مونتاژ و شبیه‌سازی در طراحی چرخنده‌های غیردایروی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و باید با دقت و ترتیب ارائه شده انجام گیرد. برای دستیابی به نمودار سرعت زاویه‌ای به ازاء زاویه حرکت چرخنده محرک بعد از اطمینان از صحت مونتاژ و حرکت صحیح چرخنده‌ها، با استفاده از آیکون ایجاد دیگرام^۵ این نمودار به راحتی در نرم‌افزار الیدورکس قابل دسترسی خواهد بود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی حرکتی تنها پارامتر ورودی به نرم‌افزار به غیر از قیود هندسی میزان دوران موتور برای چرخش چرخنده محرک بوده و تنها خروجی مدنظر هم نمودار سرعت زاویه‌ای چرخنده محرک می‌باشد.

⁴ Animation calculator

⁵ Create motion plot

¹ Coincident

² Motion study

³ Contact

با چهار می‌باشد. از این رو در شکل ۷، تعداد سیکل تغییرات دامنه سرعت زاویه‌ای در چرخنده محرک در هر دور کامل برابر با چهار دامنه نوسانی است. شکل ۷، دارای نموداری روان و بدون تغییرات و نویز معنادار است که عدم وقوع پدیده ارتعاشات جزئی را در حین دوران دو چرخنده در یک سیکل کامل تضمین می‌نماید. بروز ارتعاشات جزئی در چرخنده‌های غیردایره‌ای درگیر با هم، پدیده‌ای شایع در طراحی چرخنده‌های غیردایره‌ای است که بیشتر به دلیل تعیین اشتباه پارامترهای طراحی اولیه، کیفیت سطح نامناسب قطعات تولیدی به دلیل انتخاب نادرست روش تولید و یا انتخاب نادرست میزان خلاصی بین دندانه‌های دو چرخنده سبب عدم پایداری در سیکل حرکتی چرخنده محرک می‌گردد [۷]. این ناپایداری حرکتی، ارتعاشات در سیستم انتقال قدرت چرخنده‌ای را افزایش داده و سبب بروز عواملی نظیر خستگی و شکست زود هنگام در دندانه‌های چرخنده می‌گردد [۷]. شکل ۸ چرخنده‌های غیردایره‌ای فیزیکی تولید شده را در حالت مونتاژ نشان می‌دهد.

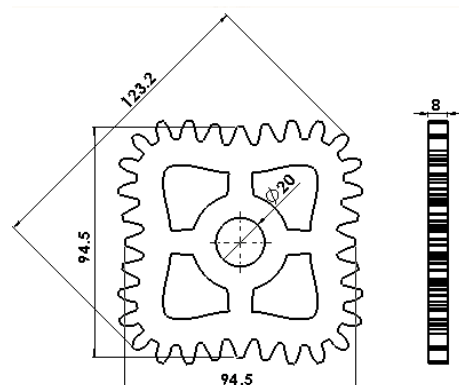


شکل ۸ مونتاژ چرخنده‌های غیردایره‌ای مربعی و بررسی نحوه درگیری آن‌ها

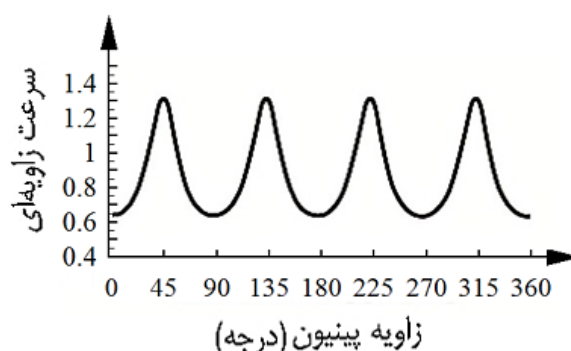
بازرسی ابعادی نمونه‌های فیزیکی فوق با استفاده از کولیس و میکرومتر برای سنجش ابعاد اشاره شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که تolerانس تولید نمونه‌ها بر روی تمام ابعاد، حداکثر معادل ± 0.1 میلی‌متر می‌باشد که بیانگر کیفیت مناسب تولید چرخنده‌ها است.

چرخنده دیگر نیز مساوی باشد که با توجه به مشابهت دو چرخنده مورد بررسی در این تحقیق، شرط درگیری مناسب رعایت شده است [۱].

از آنجا که برای تعیین مقادیر سرعت زاویه‌ای در چرخنده‌های غیردایره‌ای نیاز به استفاده از تجهیزات و سنسورهای خاص گران قیمت و با دقت بالا می‌باشد، بنابراین در این تحقیق به دلیل انطباق هندسی نمونه‌های فیزیکی چرخنده مربعی با مدل سه بعدی، برای تعیین مقادیر سرعت زاویه‌ای به جای آزمایش‌های واقعی از شبیه‌سازی مدل‌های کامپیوتری چرخنده‌های مونتاژ شده در نرم‌افزار سالیدورکس، استفاده گردیده است. شکل ۷ نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای در چرخنده محرک مربعی شکل را نشان می‌دهد. سینوسی بودن نمودار سرعت زاویه‌ای در چرخنده‌های غیردایره‌ای امری مرسوم است که در شکل ۷ به وضوح قابل رؤیت می‌باشد.

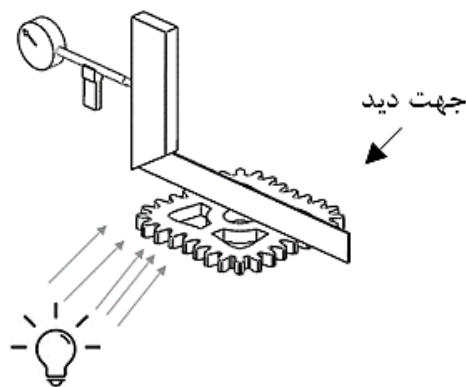


شکل ۶ نمایش ابعاد مهم بر روی چرخنده مربعی طراحی شده



شکل ۷ نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای چرخنده مربعی در برابر زاویه چرخنده محرک

بررسی نمودار شکل ۷ و شبیه‌سازی حرکتی چرخنده‌ها در نرم‌افزار نشان می‌دهد که دامنه تغییرات سرعت زاویه‌ای در محدوده مناسبی قرار داشته و تعداد دامنه نوسانات سیکلی در یک سیکل کامل با شماره لوب چرخنده محرک غیردایره‌ای برابر است که در این تحقیق چرخنده مربعی دارای شماره لوب برابر



شکل ۱۰ نحوه اجرای آزمایش عبور نور برای تعیین اعوجاج روی سطح مسطح چرخدنده مربعی

البته دلیل عدم واگرایی اشعه لیزر را می‌توان کم بودن ضخامت ورق خام پلاستیکی انتخاب شده در فرآیند برشکاری دانست [۸]. بازرسی حرکتی چرخدنده‌های فیزیکی در حالت مونتاژ شده نیز بیانگر حرکت نرم و انتخاب میزان خلاصی مناسب بین دندانه‌های دو چرخدنده در طی دوران است که این امر به واسطه انتخاب و محاسبه دقیق پارامترهای ورودی چرخدنده نظیر فاصله محوری بین دو چرخدنده مونتاژ شده است.

۴- نتیجه‌گیری

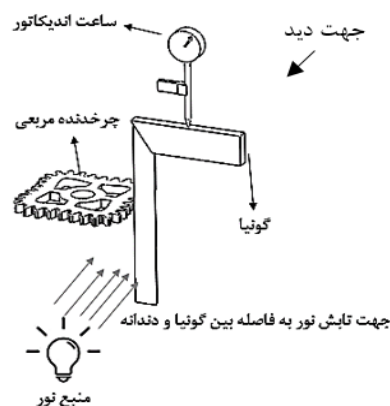
در این مقاله روشی برای طراحی یک جفت چرخدنده مربعی مشابه و تولید آنها با فرآیند برشکاری لیزری پیشنهاد گردید. تعیین پارامترهای طراحی چرخدنده مربعی بر پایه محاسبات ریاضی ارائه شده در مقاله انجام و براساس آن، فرآیند ترسیم مدل مقطع دندانه‌های چرخدنده و مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار طراحی انجام گرفت. شبیه‌سازی حرکتی نمونه‌های مونتاژ شده در نرم‌افزار ضمن تضمین صحت طراحی منجر به دستیابی به نمودار سرعت زاویه‌ای براساس تغییرات زاویه در چرخدنده محرک شد. نتایج به دست آمده در تحقیق را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی نمود:

۱- سینوسی بودن و سیکل تکرار دامنه نوسانات در نمودار سرعت زاویه‌ای با شماره لوب چرخدنده محرک که در این تحقیق از نوع مربعی با درجه چهار است، مطابقت دارد که تأییدی بر دقت اجرای فرآیند شبیه‌سازی حرکتی می‌باشد.

۲- بررسی چرخدنده‌های تولید شده نشان می‌دهد که چرخدنده‌ها از نظر کیفیت تولیدی در حد قابل قبولی بوده و پدیده مخروطی شدن چرخدنده‌ها در امتداد پهنای دندانه‌های چرخدنده در اثر واگرایی اشعه لیزر و نیز اعوجاج در سطح مسطح

برای سنجش پدیده عدم عمودیت (شیب‌دار شدن) دندانه‌های چرخدنده‌ها در امتداد پهنای ضخامتی چرخدنده از ابزاری به نام گونیای دقیق فلزی استفاده شده است. با این کار امتداد دندانه‌های چرخدنده در راستای ضخامت چرخدنده با استفاده از آزمایش گونیا و تست عبور نور متمرکز مورد بررسی قرار گرفت. برای تنظیم دقیق گونیای فلزی از یک ساعت اندیکاتور استفاده گردید که برای صفر کردن بازوی افقی گونیا به کار گرفته شد. کار سنجش احتمال عدم عمودیت دندانه‌های چرخدنده برای هر دندانه از دندانه‌های چرخدنده‌های مربعی در قالب کنترل صد در صدی به صورت مجزا انجام گرفت. در این آزمایش هرگونه عبور نور متمرکز از فاصله بین گونیا و دندانه تنظیم شده از چرخدنده مربعی به روشی ساده و ارزان، بیانگر وجود شیب در راستای عمودی آن دندانه می‌باشد. شکل ۹ نمایی از نحوه اجرای این آزمایش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این آزمایش گاهی فقط با استفاده از یک ساعت اندیکاتور انجام می‌گیرد و از طریق جابجایی آن در راستای ضخامتی دندانه (راستای عمودی) با توجه به تغییرات عقربه ساعت میزان عمودیت آن راستا بررسی می‌شود. در این مقاله به دلیل احتمال وقوع لرزش در حین جابجایی ساعت از ترکیب گونیا و نور با ساعت اندازه‌گیری استفاده شده تا دقت اندازه‌گیری‌ها تضمین گردد.

همچنین سطح مسطح دو طرف هر چرخدنده مربعی نیز برای بررسی اعوجاج احتمالی نمونه‌ها در اثر حرارت برشی پرتو لیزر با استفاده از گونیا و تست عبور نور طبق شکل ۱۰، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی نشان می‌دهد که پارامترهای تولیدی انتخاب شده، ساخت بدون عیب نمونه‌های چرخدنده‌ای شکل را تأمین نموده و پدیده عدم عمودیت دندانه‌های چرخدنده در امتداد پهنای ضخامتی در اثر واگرایی اشعه لیزر و نیز اعوجاج در سطح مسطح نمونه‌های چرخدنده‌ای به دلیل حرارت ناشی از برش لیزر در نمونه‌های فیزیکی تولید شده رخ نداده است.



شکل ۹ نحوه اجرای آزمایش عبور نور برای تعیین عمودیت دندانه‌ها در راستای ضخامتی چرخدنده مربعی

[2] Addomine, M., Figliolini, G., Pennestrì, E., A landmark in the history of non-circular gears design: The mechanical masterpiece of Dondi's astrarium, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 122, No. 1, pp. 219-32, (2018).

[3] Sande, G., Takuto, S., Kazuya, O., Xiaochu, T., Xue, C., Jing, L., 3D-CAD and 5 axis CAM of non-circular gears, *Proceedings of the 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in the 21st Century (LEM21)*, Nagoya, Japan, pp. 325-330, (2005).

[4] Pon Vignesh Pappu, S., Ajin, M., Satheesh Kumar, G., Development of prototype variable geometry in-pipe robot for reconfigurable applications, In advances in simulation, product design and development, pp. 675-683, Singapore: *Springer*, (2020).

[5] Nair, P.S., Nair, S., Sarkar, S., Arockia Doss, A.S., Dinakaran, D., Design and analysis of ASRS using AGV for rapid inventory storage system, trends in manufacturing and engineering management, Singapore: *Springer*, (2021).

[6] Radzevich, S.P., Foundations of advanced gear systems, In Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, pp. 7-29, London: *CRC Press*, (2021).

[7] Vullo, V., Gears: Volume 3: A Concise History, pp. 181-182, London: *Springer Nature*, (2020).

[8] Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Advanced Noncontact Cutting and Joining Technologies, pp. 50-54, London: *Springer*, (2018).

نمونه‌های چرخنده‌ای به دلیل حرارت ناشی از برش لیزر در آنها ایجاد نشده است.

۳- بررسی ابعادی چرخنده‌های مربعی برشکاری شده توسط کولیس و میکرومتر بیانگر این موضوع است که تolerانس ابعادی بر روی تمام جهات، حداکثر معادل ± 0.1 میلی‌متر می‌باشد.

۴- عدم مونتاژپذیری به دلیل طراحی ابعاد نادرست، گیرکردن چرخنده‌ها در هنگام چرخش و لقی دورانی نامناسب در طی مونتاژ فیزیکی چرخنده‌ها رؤیت نگردید که این امر دلیل دیگری بر صحت روش طراحی و ساخت انتخاب شده در این تحلیل است.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

v_0	سرعت مماسی چرخنده متحرک در نقطه تماس (m/s)
v_θ	سرعت مماسی چرخنده محرک در نقطه تماس (m/s)
w_0	سرعت زاویه‌ای چرخنده متحرک (rad/s)
w_θ	سرعت زاویه‌ای چرخنده محرک (rad/s)
m	مدول چرخنده محرک (mm)
Z	تعداد دندانه‌های چرخنده محرک
L	شعاع گام چرخنده متحرک (m)
S	شعاع گام چرخنده محرک (m)

۶- مراجع

[1] Rackov, M., Mitrović, R., Čavić, M., Machine and industrial design in mechanical engineering, London: *Cambridge University Press*, pp. 67-69, (2021).



مروری بر عملکرد ترمزهای سیمی

فرشید نصیری

کارشناسی ارشد مهندسی خودرو

سلمان ابراهیمی نژاد

رفسنجانی*

استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی

سیستم‌های دینامیکی خودرو،

دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه

علم و صنعت ایران، تهران

چکیده: یکی از جدیدترین سیستم‌های ترمز حال حاضر جهان، سیستم ترمز سیمی است. این نوع ترمز که کنترل آن توسط دستگاه‌های الکترونیکی انجام می‌شود، فناوری در حال توسعه است و رانندگان را قادر می‌سازد تا عملکرد بالاتری در هنگام رانندگی در مقایسه با ترمزهای هیدرولیکی داشته باشند. در این نوع ترمز، مدارها و تجهیزات الکترونیکی جایگزین تجهیزات هیدرولیکی و مکانیکی مانند پمپ، تسمه، لوله و سیلندر ترمز می‌شود. استفاده از این فناوری علاوه بر کاهش وزن خودرو، سبب کاهش سروصدا و لرزش آن شده و زمان واکنش ترمز را کاهش می‌دهد. همچنین عیب‌یابی ترمز را نیز آسان می‌کند و گام مهمی در راستای کنترل پذیری هر چه بیشتر و الکترونیکی و خودران شدن خودروها خواهد بود. در این مقاله ضمن معرفی مفاهیم اولیه ترمز سیمی و شیوه کارکرد آن، به مسیر توسعه و بهینه‌سازی ترمز سیمی اشاره شده و حوزه‌های تحقیقاتی موجود در این زمینه شناسایی شده است.

واژه‌های راهنما: ترمز سیمی، ترمز برقی، ایمنی ترمز، بوستر هیبریدی، ترمز الکترومکانیک، بازیابی انرژی، ترمز الکتروهیدرولیک

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

Review on the performance of brake by wire

Farshid Nasiri

M.Sc. in Automotive

Engineering

Salman
Ebrahimi-Nejad
Rafsanjani*

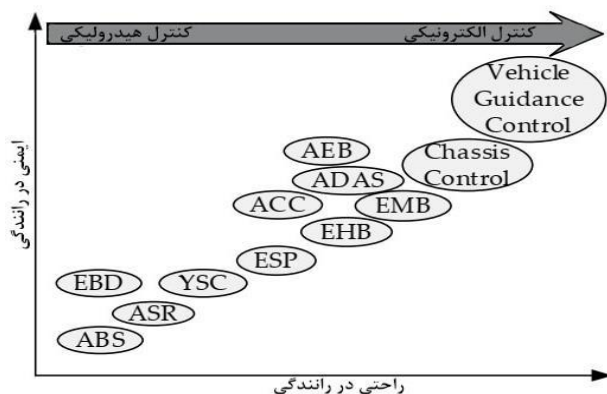
Assistant Professor,
Vehicle Dynamical
Systems Research Lab,
Faculty of Automotive
Engineering,
Iran University of
Science and
Technology, Tehran

Abstract: One of the newest braking systems in the world is the brake by wire (BBW) system. This type of brake is controlled by electronic devices and enables drivers to perform better compared to hydraulic brakes. In BBW, hydraulic and mechanical equipment such as pumps, belts, and cylinders are replaced by electronic devices. Using this system, in addition to reducing the weight of the car and its noises and vibrations, also reduces the braking response time and makes it easy to troubleshoot the brake. It will be an important step towards more controllability, electronic and self-driving cars. This article introduces the basic concepts of brake by wire and also reviews the operation, development, and optimization of BBW systems, and research areas in this field have been identified and introduced.

Keywords: Brake by wire (BBW), Electromechanical brake, Electrohydraulic brake, Automotive, Wedge brake, Regenerative braking

۱- مقدمه

می‌بایست با حسگرهای خودرو بخوبی کار کند نیازمند افزایش دقت و سرعت بازخورد عملکرد قطعات ترمز است. بنابراین کنار رفتن قطعات مکانیکی و جایگزینی با قطعات الکترونیکی روندی است که در چند سال اخیر سرعت گرفته است. با توجه به شکل ۱ روند پیشرفت فناوری‌های ترمز در خودرو مشاهده می‌شود که تحت تاثیر دو شاخصه راحتی در رانندگی و افزایش ایمنی قرار می‌گیرد [۳]. از ویژگی‌های بارز ترمز سیمی این است که عمده فناوری‌های جدید ترمز که به صورت الکترونیکی هستند در ترمز سیمی قابلیت یکپارچگی دارند و بدون نیاز به تجهیزات اضافه و فقط با اضافه کردن ماژول‌های الکترونیکی، می‌توان از این فناوری‌ها استفاده کرد.



شکل ۱ افزایش ایمنی رانندگی و راحتی همزمان با الکترونیکی شدن قطعات [۳]

در این مقاله ابتدا به معرفی ترمز سیمی و عملکرد آن پرداخته می‌شود. سپس به برخی بهینه سازی‌های جدید و مزایا و معایب این نوع سیستم ترمز اشاره خواهد شد. در هر بخش، حوزه‌های تحقیقاتی موجود در این زمینه از قبیل سیستم ترمز الکتروهیدرولیک در ترمز سیمی، بوسترهای هیبریدی، بازیابی انرژی و استفاده از ترمز سیمی در هواپیماهای نظامی توضیح داده شده است.

۲- اجزاء ترمز سیمی

سیستم ترمز سیمی شامل عملگرهای^۱ الکترومکانیکی یا الکتروهیدرولیکی، شبیه‌ساز پدال^{۱۱} و واحد کنترل ترمز^{۱۲} است. نیروی وارده بر پدال توسط شبیه‌ساز پدال اندازه‌گیری شده و به

در صنعت خودروسازی، ترمز سیمی^۱ به نوعی سیستم ترمز گفته می‌شود که کنترل شدن آن توسط دستگاه‌های الکترونیکی انجام می‌گیرد. بطور کلی هر نوع سیستم که با پسوند سیمی اطلاق شود؛ مانند فرمان سیمی^۲ بدین معنی است که قطعات و عملگرهای الکترونیکی، جایگزین تجهیزات هیدرولیکی و مکانیکی در آن مجموعه شده است. در ترمز سیمی هم تجهیزات الکترونیکی جایگزین تجهیزاتی مانند پمپ، لوله و سیلندر ترمز در ترمزهای هیدرولیکی می‌شود. این دگرگونی گام بلندی در جهت ارتقاء ایمنی خودرو، افزایش کنترل‌پذیری و تسریع بازخورد سیستم می‌شود و راه را برای الکترونیکی و خودران شدن خودروها هموار می‌سازد.

واژه ترمز سیمی اولین بار در صنایع هوایی استفاده شد که در آن از این فناوری در هواپیماهای نظامی استفاده می‌کردند. به دلیل مسافت ترمزی که هواپیماهای نظامی طی می‌کردند، نیاز به ترمزی که بتواند واکنش سریعی داشته باشد احساس شد. به موجب عملکردی که این تکنولوژی ترمز از خود نشان داد، توجه خودروسازان را هم به خود جلب کرد [۱]. به مرور زمان و به منظور ارتقای ایمنی و عملکرد ترمزها، تجهیزات جدیدی به ترمزها اضافه شده است که این تجهیزات روزبه‌روز حالت الکترونیکی به خود گرفته‌اند. بنابراین با افزایش تجهیزات الکترونیکی، تبدیل انرژی الکتریکی به دستورات مکانیکی زمان بر است و در چندین مرحله صورت می‌گیرد. در حال حاضر حرکت روغن درون اجزای ترمز از لحظه فشار روی پدال تا جمع شدن لنت‌ها زمان‌بر تلقی می‌شود. در واقع نیاز به افزایش سرعت عمل ترمزگیری و افزایش ایمنی، راهی جز روی آوردن به قطعات الکترونیکی پیش روی طراحان قرار نمی‌دهد. پس نیاز است که تجهیزات مکانیکی کمرنگ‌تر شود و جای خود را به سیم و عملگر و برد الکترونیکی بدهد.

به تدریج سیستم‌هایی نظیر ترمز ضد قفل^۳ که به صورت گسترده استفاده می‌شود، سیستم توزیع نیروی ترمز^۴، سیستم کنترل کشش^۵، کنترل پایداری جانبی^۶، برنامه پایداری الکترونیکی^۷، سیستم پیشرفته دستیار راننده^۸ و ترمز اضطراری خودکار^۹ به خودروها اضافه شده و با سیستم هیدرولیکی ترمز خودرو یکپارچه شده است [۲]. این سیستم‌ها به دلیل اینکه

7Electronic Stability Program (ESP)

8Advanced Driver Assistant System (ADAS)

9Automatic Emergency Brake (AEB)

10Actuator

11Pedal Simulator

12Brake Control Unit (BCU)

1Brake By Wire

2Steer By Wire

3Anti-Lock Brake (ABS)

4Electronic Brakeforce Distribution (EBD)

5Traction Control System (TCS)

6Yaw Stability Control (YSC)

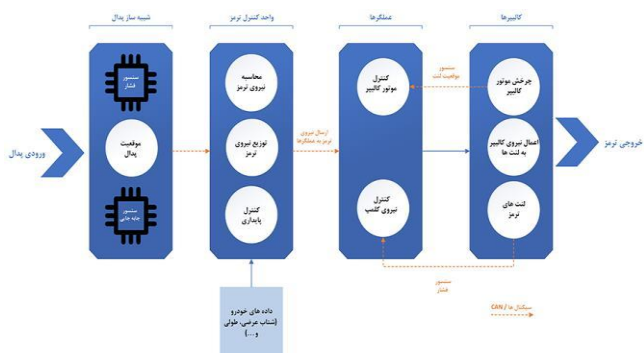
هر چرخ محاسبه می‌کند و دستورات را به هریک از عملگرها منتقل می‌کند [۶].

۳-۲- شبیه‌ساز پدال

شبیه‌ساز پدال در سیستم ترمز سیمی قطعه‌ای الکترومکانیکی است که دارای حسگر نیرو و حسگر واکنش است که این حسگرها میزان جابه‌جایی پدال را اندازه می‌گیرند. شبیه‌ساز پدال در واقع جایگزینی برای بوستر ترمز و سیلندر ترمز در ترمزهای هیدرولیکی است که در یک قطعه ساده شده است.

۳- عملکرد ترمز سیمی

با توجه به شکل ۳ که در آن عملکرد کنترلی ترمز سیمی نشان داده شده است، مراحل اصلی در ترمزگیری با سیستم ترمز سیمی بدین شرح است: ۱- راننده پدال ترمز را فشار می‌دهد و شبیه‌ساز پدال میزان شدت ترمز را اندازه‌گیری می‌کند. ۲- میزان شدت فشرده شدن پدال ترمز، به واحد کنترل ترمز ارسال و با ورودی‌های مثل شتاب و زاویه فرمان خودرو پردازش شده و نیروی ترمز مورد نیاز به عملگرها ارسال می‌شود. ۳- عملگرها، سیگنال الکتریکی را دریافت کرده و به کالیپرها ارسال می‌کنند. ۴- بستگی به نوع کالیپر، نیروی ترمز به چرخ‌ها اعمال می‌شود [۷].



شکل ۳ مراحل عملکرد ترمز سیمی

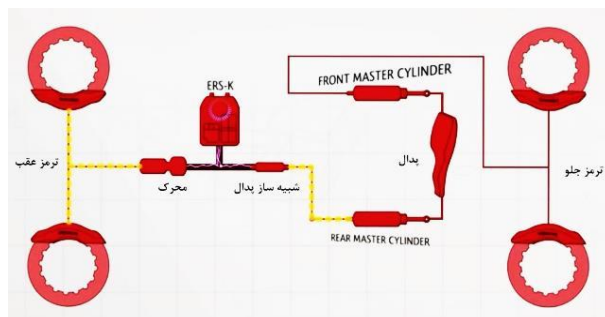
ترمزهای سیمی به دو صورت الکتروهیدرولیکی و یا الکترومکانیکی وجود دارند. هرکدام از آنها معایب و مزایای مختلفی دارند که به آن اشاره می‌شود.

۳-۱- ترمز سیمی الکتروهیدرولیک

سیستم‌های ارتباطات ترمز سیمی که امروزه در خودروها استفاده می‌شود به دلیل مسائل ایمنی از نوع الکتروهیدرولیک یا

برد کنترل ترمز ارسال می‌شود. سپس مقدار مورد نیاز نیروی ترمز برای هر چرخ محاسبه شده و از طریق عملگرها به چرخ‌ها ارسال می‌شود (شکل ۲) [۴].

این سیستم ساده با حذف قطعات حجیم در سیستم ترمز هیدرولیکی شامل بوستر ترمز، سیلندر ترمز، پمپ و لوله‌های بازگشت روغن، سبب کاهش قیمت، کاهش وزن، افزایش ایمنی و کاهش آلودگی محیطی می‌شود.



شکل ۲ نمودار فرآیند ترمز سیمی از شرکت برمبو [۴]

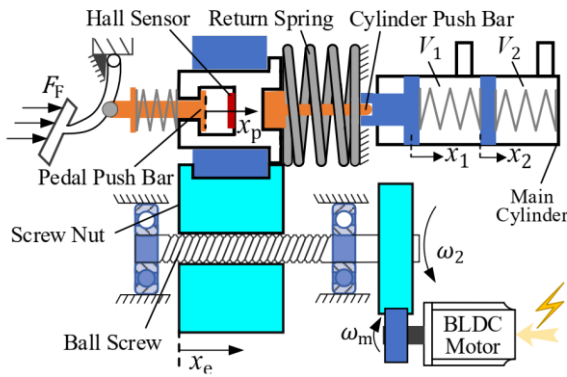
۲-۱- عملگرها

عملگرها از یک سمت، اطلاعات را از واحد کنترل ترمز دریافت کرده و از سمت دیگر نیروی ترمز را به کالیپر انتقال می‌دهند. خودرویی با سیستم ترمز سیمی دارای یک عملگر برای هر چرخ است. عملگرها در ترمزهای سیمی دو نوع هستند. نوع اول از کالیپر ترمز فاصله دارند و نیروی ترمز را به صورت هیدرولیکی منتقل می‌کنند. در این حالت ترمز سیمی به صورت ترکیبی الکتروهیدرولیکی عمل می‌کند. امروزه عمده خودروهایی که از فناوری ترمز سیمی استفاده می‌کنند بدین صورت هستند.

نوع دوم از عملگرها که بصورت الکترومکانیکی عمل می‌کنند، میزان نیروی ترمز ارسالی به کالیپر را به صورت الکتریکی دریافت کرده و بصورت مکانیکی از طریق یک موتور جریان مستقیم، به کالیپر انتقال می‌دهد و کالیپر به کمک موتور الکتریکی جمع می‌شود [۵].

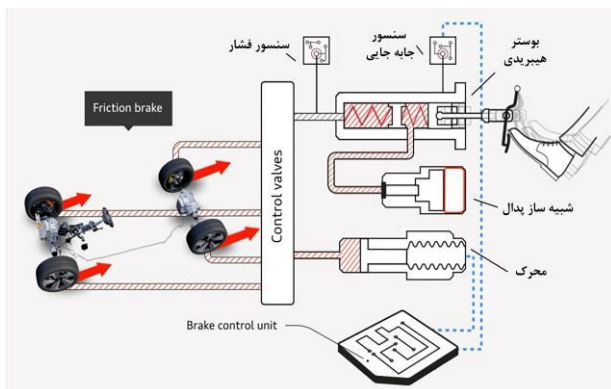
۲-۲- واحد کنترل ترمز

واحد کنترل ترمز ورودی‌هایی مثل نیروی وارده به پدال از طرف شبیه‌ساز پدال و همچنین مقادیری مانند شتاب‌های جانبی و مستقیم خودرو، زاویه فرمان و سرعت چرخش هریک از چرخ‌ها از طریق حسگرهای دیگر وارد این برد می‌شود. این قطعه پس از پردازش این اطلاعات، مقدار نیروی مورد نیاز ترمز را نسبت به



شکل ۵ بخش مکانیکی بوستر هیبریدی با جزئیات [۸]

در شکل ۶ مدل ترمز سیمی روی خودروی آئودی e-Tron مدل ۲۰۲۰ که مجهز به بوستر هیبریدی است مشاهده می‌شود. در حالت نرمال وقتی راننده پدال ترمز را فشار می‌دهد نیروی فشار از طریق شیشه‌ساز پدال اندازه‌گیری شده و به برد کنترل ترمز منتقل می‌شود. سپس از طریق عملگرها، روغن ترمز به کالیپرها می‌رسد. در حالت بدون برق، نیروی هیدرولیکی از طریق بوستر هیبریدی به صورت مستقیم بر اساس میزان نیروی وارده به پدال، به کالیپرها منتقل می‌شود [۹].



شکل ۶ نمودار عملکرد ترمز سیمی در خودروی آئودی eTron 2020 [۹]

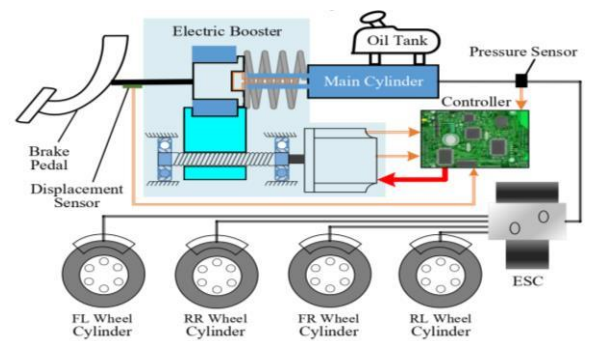
۳-۲- ترمز سیمی الکترومکانیک (بدون پشتیبانی هیدرولیک)

یکی دیگر از مزایای ترمز سیمی به جز حذف قطعات مکانیکی بزرگ، مستقل بودن سیستم ترمز از برد اصلی است که می‌تواند بستری را برای نصب ماژول‌ها و پروسه‌های مستقل فراهم کند که باعث بهینه‌تر شدن این ترمز می‌شود. ترمزهای EMB

الکتروپنوماتیک هستند. آنها دارای تجهیزات هیدرولیکی یا پنوماتیکی مجزا برای مواقع اضطراری و در زمانی که نیروی برق خودرو از کار بیفتد هستند. این سیستم‌های هیدرولیکی به صورت مستقیم در دسترس راننده نیستند؛ یعنی راننده نمی‌تواند به خواست خود ترمز را روی آن حالت قرار دهد.

سیستم ترمز هیدرولیک مورد استفاده در خودروهای سواری معمولاً مجهز به بوستر وکیوم است. ساختار آن به صورتی است که پاسخ سیستم کند است و محدودیت اساسی برای کاربردهای پیشرفته دارد، زیرا کنترل مستقیم قطعات مکانیکی توسط تراشه‌های الکترونیکی دشوار است. در مقابل، جدیدترین روش استفاده از ترمز سیمی در خودروها، بکارگیری ترمزهای سیمی الکتروهیدرولیک است که دارای بوسترهای هیبریدی شامل دو بخش الکتریکی و هیدرولیکی مجزا هستند. به این منظور، شیشه‌ساز پدال و بوستر وکیوم در یک قطعه ترکیب شده‌اند و بوستری هیبریدی ایجاد شده است.

وانگ و همکاران [۸] جدیدترین نوع بوستر هیبریدی را طراحی کرده‌اند. این بوستر هیبریدی با توجه به شکل ۴ دارای دو مجموعه اصلی مکانیکی و الکترونیکی است. قسمت مکانیکی شامل قطعاتی مانند بال اسکرو، چرخ دنده یک مرحله ای^۳ و پایه‌های نگهدارنده است. قسمت الکترونیکی نیز شامل یک موتور براشلس جریان مستقیم، حسگر اندازه‌گیری فشار، حسگر جابه‌جایی و یک کنترلر الکترونیکی است.

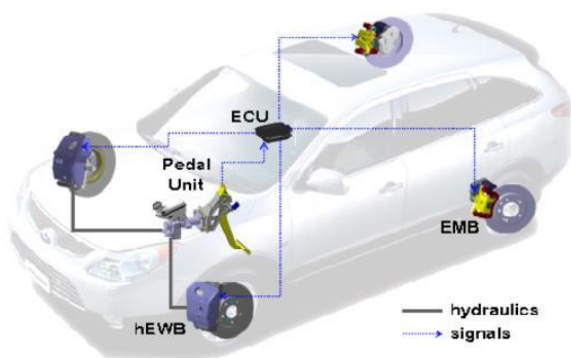


شکل ۴ بوستر هیبریدی در ترمز سیمی [۸]

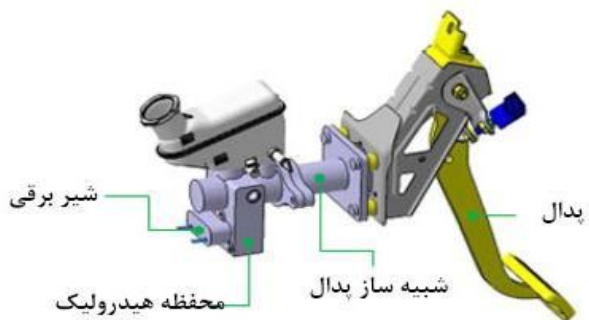
حسگر جابه‌جایی برای اندازه‌گیری موقعیت نسبی بین پدال و پیستون سیلندر اصلی استفاده می‌شود که با توجه به میزان جابه‌جایی پدال ترمز، سیگنال‌ها را به کنترلر ارسال کرده و موتور براشلس شروع به چرخش کرده و روغن ترمز را به حرکت درمی‌آورد. در شکل ۵ قسمت مکانیکی بوستر هیبریدی مشاهده می‌شود.

ترمز EWB با ترکیب نیروی کلمپ و اصطکاک، عمل ترمزگیری را انجام می‌دهد. اما مهم‌ترین عیبی که باعث شده استفاده از ترمز الکترومکانیکی در خودروها گسترده نشود بحث امنیت این ترمزها است که با قطع شدن برق خودرو، ترمز هم کاملاً از کار می‌افتد؛ بنابراین تا به امروز ترمزهای سیمی به صورت الکتروهیدرولیکی استفاده می‌شود. در این صورت کالیپ‌های جلو همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، باید به صورت الکتروهیدرولیکی یا hEWB به کار گرفته شوند.

تغییرات در سیستم ترمز سیمی مبتنی بر hEWB بدین گونه است که در واحد پدال، یک محفظه هیدرولیک و شیرهای برقی همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است اضافه می‌شود. شیرهای برقی معمولاً در حالت باز هستند، به این معنی که روغن ترمز از محفظه هیدرولیک از طریق خطوط هیدرولیک به عملگر ترمز منتقل می‌شود. هنگامی که راننده پدال را فشار می‌دهد، فشار هیدرولیک افزایش می‌یابد. هنگامی که شیرهای برقی با ورودی برق بسته شوند، افزایش فشار هیدرولیک متوقف می‌شود و واحد پدال در حالت شبیه‌ساز پدال و ترمز در وضعیت تمام برقی خواهد بود.



شکل ۹ محل قرارگیری کالیپ‌های ترمز EMB و hEWB [۱۰]

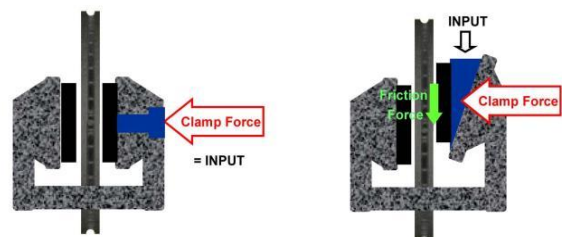


شکل ۱۰ واحد پدال مبتنی بر hEWB [۱۰]

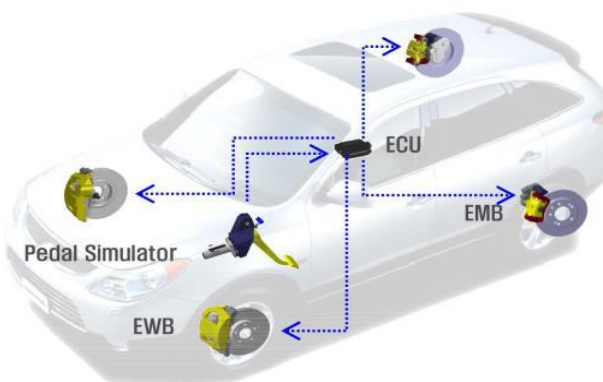
۴- نوآوری‌ها و حوزه‌های تحقیقات جدید در سیستم ترمز سیمی

ترمزهای تمام برقی هستند که دارای کالیپ‌های موتوردار هستند و نیاز به نیروی هیدرولیکی ندارند. در نتیجه مونتاژ کردن راحتی دارند و آسیب به محیط‌زیست آن کمتر است. همچنین به دلیل عدم نیاز به پیستون روغن، فضای کمتری اشغال می‌کنند و نیاز به بررسی نشت و هواگیری روغن ندارند. استفاده از این ترمزها در سیستم ترمزهای سیمی و حذف قسمت‌های هیدرولیکی سبب می‌شود سرعت ترمزگیری و زمان پاسخ سیستم به شدت افزایش یابد [۷].

سئونگ و همکاران [۱۰] بیان کردند که ترمزهای الکترومکانیکی EMB برای فعال شدن در محور جلو به دلیل نیاز به نیروی ترمز بیشتر، به جای منبع ۱۲ ولتی احتیاج به منبع ۴۲ ولتی دارند. اما فراهم کردن ولتاژ ۴۲ ولتی در خودرو، دشوار است. به کمک ترمز سیمی می‌توان این مشکل را هم حل کرد. یکی از بهینه سازی‌ها برای حل این مشکل استفاده از ترمز EWB در محور جلو و ترمز EMB در محور عقب خودرو است (شکل ۷). علت استفاده از ترمز EWB در جلو، نیاز به نیروی ترمز بیشتر در آنجا است. همچنین باعث استفاده کمتر از انرژی الکتریکی سیستم می‌شود. با توجه به شکل ۸ با تبدیل EMB به EWB در محور جلو همزمان با ثابت نگه داشتن نیروی ترمز، مقدار ولتاژ مورد نیاز هم به ۱۲ ولت کاهش می‌یابد.

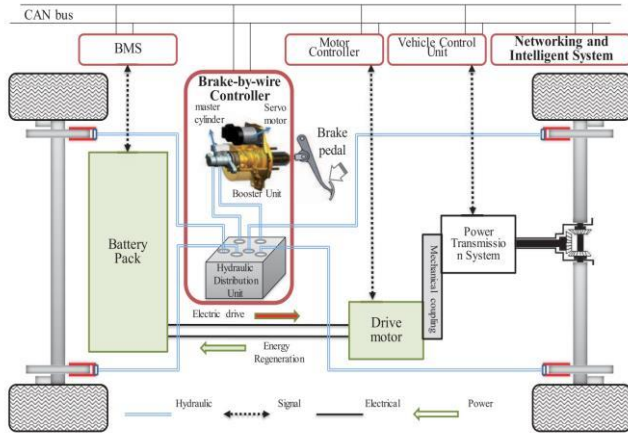


شکل ۷ مکانیزم EMB (چپ) و EWB (راست) [۱۰]



شکل ۸ محل قرارگیری کالیپ‌های ترمز EMB و EWB [۷]

۴-۱- بازیابی انرژی



شکل ۱۱ دیاگرام ترمز سیمی همراه با سیستم بازیابی انرژی [۱۲]

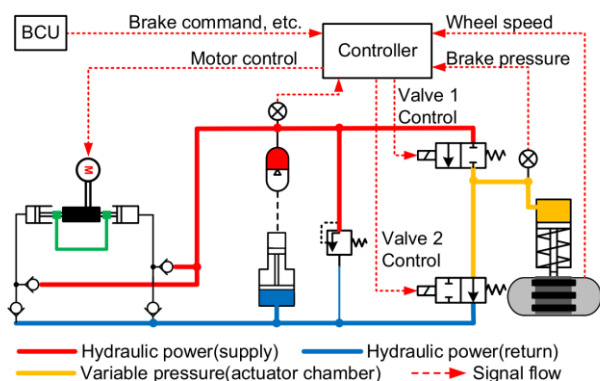
۴-۲- افزایش پایداری خودرو در ترمز سیمی

مونتانی و همکاران [۱۳] به معرفی روشی برای افزایش دقت سیستم کنترل پایداری در خودروهای دارای ترمز سیمی پرداخته‌اند. خودروهای معمول دارای برنامه کنترل پایداری^۳ هستند. اما ماژول‌های برنامه کنترل پایداری معمولی قادر به ایجاد پایداری مناسب و در نتیجه دستیابی به بهترین عملکردهای دینامیکی در هر زمان در حین حرکت خودرو نیستند. دینامیک وسیله نقلیه به شدت غیر خطی است و معمولاً به محاسبات زیادی برای کنترل نیاز دارد. ESP خودروهای مجهز به ترمز سیمی، دارای یک کنترل منطقی مرکزی و خطوط هیدرولیک برای فعال کردن کالیبرها است. این معماری دارای مقادیری تاخیر بین دستور و فعال سازی است.

سیستم پایداری خودرو در شرایط لغزندگی جاده به‌منظور پایداری خودرو، به‌صورت خودکار ترمزگیری می‌کند. در این روش به بررسی سیستم کنترل پایداری ساده و نوینی پرداخته شده است که از طریق رگولاتور درجه دوم خطی (LQR) به جای کنترلر PID عمل می‌کند. با توجه به شکل ۱۲ این نوع از کنترلر با ردیابی خطاهای بین مقادیر مرجع و واقعی نرخ انحراف و زاویه لغزش جانبی، قادر است در زمان واقعی مقادیر فشاری را در عملگرهای ترمز با اطمینان از اینکه که خطاهای آن نزدیک به صفر شوند، اعمال کند؛ بنابراین با کاهش خطاهای زاویه لغزش و شتاب جانبی بین مقادیر حالت پایدار و مقادیر واقعی خودرو، منجر به افزایش پاسخ سیستم می‌شود. این سیستم با استفاده از سیگنال CAN Bus با عملگرهای ترمز سیمی در ارتباط است.

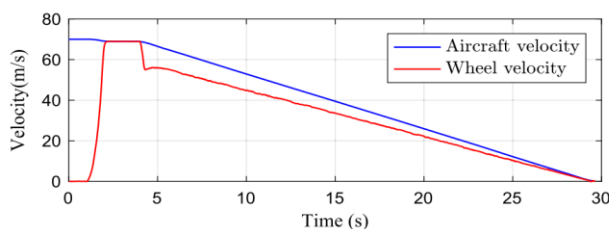
بازیابی انرژی یکی از مهم‌ترین موضوعات سیستم ترمز سیمی است. به‌منظور بهبود بهره‌وری انرژی خودرو، طراحی سیستم ترمز نیاز به در نظر گرفتن بازیابی انرژی ترمز دارد. در خودروهای الکتریکی استفاده از سیستم بازیابی انرژی ترمز به‌منظور تولید بخشی از نیروی الکتریکی باتری، ضرورت بیشتری دارد. خودروها به دلیل ترمزهای مکرر در سطح شهر، انرژی زیادی را هدر می‌دهند. سیستم بازیابی انرژی ترمز می‌تواند انرژی جنبشی ترمز را به انرژی الکتریکی تبدیل کند و سپس به باتری بازگرداند.

استراتژی‌های کنترلی مختلفی برای این سیستم وجود دارد که باهدف اطمینان از عملکرد صحیح ترمز و بازیابی هرچه بیشتر انرژی ترمزگیری طراحی شده است. عوامل مؤثر بر میزان انرژی بازیابی شده از ترمز به عواملی مانند سرعت وسیله نقلیه، نوع باتری و مشخصه گشتاور خروجی موتور بستگی دارد [۱۱]. منگ و همکاران [۱۲] با ارائه شکل ۱۱، ساختار سیستم ترمز احیایی^۱ در ترمز سیمی را برای خودروهای برقی نشان داده‌اند. این سیستم از مواردی همچون سیستم مدیریت باتری^۲، کنترلر، کنترل کننده موتور، واحد کنترل ترمز، واحد پدال ترمز، بسته باتری، موتور محرک و سیستم انتقال نیرو تشکیل شده است. در اینجا سیستم مدیریت باتری یک سیستم کنترلی است که از ایمنی باتری محافظت می‌کند و وضعیت باتری را به طور مداوم برای اطمینان از ایمنی آن کنترل می‌کند. کنترل کننده موتور، عملیات استارت، جلو و عقب، صعود و سایر حالات رانندگی را طبق ورودی‌هایی مانند وضعیت دنده، دریچه گاز و وضعیت ترمز کنترل کرده و بخشی از انرژی ترمز را در باتری ذخیره می‌کند. اجزای کنترلر شامل سیلندر اصلی، موتور سروو، واحد تقویت کننده و واحد توزیع هیدرولیک است. در هنگام ترمزگیری، جابجایی پدال ترمز و سروو موتور باعث افزایش فشار روغن در سیلندر اصلی می‌شود که نیروی ترمز مناسب را از طریق واحد توزیع هیدرولیک به چرخ‌ها توزیع می‌کند. بخشی از نیروی ترمز برای عمل ترمزگیری استفاده می‌شود، در حالی که بخش دیگر نیرو برای ترمز احیا کننده برای بازیابی انرژی ترمز استفاده می‌شود. در سیستم بازیابی انرژی ترمز از طریق اتصال یک موتور جریان متناوب یا ژنراتور به سیستم انتقال قدرت صورت گرفته و با عمل ترمزگیری و کاهش دور موتور، انرژی الکتریکی توسط ژنراتور تولید شده و در باتری ذخیره می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار عملکرد ترمز سیمی در جنگنده [۱۷]

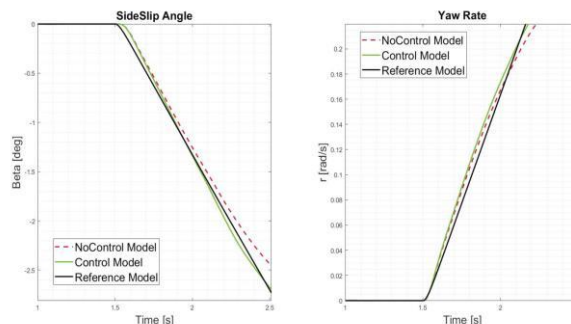
در شکل ۱۴ نمودار عملکرد ترمز یک هواپیمای نظامی که سیستم PWABS روی آن نصب شده مشاهده می‌شود. در این آزمایش سرعت از حدود 70 m/s در ۱ ثانیه به 50 m/s کاهش یافته است. یعنی ظرف یک ثانیه سرعت چرخ‌ها حدود ۳۰ درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۴ نتایج شبیه‌سازی عملکرد ترمز [۱۷]

۴-۴- حوزه‌های تحقیقات پیشنهادی

ترمز سیمی، فناوری ترمز بسیار نوپا و آینده داری است که به دلیل سادگی و عملکرد بالا روزه‌روز خودروسازان بیشتری را به خود جلب می‌کند. اگر فناوری ترمز سیمی را در سه بخش سیستم، مزایا و عملکرد بررسی کنیم، در هر سه بخش نسبت به فناوری‌های قدیمی ترمز، قدرت‌نمایی می‌کند. در بخش سیستمی به لحاظ داشتن سه مجموعه قطعه اصلی، سادگی مناسبی دارد و همین امر سبب عیب‌یابی راحت‌تر می‌شود. در بخش مزایا، این ترمزها هوشمند هستند و افزایش وزن خودرو تأثیری بر عملکرد ترمز ندارد و خودرو با در نظر گرفتن مقدار بار درون آن، عملکرد یکسانی دارد. همچنین کوچک‌ترین نقصی در آن روی داشبورد نمایش داده می‌شود و برای رانندگان و تعمیرکاران بسیار قابل کنترل است. برای توسعه دهندگان نیز با متصل شدن به برد کنترل ترمز، همه چیز قابل تنظیم است و



شکل ۱۲ عملکرد سیستم در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت [۱۳]

۴-۳- ترمز سیمی در هواپیماهای نظامی

سیستم ترمز متداول در هواپیماهای نظامی از یک منبع هیدرولیک و پمپ تشکیل شده است. عملکرد مناسب ترمز در جنگنده‌ها نیازمند لوازم جانبی سنگین و متعددی مانند خطوط لوله و سوپاپ‌هایی در نزدیکی چرخ هواپیما هستند که تحت تأثیر جریان هوای بسیار سرد قرار می‌گیرند و می‌توانند سبب بروز اختلال در مسیر شوند [۱۴]. از آنجایی که سرعت هواپیماهای نظامی بسیار بالاست؛ به‌منظور توقف هواپیما دمای دیسک ترمز از ۶۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد متغیر است. این حرارت به لوله‌های ترمز نفوذ کرده و سبب کربونیزه شدن روغن ترمز می‌شود. در نتیجه رسوب درون لوله‌ها افزایش می‌یابد و سبب خسارت‌های جانی و مالی زیادی خواهد شد [۱۵]. استفاده از ترمزهای EMA در هواپیماهای نظامی نیز ناکارآمد است زیرا گشتاور موتورهای پله‌ای مورد استفاده در ترمزها ضعیف است و نمی‌تواند هواپیما را در سرعت‌های بالا متوقف کند [۱۶].

ژیائو و همکاران [۱۷] با طراحی نوعی از سیستم ترمز سیمی به نام PWABS این مشکلات را رفع کرده‌اند. این سیستم ترمز با توجه به شکل ۱۳ شامل یک موتور الکتریکی، یک پمپ هیدرولیک سفارشی، دو شیر قطع و وصل، دو سنسور فشار، یک مخزن، یک آکومولاتور، یک کنترلر و سایر متعلقات می‌باشد. کنترلر این سیستم دستورات را از واحد کنترل ترمز دریافت می‌کند. پمپ هیدرولیک توسط موتور به گردش در می‌آید و روغن را با فشار بالا از طریق عملگرهای ترمز ارسال می‌کند. شیرهای قطع و وصل نیز در مسیر عملگرها قرار گرفته‌اند تا با توجه به کنترلر، دریچه‌ها قطع و وصل شوند. یک آکومولاتور هیدروپنوماتیکی پیستونی برای تثبیت فشار مدار خروجی و تضعیف ارتعاش قرار داده شده است و مخزن روغن به کمک نیتروژن در محفظه گاز آکومولاتور تحت فشار قرار می‌گیرد.

به دلیل اینکه عمل ترمزگیری در خودرو یکی از مهم‌ترین عامل در ایمنی رانندگان محسوب می‌شود، خودروسازان باید همیشه شرایطی را در نظر بگیرند که در وضعیت‌های غیرمنتظره هم راننده قادر به توقف خودرو باشد. از آنجایی که جایگزین کردن قطعات الکترونیکی با مکانیکی، نیازمند انرژی الکتریکی است. بنابراین قطع الکتریسیته می‌تواند باعث حادثه شود. پس نیاز است که در کنار استفاده از ترمز سیمی قطعات هیدرولیکی قدیمی هم استفاده شود و در هنگام نقص سیستم وارد عمل شود که در این مقاله شیوه‌ی تعامل بوستر هیدرولیکی و الکترونیکی در یک قطعه شرح داده شد. اما نصب ماژول‌های الکترونیکی پیشرفته‌تر، روی ترمز سیمی و هماهنگی آن با تجهیزات هیدرولیکی دشوار است؛ بنابراین باید این تجهیزات هیدرولیکی حذف شود. تا این لحظه راهکار اساسی برای حل این مشکل یافت نشده و امروزه فناوری ترمز سیمی به‌صورت کاملاً الکترونیکی، فقط در سطح محدود استفاده می‌شود. اما به دلیل پتانسیل بالا به‌منظور افزایش ایمنی خودرو و همچنین قابلیت تطبیق‌پذیری با دیگر فناوری‌های ترمز، آینده روشنی دارد و استفاده از آن در حال توسعه است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که در آینده نزدیک استفاده از سیستم ترمز هیدرولیکی به دلیل محدودیت‌ها و آثار منفی آن که در این مقاله به آنها اشاره شد، به کلی کنار گذاشته شود و ترمز وسایل نقلیه هوایی و زمینی به ترمزهای سیمی مجهز شود.

۶- مراجع

- [1] Brake by Wire history, <https://www.brakebywire.com/brake-by-wire-history.html>, Accessed on 20 July, (2021).
- [2] Yu, Z., Review on Hydraulic pressure control of electro-hydraulic brake system, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 14, pp. 1, doi: 10.3901/JME.2017.14.001, (2017).
- [3] Gong, X., Ge, W., Yan, J., Zhang, Y., and Gongye, X., Review on the development, control method and application prospect of brake-by-wire actuator, *Actuators*, Vol. 9, No. 1, pp. 15, doi: 10.3390/act9010015, (2020).
- [4] Brake by Wire System, <https://www.brembo.com/en/>, Accessed on 11 March, (2022).
- [5] Bayer, B., Büse, A., Linhoff, P., Piller, B., Rieth, P.E., Schmitt, S., Schmittner, B., Völkel, J. and Zhang, C., Electro-mechanical brake systems, In *Handbook of Driver Assistance Systems* (pp. 731-

می‌توانند با نصب نرم افزارهای مربوطه، سیستم را به‌روزرسانی کنند. به همین دلیل، مقالات جدید در زمینه افزونگی در سطح سیستمی ترمزهای سیمی [۱۸] و سیستمهای ترمز سیمی روادار خطا [۱۹] تمرکز کرده‌اند.

در حوزه عملکرد، به دلیل حذف قطعات هیدرولیکی، سرعت پاسخ سیستم بسیار بالاست اما همانند همه فناوری‌ها نقص‌ها و محدودیت‌هایی دارد. به دلیل اتکای صرف به انرژی الکتریکی در این نوع ترمز، قطع انرژی به هر دلیل چالش‌برانگیز است. دلیل استفاده نشدن گسترده از این فناوری همین علت است و این از بزرگترین چالش این سیستم است و می‌بایست قبل از هر نوع بهینه‌سازی، تمام تمرکز روی رفع این چالش باشد. تازه‌ترین راهکار برای رفع آن، استفاده از بوسترهای الکتروهیدرولیکی است. اولین راهکاری که فارغ از راهکار فوق به ذهن خطور می‌کند استفاده از باتری یدکی است. اما برای به کار افتادن باتری یدکی هم نیاز به یک سیستمی است که در مواقع نقص در سیستم اصلی، آن را فعال کند. یا همانند برق اضطراری در ساختمان‌ها، نیاز به یک ذخیره‌کننده انرژی اضافه است که باید در مدار قرار بگیرد و انرژی الکتریکی قبل از رسیدن به مصرف‌کننده از آن عبور کند. پیاده‌سازی چنین سیستمی در خودرو منجر به تحول گسترده‌ای در سیستم برق خودرو خواهد شد؛ بنابراین عملکرد آن می‌بایست طی آزمایش‌های گوناگون عملی قرار گیرد و به‌صورت تئوری کم‌فایده است. همچنین هزینه و عوامل دیگر بررسی شود.

به منظور توسعه محصول هم می‌توان روی موارد زیر تمرکز کرد:

- بهینه‌سازی سیستم به‌منظور ترمز ایمن و سریع‌تر
- ایجاد بستری برای استفاده در وسایل نقلیه خودران سطح پنجم
- بهینه‌سازی بازایی انرژی ترمز در خودروهای الکتریکی

۵- نتیجه‌گیری

ترمز سیمی نوعی ترمز جدید است که کنترل آن توسط بردها و قطعات الکترونیکی انجام می‌شود. این قطعات شامل یک برد کنترل ترمز اصلی، عملگرها برای هر چرخ و یک شبیه‌ساز پدال است که دارای دو حسگر برای دریافت حرکت پدال است. همه این قطعات جایگزین تجهیزات هیدرولیکی مانند پمپ، تسمه و سیلندر می‌شود. استفاده از این فناوری به دلیل عدم وجود اتصالات هیدرولیکی، علاوه بر کاهش وزن خودرو سبب کاهش سروصدا و لرزش شده و زمان واکنش ترمز را کاهش، و عیب‌یابی آن را بسیار راحت‌تر و سریع‌تر می‌کند.

- [14] Yin, Q., Jiang, J.Z., Neild, S.A. and Nie, H., Investigation of gear walk suppression while maintaining braking performance in a main landing gear, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 91, pp. 122–135, doi: 10.1016/j.ast.2019.05.026, (2019).
- [15] Deng, J., Hu, K., Lu, B., Zheng, B., Fan, S., Zhang, L. and Cheng, L., Influence of B4C on oxidation resistance of PSN/borosilicate glass-B4C field-based repair coating of C/C aircraft brake materials at 700–900 °C, *Ceramics International*, Vol. 45, No. 16, pp. 20860–20872, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.07.075, (2019).
- [16] Yao, J.F., Chen, C. and Chen, H.P., Experimental study on friction braking deceleration system based on micro displacement mechanism, in *Proceedings of the 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA)*, Chengdu, China, October, pp. 260–264, doi: 10.1109/SPAWDA.2017.8340335, (2017).
- [17] Jiao, Z., Zhang, H., Shang, Y., Liu, X. and Wu, S., A power-by-wire aircraft brake system based on high-speed on-off valves, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 106, doi: 10.1016/j.ast.2020.106177, (2020).
- [18] Mi, J., Wang, T., and Lian, X., A system-level dual-redundancy steer-by-wire system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(12), 3002–3025, (2021).
- [19] Mortazavizadeh, S.A., Ghaderi, A., Hajian, M., and Ebrahimi, M., A fault-tolerant steer-by-wire system based on angular position estimation, *Electrical Engineering*, 103(5), 2403–2414, (2021).
- 744), Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-09840-1_31-1, (2016).
- [6] Limpert, R., Brake design and safety, SAE international, 2nd ed., *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, USA, (2011).
- [7] Cheon, J.S., Brake by wire system configuration and functions using front EWB (Electric Wedge Brake) and Rear EMB (Electro-Mechanical Brake) Actuators, *SAE Technical Paper*, doi: 10.4271/2010-01-1708, (2010).
- [8] Wang X, Wu X, Cheng S, Shi J, Ping X, Yue W., Design and experiment of control architecture and adaptive dual-loop controller for brake-by-wire system with an electric booster, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, No. 3, pp. 1236–1252, doi: 10.1109/TTE.2020.3010279, (2020).
- [9] Audi, <https://www.audiusa.com/us/web/en.html>, Accessed on 11 March, (2020).
- [10] Cheon, J.S., Kim, J. and Jeon, J., New brake by wire concept with mechanical backup, *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 2012-01–1800, doi: 10.4271/2012-01-1800, (2012).
- [11] Liu, W., Chen, G., Zong, C., and Li, C., Research on electric vehicle braking force distribution for maximizing energy regeneration, *SAE Technical Paper*, doi: 10.4271/2016-01-1676, (2016).
- [12] Meng, B., Yang, F., Liu, J. and Wang, Y., A survey of brake-by-wire system for intelligent connected electric vehicles, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 225424–225436, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040184, (2020).
- [13] Montani, M., Capitani, R. and Annicchiarico, C., Development of a brake by wire system design for car stability controls, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 24, pp. 137–154, doi: 10.1016/j.prostr.2020.02.013, (2019).



تولید انرژی از جت استریم

مونا محمدی*

رئیس گروه سنجش و توزیع آب
شرب و صنعت، سازمان آب و
برق خوزستان، اهواز

صابر علیدادی

معاون آبرسانی، سازمان آب و
برق خوزستان، اهواز

چکیده: به دلیل ملاحظات زیست محیطی اهمیت استفاده از انرژی پاک دو چندان شده است. در این راستا، یکی از راهکارهای پیشنهادی، تولید انرژی از بادهای ارتفاع بلند و یا جت استریم است. از سوی دیگر در تحقیقات پیشین موضوعات جت استریم، نحوه تشکیل بادهای ارتفاع بلند، اثرات تغییرات اقلیمی بر جت استریم و چگالی قدرت باد در نقاط مختلف جهان به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله ضمن جمع کلیه مباحث مرتبط با این موضوع، در ابتدا با بیان لایه های اتمسفر، حرکت هوا در اطراف زمین و نحوه تشکیل جت استریم، اثرات تغییرات آب و هوایی بر این بادهای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند، وجود تغییرات دمایی ناشی از تابش خورشید و ایجاد سه سلول دمایی هادلی، فرل و قطبی همزمان با اثر نیروی کوریولیس بر روی توده های متحرک هوا، موجب ایجاد جت استریم در دو نیم کره شمالی و جنوبی در عرض های ۳۰ درجه و ۶۰ درجه می شود. تغییرات آب و هوایی، باعث افزایش دامنه موج جت استریم و توسعه آن به شمال و جنوب شده است. بررسی ها نشان دهنده این موضوع است که ایران حائز مقام دهم در خاورمیانه به لحاظ چگالی انرژی بادهای ارتفاع بلند در ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین است. در ارتفاع ۱۰۰۰ متری نیز، در ۵۰ درصد دوره زمانی، غرب و مرکز ایران دارای چگالی قدرت باد 0.3 kW/m^2 و در ارتفاع ۱۰۰۰۰ متری و در همین دوره زمانی، تمامی نواحی ایران دارای چگالی قدرت باد 3 kW/m^2 هستند.

واژه های راهنما: جت استریم، بادهای ارتفاع بلند، توربین بادی، تولید انرژی، تغییرات آب و هوایی

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵

Power generation from jet stream

Moona

Mohammadi *

Leader of
Measurement and
Distribution Group of
Drinking and Industrial
water, Khuzestan Water
and Power Authority
(KWPA), Ahvaz

Saber Alidadi

Deputy Director of
Water Supply,
Khuzestan Water and
Power Authority
(KWPA), Ahvaz

Abstract: Due to environmental considerations, the importance of using clean energy has been signified. In this regard, one of the proposed solutions is to generate energy from high-altitude winds or jet streams. On the other hand, in previous research, the issues of the jet stream, the formation of high-altitude winds, the effects of climate change on the jet stream, and wind power density in different parts of the world have been investigated separately. In this paper, while summarizing all topics related to this issue, the effects of climate change on these winds have been investigated by stating the layers of the atmosphere, the movement of air around the earth, and how the jet stream is formed. The results show that the presence of temperature changes caused by solar radiation and the creation of three temperature cells, Hadley, Ferrel, and Polar, simultaneously with the effect of the Coriolis force on moving air masses, causes the creation of a jet stream in the northern and southern hemispheres at latitudes of 30 degrees and 60 degrees. Climate change has increased the amplitude of the jet stream and its expansion to the north and south. Surveys show that Iran ranks 10th in the Middle East in terms of the energy density of high-altitude winds at a height of 500 meters above the ground. At an altitude of 1000 meters, in 50% of the time period, the west and center of Iran have a wind power density of 0.3 kW/m^2 , and at an altitude of 10000 meters and in the same time period, all areas of Iran have a wind power density of 3 kW/m^2 .

Keywords: Jet stream, High altitude winds, Wind turbines, Power generation, Climate change

۱- مقدمه

استفاده از انرژی باد از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. ایرانیان در قرن هفتم میلادی نخستین مردم پیشتاز در این راه بوده اند و با نصب دکل های عمودی بلند در سیستان که بر روی آن ها پره هایی مستطیلی نصب بوده موفق شدند با نیروی باد چرخ چاه را به گردش درآورند و آب را از چاه به مزارع برسانند و نخستین نیروگاه بادی جهان را به نام خود ثبت نمایند [۱،۲]. با اینکه سابقه استفاده از آسیاب بادی در ایران به دویست سال قبل از میلاد بازمی گردد اما نخستین مورد ثبت شده آن در اروپا مربوط به سده های ۱۱ و ۱۲ پس از میلاد است [۳]. نخستین گام برای تولید برق در کلاس مگا وات و با اتصال به شبکه در قالب استفاده از توربین بادی، در بریتانیا و در سال ۱۹۵۱ برداشته شد [۴]. بعد از این پیشرفت انرژی باد به تدریج به یکی از انرژی های تجدید پذیر قدرتمند در جهان تبدیل شده به گونه ای که طبق گزارش های منتشر شده از سال ۲۰۰۰ تا به اکنون متوسط نرخ رشد سالیانه این انرژی ۲۱ درصد بوده است [۵].

توربین های بادی تجاری در سال ۱۹۸۰ دارای قطر روتور و ارتفاع هاب ۲۰ متر و توان نامی ۱۰۰ کیلو وات بودند. در سال ۲۰۱۷، با توسعه فناوری، قطر روتور و ارتفاع هاب به ترتیب ۱۱۳ متر و ۱۲۸ متر و قدرت نامی به ۲/۹۷ مگا وات رسید. قیمت تمام شده انرژی و اندازه توربین دو فاکتور مهم، موثر و محدود کننده در طراحی و همچنین توسعه تکنولوژی توربین های بادی هستند. به لحاظ تئوری افزایش ارتفاع هاب موجب دسترسی به سطح پایدارتری از انرژی باد است زیرا در ارتفاع های بالاتر، باد، کمتر تحت تاثیر عواملی نظیر ساختمان ها، درختان و یا دیگر موانعی است که همگی موجب کاهش قدرت آن می شوند. اما افزایش ارتفاع هاب دارای محدودیت هایی نظیر افزایش قیمت و نیز مشکلات حمل و نقل است. افزایش میزان فولاد بکار رفته یکی از عوامل مهم موثر بر افزایش قیمت تمام شده خواهد بود [۶]. به دلیل مشکلات یاد شده، دانشمندان از سال ۲۰۰۷ به دنبال راهکاری جدید بودند تا بتوانند علاوه بر گذر از مشکلات افزایش هزینه و حمل و نقل، به منابع پایدار و جدید انرژی باد دست یابند. این سیستم شامل استفاده از تجهیزاتی است که در ارتفاع بسیار بالاتری از سطح دریا قرار دارند. باد در ارتفاعات بالا، پایدارتر، ماندگارتر و دارای سرعت بالاتر است. همچنین قدرت تولید در توربین های بادی متناسب با توان سوم سرعت است. بنابراین با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها که شامل چگالی و سطح می باشد، به عنوان مثال اگر سرعت باد دو و یا سه برابر شود، میزان توان استحصالی به ترتیب ۸ و ۲۷ برابر خواهد شد

[۷،۸]. با توجه به این نتیجه، استفاده از باد های ارتفاع بلند می تواند موجب استحصال انرژی قابل توجهی گردد. بادهای در ارتفاعات بالا عموماً در ارتفاع بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح زمین می وزند در حالی که توربین های بادی متداول دارای ارتفاعی بین ۸۰ تا ۱۵۰ متر هستند بنابراین استفاده از این بادهای که به نام جت استریم شناخته می شوند نیازمند تکنولوژی خاصی است [۹]. فناوری های متفاوتی برای به دام انداختن انرژی جنبشی ارتفاعات بلند پیشنهاد شده است که می توان به لادرمل، کایت جن، فلای جن و ماجن اشاره کرد [۱۰،۹].

با توجه به مطالب فوق، اساس استحصال انرژی از توربین های ارتفاع بلند استفاده از انرژی جت استریم است. بنابراین شناخت این پدیده و نحوه شکل گیری و نیز نواحی ایجاد و جریان آن کلید بسیار مهمی برای بکار گیری انرژی حاصل از آن است. علاوه بر این موضوع، تغییرات آب و هوایی در کره زمین باعث شده است که این پدیده از این تغییرات متأثر گشته و گستره ی تاثیر گذاری آن تغییر یابد. در این مقاله علاوه بر پرداختن به مساله جت استریم، آخرین تحقیقات در خصوص تاثیرات تغییرات اقلیمی بر روی گستره جریان آن بیان می گردد. همچنین نقشه چگالی قدرت باد در ارتفاع های مختلف و نیز وضعیت این بادهای در اقلیم ایران مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- لایه های اتمسفر

اتموسفیر زمین دارای چند لایه است، هر یک از آن ها دارای ویژگی های خاص خود می باشد. با حرکت از سطح زمین به طرف بالا، اولین لایه اتمسفر به نام تروپوسفر یا اتمسفر زیرین شکل می گیرد. این لایه دارای ارتفاع ۸ تا ۱۲ کیلومتری بوده که در مناطق مختلف (قطب و استوا) متفاوت است (شکل ۱). تروپوسفر لایه ای متلاطم است و آب و هوای زمین در آن جریان دارد. بیشترین بخار آب و بیشترین درصد اتمسفر در این لایه موجود بوده و ابرها در این ناحیه ایجاد می شوند. بیشترین ارتفاع این لایه بر روی استوا و کمترین آن بر روی قطب قرار دارد. دومین لایه که به استراتوسفر معروف است، از فاصله ۱۲ تا ۵۰ کیلومتری بالای سطح زمین امتداد می یابد. اوزون در این لایه متمرکز است [۱۱]. بر خلاف لایه تروپوسفر که با افزایش ارتفاع، حرارت کاهش می یابد. در این لایه با افزایش ارتفاع درجه حرارت افزایش می یابد. علت افزایش حرارت کاهش آشفستگی جریان هوا و وجود ملکول های اوزن است. ملکول های اوزون نور فرابنفش خورشید (UV) را جذب کرده و به حرارت تبدیل می کنند به همین دلیل در این لایه هر چه ارتفاع افزایش می یابد میزان دما نیز افزایش می یابد.

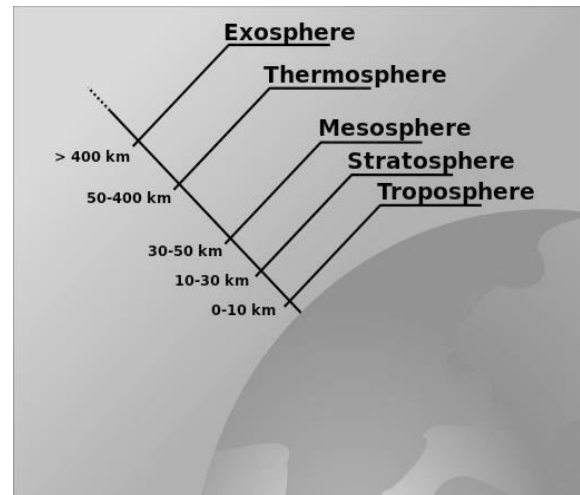
۳- حرکت هوا در اطراف زمین

محور زمین یک خط فرضی است که از مرکز کره زمین می‌گذرد زاویه ای که محور زمین در فضا نسبت به خورشید ایجاد می‌کند، اندکی مایل بوده و در حدود $23/45^\circ$ درجه است. حرکت زمین به دور خود (حرکت وضعی) باعث ایجاد شب و روز و حرکت زمین به دور خورشید (حرکت انتقالی) باعث ایجاد فصل‌ها می‌شود. به دلیل انحراف محور زمین، اثر حرکت انتقالی زمین بر روی بخش‌های مختلف کره زمین متفاوت بوده و باعث ایجاد چهار فصل در طی سال می‌شود. چرخش زمین به دور محور خود مانع از حرکت مستقیم هوا از طرف استوا به سوی قطب‌ها شده است (شکل ۲). علاوه بر این، حرکت وضعی زمین منجر به ایجاد نیروی کوریولیس می‌شود. اثر این نیرو به صورت انحراف بادها نمایان می‌گردد [۱۴].

نیروی کوریولیس، یک شبه نیرو است. عملکرد این نیرو منجر به انحراف اجسام در حال حرکت به بیرون از خط راست، از دید یک ناظر درون یک دستگاه چرخان می‌شود. شکل ۳ حرکت گلوله در دو دستگاه مرجع لخت و غیر لخت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در دستگاه مرجع لخت که در بخش بالای تصویر نشان داده شده است، گلوله شماره ۱ در بخش بالای تصویر در مسیری مستقیم، در صفحه چرخان با اصطکاک ناچیز حرکت می‌کند، اما ببیند که با شماره ۲ نشان داده شده است که بر روی مرجع چرخان یا غیر لخت قرار دارد، بخش پایینی تصویر، به دلیل نیروی کوریولیس که متناسب با سرعت چرخش و توان دوم نیروی گریز از مرکز می‌باشد، گلوله شماره ۱ را در حال حرکت در مسیری خمیده می‌بیند. [۱۵].



شکل ۲ جریان هوا در صورت عدم چرخش زمین به دور خود [۱۳]

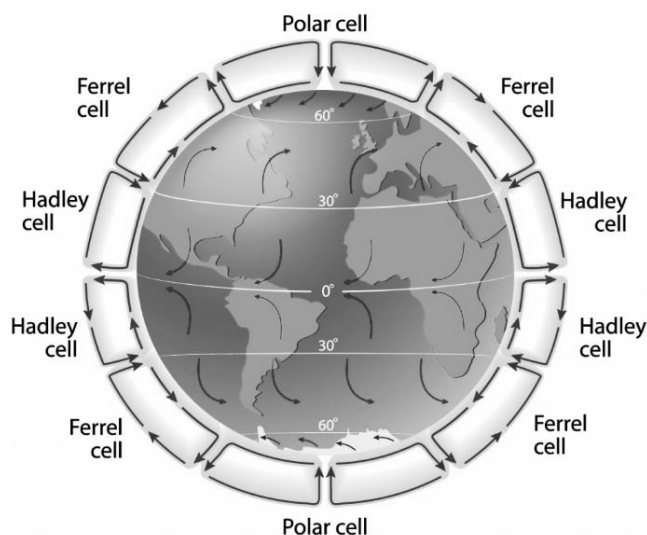


شکل ۱ لایه‌های مختلف اتمسفر زمین [۱۱]

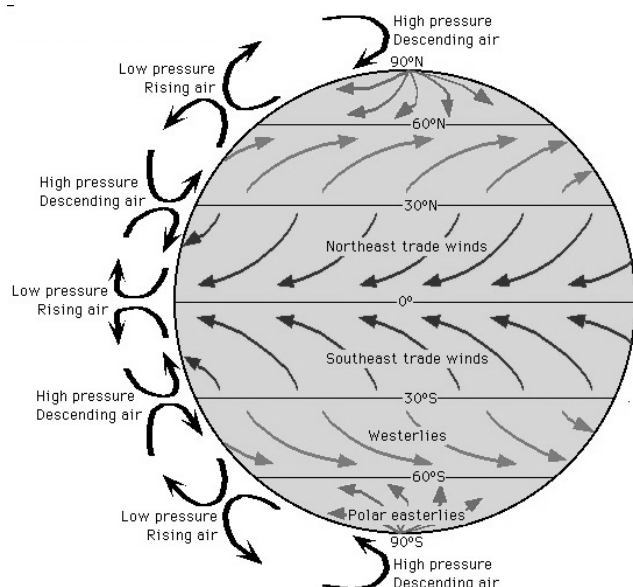
به دلیل آشفتگی کم، جت‌های مسافری تجاری در این لایه پرواز می‌کنند. لایه سوم اتمسفر زمین مزوسفر است. این لایه در ارتفاع ۵۰ تا ۸۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. شهاب سنگ‌هایی که به اتمسفر زمین می‌رسند در این لایه می‌سوزند. روند کاهش دمایی در مزوسفر مانند تروپوسفر است و با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. سردترین نقطه جو زمین با دمای 90°C درجه زیر صفر در این لایه قرار دارد. علاوه بر روند کاهشی دما، با افزایش ارتفاع، فشار نیز در این لایه کاهش می‌یابد. میزان فشار هوا در این لایه کمتر از یک درصد فشار هوا در سطح دریا است. لایه چهارم تروپوسفر بوده که در ارتفاع ۸۰ تا 700°C کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. این لایه، پرتوهای پر انرژی ایکس و فرابنفش ساطع شده از خورشید را جذب می‌کند به همین دلیل دمای این لایه از 500°C تا 2000°C درجه سانتی‌گراد متغیر است. پنجمین و آخرین لایه زمین به نام اگزوسفر شناخته می‌شود و در ارتفاع 700°C تا 10°C هزار کیلومتری از سطح زمین قرار دارد. در این لایه هوا بسیار رقیق بوده و به فضای خارج از جو زمین بیشتر شباهت دارد و به طور پیوسته هوا به بیرون جو زمین نشت پیدا می‌کند. به دلیل نشت مداوم هوا از این لایه کارشناسان ارتفاع 100°C تا 190°C هزار کیلومتری از سطح زمین را انتهای لایه اگزوسفر اتمسفر زمین می‌دانند [۱۱].

همان‌گونه که در تشریح لایه‌های مختلف زمین مشخص گردید مرطوب‌ترین لایه اتمسفر که ابرها نیز در آن شکل می‌گیرند تروپوسفر است. ارتفاع تروپوسفر بر فراز نواحی استوایی تا 20°C کیلومتر نیز می‌تواند افزایش یابد. اما ارتفاع آن در زمستان‌های نقاط قطبی می‌تواند تا 7°C کیلومتر کاهش یابد. این لایه نقش مهمی را در ایجاد تغییرات جوی بر روی کره زمین دارد [۱۲].

شرق می گردد. با رسیدن به عرض جغرافیایی ۳۰ درجه، هوای خنک شده و خشک شروع به فرو رفتن می کند و در نزدیکی سطح یک جریان برگشتی حلقه را کامل می کند و در طول مسیر شروع به جذب رطوبت می نماید. در این ضلع چرخشی اثر کوریولیس منجر به انحراف بادهای به سمت غرب می شود [۱۷، ۱۶]:

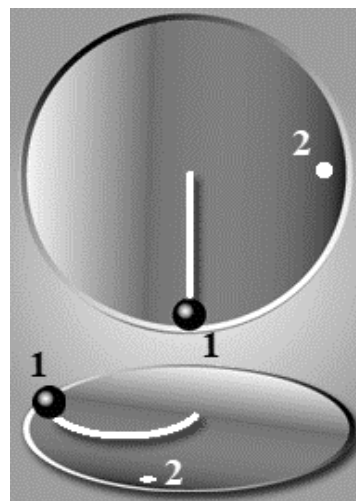


شکل ۴ سلول های هوایی سه گانه در اتمسفر [۱۸]



شکل ۵ نحوه چرخش هوا در عرض های مختلف جغرافیایی [۱۹]

علت فرو رفتن هوا در عرض ۳۰ درجه را می توان با بقای ممنتم زاویه ای بیان کرد. در یک سامانه چرخشی اگر هیچ گشتاور خالصی بر سیستم اثر نکند، ممنتم زاویه ای کل سیستم



شکل ۳ حرکت گلوله در دستگاه مرجع لخت و مرجع چرخان (غیر لخت) [۱۵]

خورشید تنها منبع گرمایی زمین است. از سویی دیگر به دلیل انحراف در محور زمین و انحنای آن، وجود اتمسفر، ابرها، وجود برف و یخ های قطبی، بخش های مختلف زمین به شکل های متفاوتی گرم می شوند. این وضعیت باعث تفاوت دمایی زیادی میان استوا و قطب ها می گردد، اما وجود چرخش در اتمسفر مانع از افزایش دمایی مداوم در استوا و نیز کاهش دمایی مداوم در قطب ها شده و این چرخش باعث انتقال انرژی و ایجاد باد در بخش های عمده ای از سطح زمین شده است. چرخش در اتمسفر در دو نیمکره شمالی و جنوبی در سه سلول به نام های هادلی، فرل^۲ و قطبی^۱ لایه تروپوسفر زمین اتفاق می افتد. شکل های ۴ و ۵ نحوه چرخش هوا در این سه سلول را نشان می دهد [۱۷، ۱۶].

در میان این سه سلول چرخشی، سلول هادلی بزرگترین سلول بوده که میان استوا تا عرض ۳۰ درجه شمالی و جنوبی در چرخش است. وجود هوای گرم و مرطوب در نزدیکی استوا موجب بارش شدید می شود. ایجاد بارش منجر به آزاد شدن گرمای نهان شده و در نتیجه باعث ایجاد حرکات بالارونده قوی هوا می گردد. این هوا در ارتفاع لایه تروپوسفر اتمسفر بالا می رود. با رسیدن هوا به انتهای تروپوسفر و رسیدن به استراتوسفر که هوا در آن شناور نیست، هوا قادر به ادامه حرکت بالارونده خود نخواهد بود. از سویی دیگر هوا به طور مدام از سطح استوا بالا می آید، بنابراین به دلیل فشاری که به آن وارد می گردد به سمت قطب سوق داده می شود. انحراف هوا به سمت قطب و همچنین وجود اثر کوریولیس منجر به انحراف این هوا به سمت

³ Polar Cell

¹ Hadley Cell

² Ferrel Cell

می گردد و به این ترتیب حلقه چرخش هوا تکمیل می شود [۲۰، ۱۶].

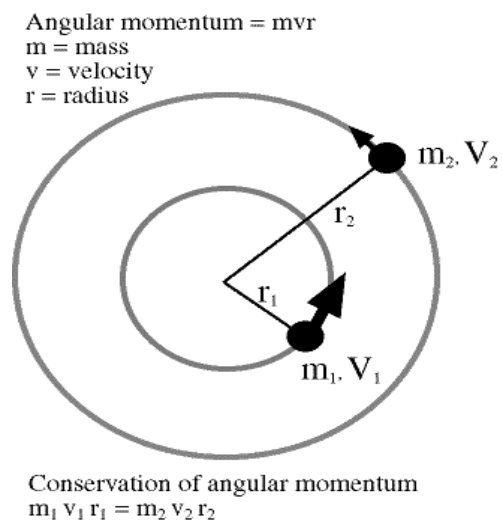
وجود سرعت های کم و سرعت های بالا در سطح زمین به ترتیب در عرض های ۳۰ درجه و ۶۰ درجه باعث ایجاد کمربند های پر فشار و کم فشار می شود. به این ترتیب کمترین بارش ها در عرض ۳۰ درجه و بیشترین بارش ها و هوای طوفانی در عرض های ۶۰ درجه اتفاق می افتد (شکل های ۴ و ۵) [۱۷، ۱۶].

۴- نحوه ایجاد جت استریم

پس از آشنایی با لایه های مختلف اتمسفر و نحوه گردش هوا در اطراف زمین، درک پدیده جت استریم آسان تر خواهد شد. همان گونه که در بخش ۳ اشاره شد، وجود گرادیان دمایی و اثر کوریولیس منجر به ایجاد سه سلول دمایی و ایجاد نواحی با بیشترین تغییرات دمایی در نواحی اطراف ۳۰ درجه شمالی/ جنوبی و ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی/ جنوبی می شود. زمانی که تغییرات دمایی میان دو منطقه افزایش یابد، قدرت باد نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین این نواحی دارای قوی ترین باد در اتمسفر فوقانی هستند. این باد در ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی/ جنوبی به نام جت استریم قطبی^۴ و در ۳۰ درجه شمالی/ جنوبی به نام جت استریم جنب حاره^۵ نامیده می شود (شکل ۷). ارتفاع جت استریم از ۶ تا ۱۲ کیلومتر و سرعت آن می تواند به بیش از ۴۴۲ کیلومتر بر ساعت برسد [۲۳، ۲۲].

با توجه به اینکه جت استریم انرژی جنبشی خود را از تضاد دمایی میان نواحی استوایی و نواحی قطبی کسب می کند، در زمستان که این تضاد دمایی قوی تر است، جت استریم نیز قوی تر بوده و به سمت استوا کشیده می شود و بر عکس در تابستان با تضعیف این تضاد دمایی، به عرض های بالا کشیده خواهد شد [۲۴]. جریان های جت ایجاد شده، معمولاً در یک مسیر مستقیم از غرب به شرق جریان ندارند، بلکه در فرورفتگی و برآمدگی های متناوب، شکل پرو پیچ و خم پیدا می کنند [۲۵]. شکل ۸ این جریان پر پیچ و خم را برای جت استریم قطبی نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود در این نوع جریان، بادهای سرد قطبی و بادهای گرم استوایی با یکدیگر مواجه می شوند که منجر به ایجاد جریانی با قله های گرم و دره هایی سرد با گردابه هایی مثبت و یا منفی در دره و یا قله های جریان می گردد. گردابه های انتقالی مثبت و منفی^۷ منجر به ایجاد جریان های چرخشی

نسبت به زمان ثابت می ماند. در سلول هادلی با حرکت کردن جرم هوا به سمت عرض های بالا، شعاع چرخشی کوچک خواهد شد (شکل ۶) بنابراین به دلیل بقای ممتمم زاویه ای با توجه به اینکه جرم ثابت است، سرعت افزایش می یابد. سرعت جریان به قدری افزایش می یابد که دیگر قادر به افزایش سرعت نیست در این زمان حرکت آن به سمت قطب متوقف می شود و فرو می ریزد و با برگشت جریان به سمت استوا حلقه چرخشی کامل می گردد [۲۰].



شکل ۶ ممتمم زاویه ای و قانون بقای ممتمم زاویه ای [۲۰]

سلول فرل در میانه ی عرض جغرافیایی در ۳۰ درجه تا ۶۰ درجه شمالی و جنوبی در جریان بوده و جهت حرکت هوا در آن عکس سلول های هادلی و قطبی است و بیشتر شبیه یک چرخ دنده عمل می کند. در نیمکره شمالی، باد سطحی از جهت جنوبی، جریان می یابد، اما به دلیل وجود اثر کوریولیس به سمت غرب منحرف می شود و با برگشت جریان به سمت عرض ۳۰ درجه حلقه چرخشی بسته می شود [۱۷، ۱۶].

سلول قطبی در میان سه سلول اتمسفر، ضعیف ترین و کوچک ترین سلول است که در عرض های میان ۶۰ تا ۹۰ درجه در دو نیمکره شمالی و جنوبی در جریان است. این سلول به دلیل مراکز پر فشار قطبی و جنب قطبی به وجود آمده است. هوای سرد پرفشار به عرض های پایین تر ریزش می کند. با کاهش عرض، بر اساس بقای ممتمم زاویه ای، با افزایش شعاع چرخشی سرعت به تدریج کاهش می یابد به طوری که هوا نمی تواند پایین تر از عرض ۶۰ درجه گسترش یابد و به سمت قطب باز

^۶ Positive Vorticity Advection

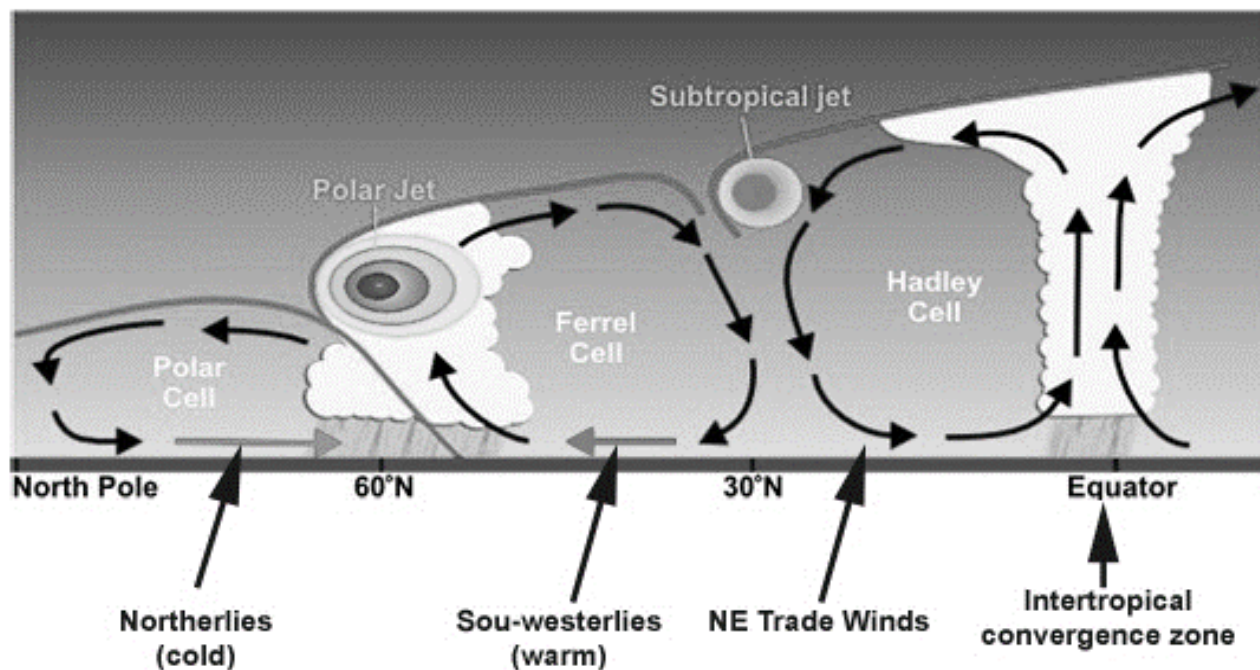
^۷ Negative Vorticity Advection

^۴ Polar Cell

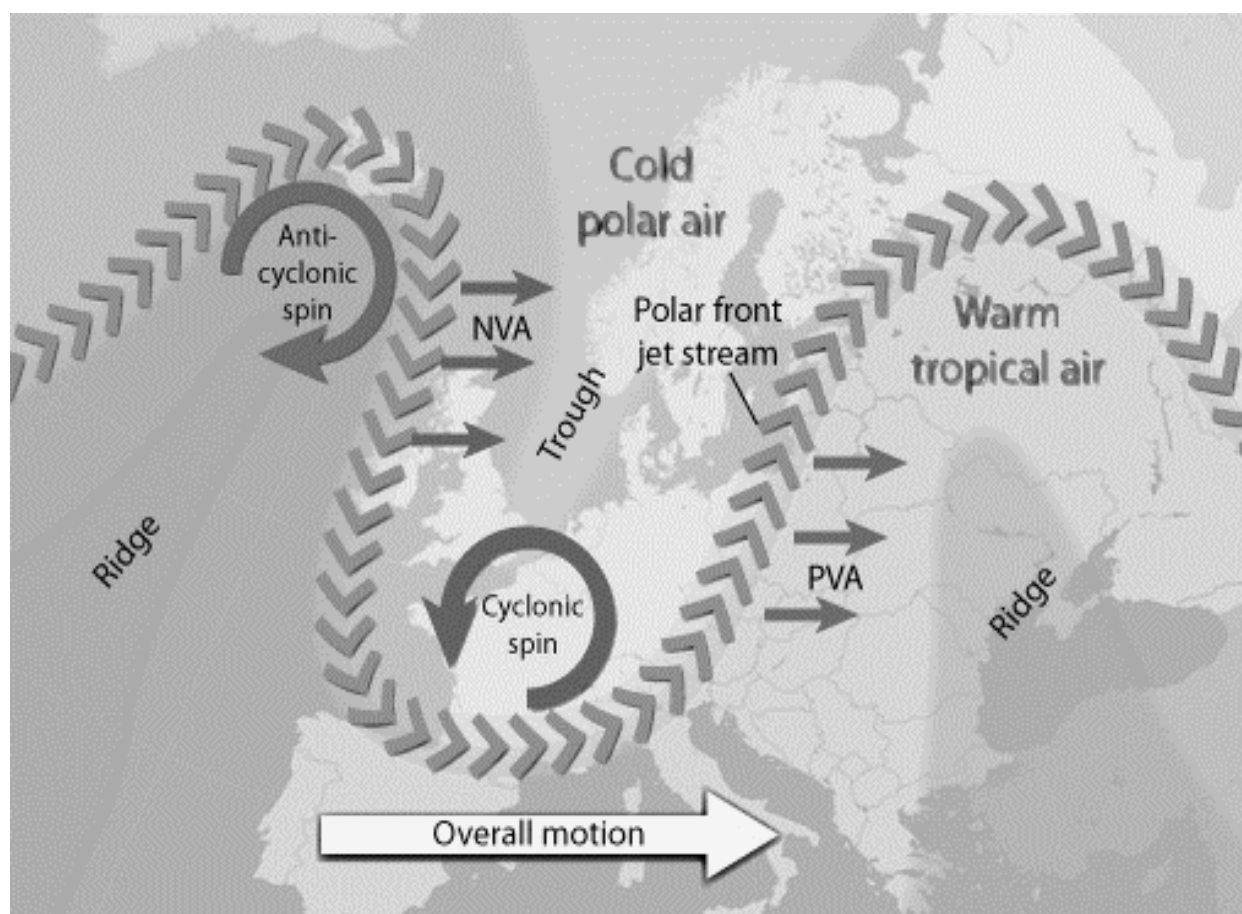
^۵ Subtropical Jet Stream

صعود هوا در لایه های بالایی اتمسفر و قوی تر شدن سیستم های کم فشار می شود.

در جهت و یا خلاف جهت عقربه های ساعت می شوند. یک چرخش و یا سیکلون مثبت (سمت راست شکل ۸) منجر به

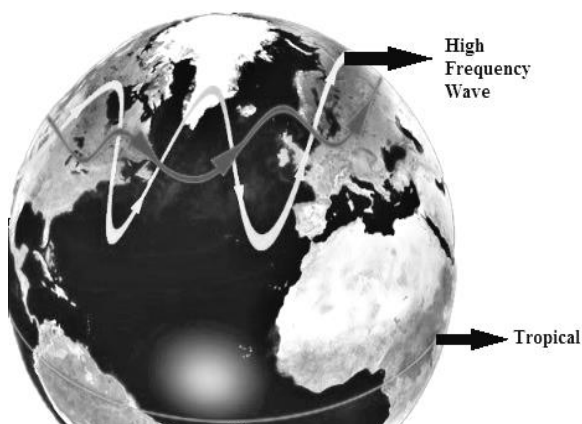


شکل ۷ مکان تشکیل دو جت استریم قطبی و جنب حاره ای [۲۱]



شکل ۸ پیچ و خم ایجاد شده در جت استریم قطبی [۲۶]

این موضوع باعث جذب بیشتر اشعه خورشید شده و میزان یخ بیشتری، آب خواهد شد. علت این موضوع را باید در اثرات بازگشت نور در سطوح روشن و تیره جستجو کرد. هنگامی که نور خورشید به سطوحی سفید مانند برف و یا یخ برخورد می کند، بیشتر آن بدون اینکه محیط اطراف خود را گرم کند به فضا بازتاب می شود. در حالی که اگر این نور به سطوح تاریک تری برخورد کند انعکاس کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر بازتاب نور از سطوح روشن بیش از سطوح تیره است و سطوح تیره تمایل دارند گرمای بیشتری را جذب نمایند. این اثر، یعنی درصد بازتاب نور از سطح یک جسم را، سپیدایی یا آلبیدو^۸ می نامند. میزان انعکاس نور از سطح برف ۷۵ تا ۹۰ درصد بوده در حالی که میزان انعکاس از سطح آب ۵ تا ۱۵ درصد است. بنابراین در صورت ذوب برف و یخ در اثر گرمایش زمین، میزان جذب نور خورشید بیشتر شده و به دنبال آن ذوب برف بیشتری صورت خواهد گرفت که در مقایسه با سایر موارد انعکاس از سطوح، دارای بیشترین مقدار خود است [۲۷، ۲۸]. با کاهش سطح یخ، میزان جذب گرما و اشعه خورشید بیشتر شده و در نتیجه سرعت گرمایش در قطب بیشتر از استوا خواهد شد. افزایش دمای قطب باعث می شود که میزان گرادیان دمایی ایجاد شده میان نواحی جنب قطبی با جنب حاره‌ای کاهش یابد. شکل ۱۰ علت این پدیده را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود با بالا رفتن دما در قطب، دما در آن منطقه افزایش می یابد، به دنبال آن اختلاف دمایی ایجاد شده میان دو ناحیه قطبی و جنب حاره ای نیز کاهش خواهد یافت. به دنبال این پدیده بادهای غربی تضعیف شده و دامنه موج جت استریم افزایش می یابد. این رفتار غیر عادی جت استریم باعث توسعه پیچ و خم‌ها به سمت جنوب و شمال می شود (شکل ۱۱) [۲۶].

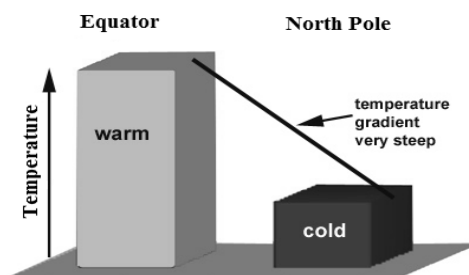


شکل ۱۱ جت استریم (قطبی) موجی شکل ناشی از گرمایش زمین [۲۶]

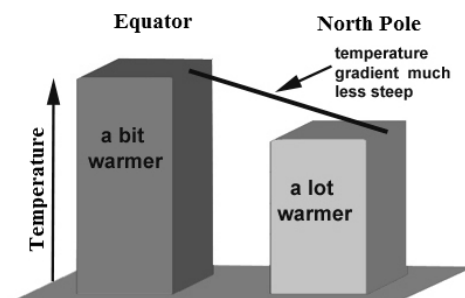
در این مناطق طوفان های همرفتی ایجاد شده و منجر به بارش شدید و سیل می گردد. در مقابل در بخش چرخش و یا سیکلون منفی (بخش چپ شکل ۸) حجم هوا به جای صعود پایین می آید. فرود هوا موجب از بین رفتن همرفت و طوفان های سیکلونی می گردد. بنابراین با عبور این ناحیه از جت، پایداری هوا در آن مناطق به وجود می آید [۲۶].

۵- تاثیر تغییرات آب و هوایی بر جت استریم

منبع انرژی برای جریان جت استریم وجود گرادیان دمایی میان نواحی جنب قطبی^{۱۰} و جنب حاره‌ای است (شکل ۹). در این پدیده، جت تشکیل شده یک جریان پیوسته و یکنواخت از سیستم هوایی است که از یک سوی زمین به سوی دیگر آن حرکت می کند. این موضوع به این معنی است که هر سیستم فشار پایین و یا فشار بالا که باعث پدیده‌های مختلف آب و هوایی می شود تنها برای چند روز دوام دارد و با آمدن سیستم بعدی، مختل می گردد [۲۷]. به دلیل گرمایش جهانی، میزان گرم شدن در مناطق قطبی سریعتر از مناطق با عرض جغرافیایی پایین و نزدیک استواست (شکل ۱۰). یکی از دلایل این موضوع، بازتاب اشعه خورشید توسط یخ است. در حالتی که دمای متوسط جهانی افزایش یابد یخ های قطب به صورت نیمه ذوب تغییر شکل می یابند [۲۶].



شکل ۹ اختلاف میان هوای استوا و قطب در شرایط قبلی (پیش از گرمایش زمین) [۲۶]



شکل ۱۰ اختلاف میان هوای استوا و قطب در شرایط فعلی (پس از گرمایش زمین) [۲۶]

⁸ Albedo

بررسی رفتار ۱۲۵۰ سال گذشته جریان جت اقیانوس اطلس شمالی، با استفاده از حفاری عمیق در ورقه یخی گرینلند، توانسته است راهی جهت پیش بینی موقعیت جت استریم تا سال ۲۰۶۰ میلادی به وجود آورد. لایه های بررسی شده میزان بارندگی در یک سال معین و همچنین دمایی که توده های هوا در معرض آن بوده اند را نشان می دهند. تحقیقات انجام شده نشان می دهند که انتشار گازهای گلخانه ای می تواند پیامد های شدیدی بر رفتار جت استریم در دو سوی اقیانوس اطلس شمالی ایجاد نماید. هر چند تا کنون، تنوع طبیعی، اثر گرمایش ایجاد شده ناشی از انسان را در بازه های زمانی طولانی پنهان کرده است. گرم شدن مداوم می تواند باعث انحراف های قابل توجهی در حالت طبیعی جت گردد و ادامه این روند طی چند دهه مسیر حرکت و رفتار آن را متفاوت خواهد نمود. یافته ها نشان می دهد که در صورت ادامه گرمایش شدید جهانی در دهه های آینده، ممکن است جریان جت اقیانوس شمالی به سمت شمال حرکت کند. در صورت وقوع این وضعیت، عواقب ناشی از آن چشمگیر خواهد بود و می تواند منجر به تغییر در الگو های بارندگی در عرض های میانی و افزایش خشکسالی، امواج گرما، سیل و سایر رویداد های شدید آب و هوایی گردد [۳۲،۳۱].

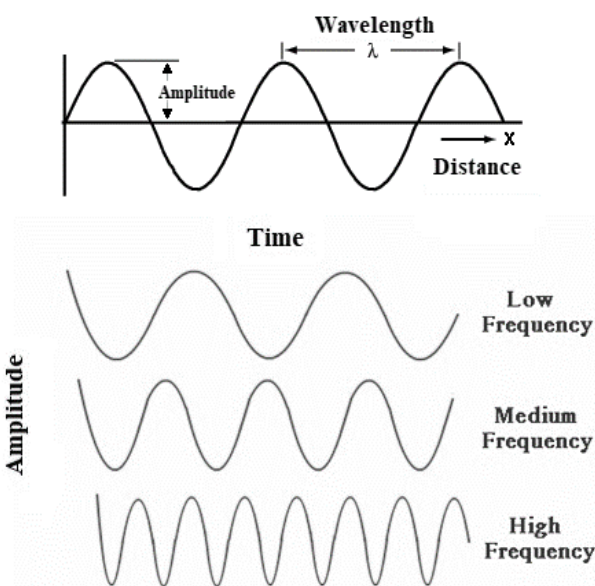
۶- بررسی پتانسیل تولید انرژی از بادهای ارتفاع بلند

میزان انرژی در بادهای ارتفاع بلند و تناوب آن ها، به توزیع چگالی قدرت باد بستگی دارد، زیرا چگالی قدرت باد متناسب با توان سوم سرعت باد است. بنابراین نوسان های سرعت باد به شدت بر قدرت خروجی باد تاثیر گذار است. علاوه بر موارد ذکر شده، به طور معمول، توربین ها نمی توانند انرژی شدید ترین و ضعیف ترین باد ها را در دام بیندازند. شکل ۱۳ میانگین جهانی چگالی انرژی باد در ۵، ۵۰، ۶۸ و ۹۵ درصد دوره زمانی در فاصله سال های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۶ میلادی را نشان می دهد. در این شکل محور افقی میزان چگالی قدرت باد بر حسب کیلو وات بر متر مربع، محور عمودی مقدار ارتفاع از سطح زمین بر حسب کیلومتر، و اعداد مندرج در شکل درصد دوره زمانی را نشان می دهند. بررسی ها نشان می دهند بیشترین چگالی قدرت باد در ارتفاعی میان ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح زمین یافت شده است که این مقدار تقریباً با ارتفاع تروپوسفر مطابقت دارد. همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، ارتفاع ۱۰۰۰ متر، بالاترین ارتفاعی است که ارزش کاوش برای تکنولوژی های ارتفاع بلند را داراست [۳۳].

همان گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می شود موج جدید ایجاد شده دارای طول موجی کمتر در مقایسه با موج جت استریم قبل از گرمایش زمین است. این بدین معنی است که این موج دارای فرکانس و سرعت بالاتری است. علت این موضوع در شکل ۱۲ و معادله (۱) نشان داده شده است [۲۹]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

در معادله فوق c سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه، f فرکانس بر حسب هرتز و λ طول موج بر حسب متر است. همان گونه که از شکل ۱۲ و معادله فوق ملاحظه می شود طول موج و فرکانس نسبت عکس با یکدیگر دارند و فرکانس و سرعت دارای نسبت مستقیم هستند. بنابراین هر چه طول موج کاهش یابد فرکانس نیز افزایش می یابد.



شکل ۱۲ تغییرات فرکانس، دامنه موج و طول موج [۲۹]

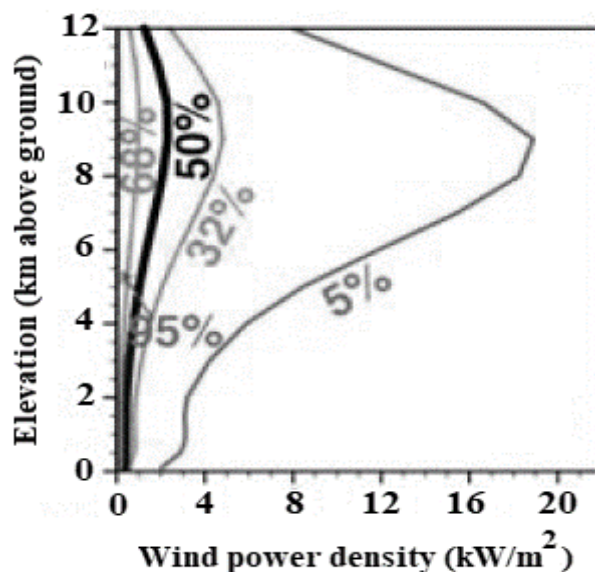
از سوی دیگر تحقیقات اخیر نشان می دهند که میزان پیشروی نقاط اوج منحنی مسیر جت استریم، به سمت شمال بیش از پیشروی نقاط مینیمم منحنی به سمت جنوب است. این موضوع به این معنی است که جت استریم قطبی به سمت شمال حرکت کرده است. تغییر دامنه جت استریم باعث اختلاط بیشتر هوای گرم و سرد با یکدیگر می شود. این اختلاط می تواند باعث ایجاد طوفان های عظیم و مخرب شود. همچنین به علت کاهش سرعت موج ایجاد شده، ماندگاری وضعیت های آب و هوایی از جمله هوای سرد، مرطوب، گرم یا خشک، هفته ها به طول می انجامد. این وضعیت تهدید کننده تنوع زیستی، ایجاد کننده و تداوم آتش سوزی ها و همچنین از بین برنده محصولات کشاورزی خواهد بود [۳۰].

قدرت باد بر حسب کیلو وات بر متر مربع و اعداد مندرج در هر شکل درصد دوره زمانی را نشان می دهد. بررسی نقشه ها در ارتفاع ۱۰۰۰ متری نشان می دهد که بر فراز اقیانوس ها، بهترین مکان برای تولید انرژی دریای آتلانتیک شمالی، اطلس شمالی و کارائیب است. بر فراز خشکی ها نیز، بهترین مکان برای تولید انرژی آمریکای جنوبی با متوسط بیش از یک کیلو وات بر متر مربع و شاخ آفریقا و غرب آمریکای جنوبی با متوسط بیش از ۰/۵ کیلو وات بر متر مربع است. همچنین در دوره زمانی کمتر از ۵ درصد و بر فراز خشکی ها، چگالی قدرت باد صفر است. برای پهنه ایران نیز، نتایج حاصل نشان می دهند که در ارتفاع ۱۰۰۰ متری، در ۵۰ درصد دوره زمانی، غرب ایران و در ۶۸ درصد دوره زمانی، نواحی مرکزی ایران دارای چگالی قدرت باد ۰/۳ کیلو وات بر متر مربع هستند.

چگالی قدرت باد در ارتفاع ۱۰۰۰۰ متری به طور متوسط در حدود پنج برابر بیش از ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح دریا است. در این ارتفاع مکان هایی که بیشترین مواجهه با جت استریم را داشته باشند، دارای بیشترین چگالی قدرت باد هستند مانند، شرق آمریکای شمالی و آسیا، اقیانوس جنوبی میان آفریقا و جنوبگان، آفریقای شمالی و شرق استرالیا. بررسی نقشه ها نشان می دهد فراز ژاپن دارای بهترین وضعیت برای تولید انرژی در این ارتفاع است به گونه ای که در ۵ درصد دوره زمانی به مقدار متوسط بیش از ۱۰ کیلو وات بر متر مربع می رسد. در این ارتفاع برای پهنه ایران نیز، در ۵۰ درصد دوره زمانی، همه نواحی ایران دارای چگالی قدرت باد ۳ کیلو وات بر متر مربع و در ۶۸ درصد دوره زمانی، شمال ایران دارای چگالی قدرت باد، ۳ کیلو وات بر متر مربع و نواحی مرکز، غرب و شرق ایران دارای چگالی قدرت باد ۱ کیلو وات بر متر مربع هستند. در این ارتفاع در ۹۵ درصد دوره زمانی از جانب مرکز به شمال ایران دارای چگالی قدرت باد ۰/۱ کیلو وات بر متر مربع است.

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده در ارتفاع ۱۰۰۰ متری (یک کیلومتری) از سطح زمین که ارتفاعی قابل دسترس تر برای استفاده از توربین های ارتفاع بلند است، در ۵۰ درصد دوره زمانی غرب و مرکز ایران در وضعیت مشابهی قرار دارد و در هر متر مربع می توان ۰/۳ کیلو وات انرژی استحصال نمود.

اهمیت این موضوع برای نواحی کویری ایران قابل توجه تر است. زیرا در ۶۸ درصد دوره زمانی، این انرژی قابل دسترس است. بنابراین گزینه استحصال انرژی از بادهای ارتفاع بلند می تواند همزمان با بررسی استحصال انرژی خورشیدی در نواحی مرکزی ایران قابل بررسی و قابل مطالعه باشد.



شکل ۱۳ میانگین جهانی چگالی قدرت باد در ارتفاعات مختلف جو (اعداد بر روی منحنی ها درصد دوره زمانی هستند) [۳۳]

همچنین شکل ۱۳ نشان می دهد، علی رغم اینکه چگالی قدرت باد در ارتفاع های بالاتر از ۲۰۰۰ متر به طور یکنواخت با ارتفاع افزایش می یابد، در محدوده ارتفاعی میان ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، چگالی قدرت باد ثابت است. در ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری در ۵۰ درصد مواقع، باد های آرام در دسترس بوده و بادهای بالاتر از ۵۰۰ متر نیز دارای ارزش تولید انرژی پایینی هستند مگر اینکه به ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر دست یافت. بیشترین افزایش چگالی قدرت باد در فاصله ارتفاعی ۶۰۰ تا ۷۰۰ متری و به میزان ۰/۳۷ وات بر متر مربع به ازای هر متر افزایش ارتفاع اتفاق می افتد. با این همه در ارتفاع های بین ۸۰ تا ۵۰۰ متری افزایش معنا داری در چگالی قدرت باد به میزان ۰/۲۵ وات بر متر مربع به ازای هر متر ایجاد می شود.

با وجودی که بادهای ارتفاع بلند پایدارتر از بادهای ارتفاع پایین هستند، اما این بادهای در همه زمان ها ثابت و قدرتمند نیستند. به عنوان مثال در ۵ درصد دوره زمانی چگالی قدرت باد در بیشتر مکان ها پایین است (حدود ۰/۱ کیلو وات بر متر مربع). همچنین چگالی باد نیز به ازای ارتفاع های مختلف غیر متقارن است [۳۳].

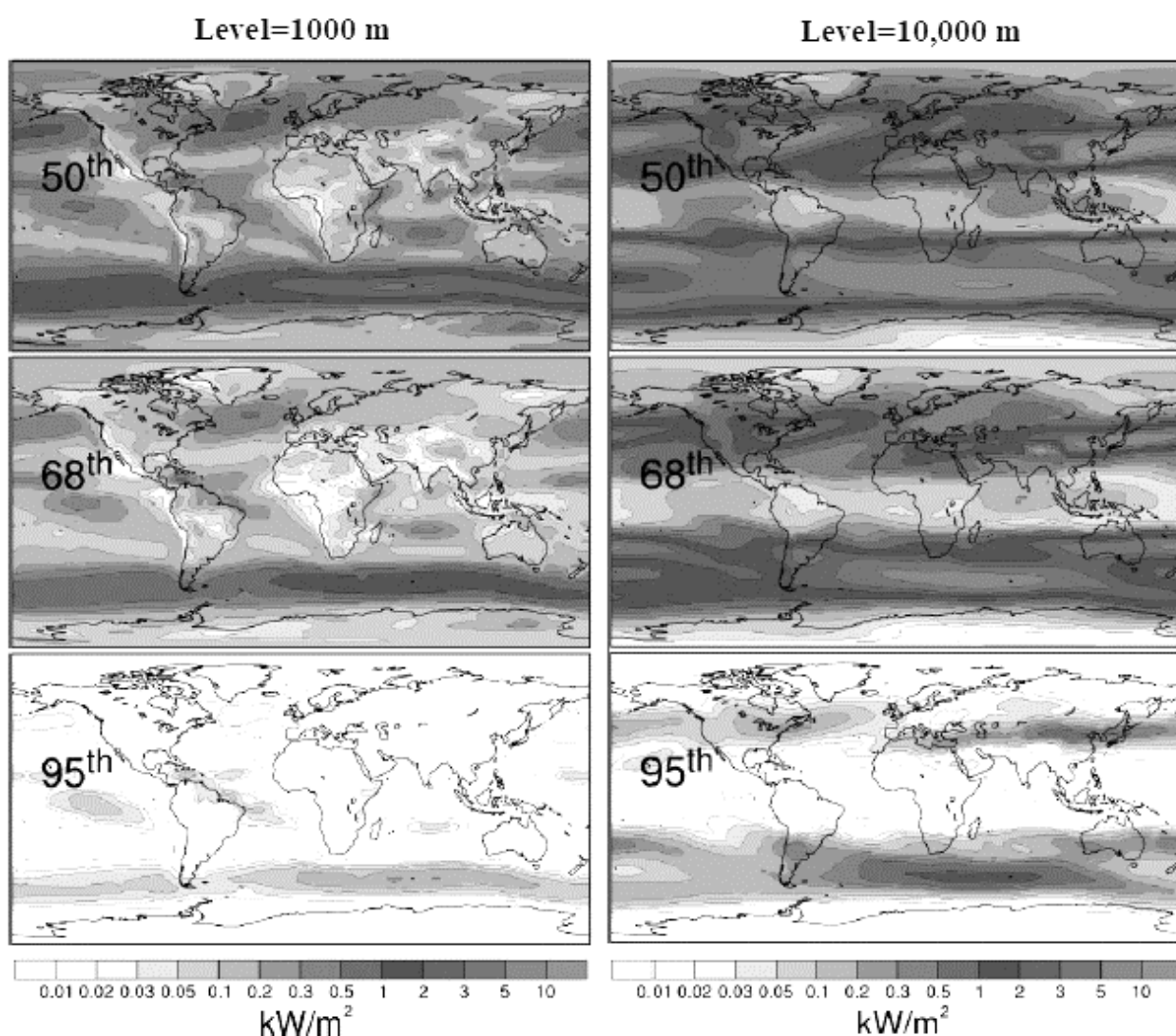
۶-۱- بررسی نقشه بادهای ارتفاع بلند

مطالعات مختلفی در خصوص تهیه نقشه هایی از پتانسیل باد های ارتفاع بلند به منظور تولید انرژی انجام شده است. شکل ۱۴ یکی از این نقشه ها را برای دو ارتفاع ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متری نشان می دهد [۳۳]. در این شکل محور افقی میزان چگالی

می دهند چگالی انرژی تولیدی به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر مربع دارای بیشترین مقدار برای کشورهای عربستان سعودی و مصر با مقدار ۰/۹۶ است و پس از آن عمان در رتبه سوم قرار دارد. ایران با میزان چگالی ۰/۷۸ بعد از کشورهایی چون عراق، سوریه و ترکیه، مقام دهم خاور میانه برای چگالی انرژی تولیدی از بادهای ارتفاع بلند در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع را داراست [۳۴].

همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد به لحاظ ارتفاع بهینه برای تولید انرژی نیز در ۵۰ درصد و ۶۸ درصد دوره زمانی، در تمامی ایران، ارتفاع ۸ تا ۱۰ کیلومتری و در ۹۵ درصد دوره زمانی، شمال ایران در ارتفاع ۴ تا ۶ کیلومتری از سطح زمین دارای چگالی قدرت باد مناسبی برای تولید انرژی می باشد [۳۳].

در سال ۲۰۱۷ مطالعه ای در خصوص باد های ارتفاع بلند در منطقه خاور میانه انجام شده است. نتایج حاصل نشان



شکل ۱۴ چگالی قدرت باد در دو ارتفاع ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ متری از سطح زمین در درصدهای مختلف دوره زمانی [۳۳]

سطح زمین قابل دسترس و وزش هستند. بنابراین شناخت چگونگی تشکیل این پدیده و مکان تشکیل و یافتن توزیع آن در نقاط مختلف جغرافیایی اهمیت بسزایی در افزایش بهره وری در استفاده از این نوع انرژی را دارد. با توجه به هدف مورد نظر، در این مقاله، در ابتدا لایه های مختلف اتمسفر بیان شده و چگونگی تشکیل سلول های هوایی تشریح گردیده و نواحی کم فشار و پر

۷- نتیجه گیری

استفاده از انرژی باد از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. در سال های اخیر استفاده از باد های لایه های بالایی جو که دارای شدت باد و استمرار در وزش هستند مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. این باد ها که به جت استریم شناخته می شوند در تمامی

- [2] Nir Noori, A, Iran's Contribution in World Civilization, *Histrolcal Studies- Special Number*, pp. 235-300, (1972). (in Persian فارسی)
- [3] Redlinger, R.Y., Anderson, P.N., Morthorst, P.E, Wind Energy in the 21st Ecntury: Economics, Policy, Technology and the Changing Electricity Industry, *UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment*, (2002)
- [4] Graham, R., Wind Energy (Alternative Energy), New York: *Gareth Stevens Pub*, (1991).
- [5] Ebrahimzadeh, M., Wind Energy Growth will be Stormy by 2050, Accessed on 16 June (2020); <https://www.tahlilbazaar.com/news/16629/>. (in Persian فارسی)
- [6] Lantz, E., Owen R., Jake N., Edgar D., Katherine D., George S., Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges, *Technical Report, National Renewable Energy Laboratory*, (2019).
- [7] Airborne Wind Energy, Accessed on 14 November (2021); https://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_wind_energy.
- [8] Lyatkher, V., M., Rahman, Z., High Altitude Turbine (HAT): The Future of Wind Energy, New York: *Wiley Online Library*, (2022).
- [9] Qazi Shahzad A., Man-Hoe K., Design and Performance Analysis of an Airborne wind turbine for high altitude energy harvesting, *Energy Journal*, Vol. 230, No. 120829, (2021).
- [10] Mohammadi M. Mohammadi M., Mohammadi A., High Altitude Turbine, *ISME Journal*, No. 89, Vol. 22, (2013).
- [11] NIWA, Education & Training, Accessed on 14 May (2021); <https://niwa.co.nz/education-and-training/schools/students/layers>.
- [12] Danielson E.D., Levin J., Abrams E. Meteorology, New York: *McGraw-Hill Higher Education*, (2002).
- [13] National Weather Service, Global Circulation, Accessed on 22 July (2019); <https://www.weather.gov/jetstream/circ>.
- [14] Barber, D, The Effects of Revolution and Rotation on Climate and Weather, Accessed on 22 November (2019); <https://sciencing.com/about-6737591-effect-revolution-rotation-climate-weather.html>
- [15] What Is Coriolis Force or Coriolis Effect, Accessed on 11 September (2020); <https://maharfanabzar.com>.
- [16] Global Circulation Patterns-Met Office, Met Office College, Accessed on 17 April (2022);

فشار بر پهنه‌ی زمین مشخص شده است. علاوه بر این اثر نیروی کوریولیس بر انحنای جریان باد در عرض‌های مختلف جغرافیایی تشریح شده است. نتایج بررسی دانشمندان نشان می‌دهد که در اثر گردش هوای زمین در دو عرض شمالی و جنوبی، ۳۰ درجه و ۶۰ درجه به ترتیب جت استریم جنب حاره‌ای و قطبی تشکیل می‌شود. همچنین مطالعات اخیر نشان می‌دهد به دلیل تغییرات آب و هوایی ناشی از افزایش دمای زمین، دامنه موج جت استریم افزایش یافته و باعث توسعه آن به شمال و جنوب شده است. تحقیقات دیگری نشان می‌دهند که در نیمکره شمالی، پیشروی نقاط اوج منحنی حرکتی جت استریم به سمت شمال بیش از پیشروی نقاط مینیمم به سمت جنوب است. به عبارت دیگر، جت استریم قطبی به سمت شمال حرکت کرده است و این موضوع میزان بارش در فصل زمستان در نواحی با عرض‌های پایین‌تر، که ناشی از جت استریم است را کاهش خواهد داد. همچنین افزایش دامنه جت استریم در اختلاط هر چه بیشتر هوای گرم و سرد تاثیر گذار بوده و باعث ایجاد باد‌های با سرعت بالا و طوفان می‌گردد. با کاهش سرعت جت استریم ماندگاری شرایط مختلف آب و هوایی نظیر هوای گرم، سرد، مرطوب و یا خشک افزایش یافته می‌یابد.

تحقیقات انجام شده بر روی نقشه‌های باد‌های ارتفاع بلند نشان می‌دهند که ایران دارای مقام دهم در خاور میانه به لحاظ چگالی انرژی باد‌های ارتفاع بلند در ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین است. همچنین در ارتفاع یک کیلومتری از سطح زمین و در پهنه ایران، در ۵۰ درصد دوره زمانی، غرب ایران و در ۶۸ درصد دوره زمانی نواحی مرکزی ایران دارای چگالی قدرت باد ۰/۳ کیلو وات بر متر مربع هستند. در ارتفاع ۱۰۰۰۰ متری نیز، در ۵۰ درصد دوره زمانی، همه نواحی ایران و در ۶۸ درصد زمانی شمال ایران دارای چگالی قدرت باد ۳ کیلو وات بر متر مربع هستند. در این ارتفاع نواحی مرکز، غرب و شرق ایران دارای چگالی قدرت باد ۱ کیلو وات بر متر مربع می‌باشند. به لحاظ ارتفاع بهینه برای تولید انرژی نیز در ۵۰ درصد و ۶۸ درصد دوره زمانی، در تمامی ایران، ارتفاع ۸ تا ۱۰ کیلومتری و در ۹۵ درصد زمانی، شمال ایران ارتفاع ۴ تا ۶ کیلومتری از سطح زمین دارای چگالی قدرت باد مناسبی برای تولید انرژی می‌باشند.

۸- مراجع

- [1] Hasan, A.Y., Hill D.R., Islamic Technology: An Illustrated History, *Cambridge University Press*, (1992).

- [27] The Loss of Ice Reduces the reflection of Heat from the Arctic, Accessed on 21 November (2018); <https://zistonline.com/vdcefv8v.jh8zzi9bbj.html>.
- [28] Ashourzadeh A., What is Albedo or Whiteness?, Accessed on 28 December (2021); <https://weather.mashhad.ir/7192/>.
- [29] Frequency to Wavelength Calculator, , Accessed on 1 April (2020); <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/frequency-to-wavelength>.
- [30] Woolings, T, Jet Stream, *Oxford University Press*, (2019).
- [31] Osman, M., Jet Stream Changes that Could Amplify Extreme Weather Phenomena by 2026, *Postdoctoral Research, University of Arizona Climate System Center*, (2021).
- [32] Shaffie S., Mozaffari G., Khosravi Y., Climatic Analysis of Effective Jet Streams Frequency on Extreme Precipitations in West of Iran, *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 12, No.3, pp. 787-800, (2021).
- [33] Archer C.L., Caldeira K., Global Assessment of High Altitude Wind Power, *Energies*, Vol. 2, pp. 307-319, (2009).
- [34] Yip C.M.A, Gunturu U.B., Stenchikov G.L, High Altitude Wind Resource in the Middle East, *Scientific Reports*, Vol. 7, Article No. 9885, DOI: 10.1038/s41598-017-10130-6, (2017).
- [17] Hung J., Mcelroy M.B., Contributions of the Hadley and Ferrel Circulations to the Energetics of the Atmosphere over the Past 32 Year, *Journal of Climate*, Vol. 27, No.7, pp: 2656-2666, (2014).
- [18] What is Global Atmosphere Circulation, Accessed on 18 January (2022); <https://www.Internetgeography.net/topics/what-is-global-atmospheric-circulation/>.
- [19] The Discovery of Global Warming, Accessed on 1 February (2011); <https://history.aip.org/climate/xGenCirc.htm>.
- [20] Piana M.E., Hadley Cells, Accessed on 7 July (2022); <https://groups.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html>
- [21] Mason J., A Rough Guide to the Jet Stream, Accessed on 22 May (2013); <https://skepticalscience.com/jetstream-guide.html>
- [22] Toole E.O. The Jet Stream and Weather in UK. Accessed on 10 March (2011); <https://www.Netweather.tv/charts-and-data/jetstream/tutorial>.
- [23] National Weather Service, the Jet Stream, Accessed on 22 July (2019); <https://www.weather.gov/jetstream/jet>.
- [24] Habibi, F., Investigation on the Effects of Indian Monsoon on Iran, *Geographical Research*, No. 39, pp. 29-45, (2000). (in Persian فارسی)
- [25] Stendel M., Francis J., White R., Williams P.D., Woollings T., The Jet Stream and Climate Change. Chapter 15, U.K: *Elsevier*, pp. 327:357, (2021).
- [26] Keel T., Examining the Link Between Changes in the Mid-Latitude Jet Stream in the northern Hemisphere and a Recent Amplification of Surface Temperature in the Arctic, *BSc Degree, Kings College London*, 2018.



انسان از نگاه ربات: تشخیص انسان بر پایه اسکن لیزری محیط

بنیامین

جعفری مقدم فرد

کارشناس ارشد، قطب علمی رباتیک، آزمایشگاه تحقیقاتی مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین

فرزاد چراغپور

سموتی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳

چکیده: یکی از چالش‌های کاربرد ربات‌های هوشمند در شرایط واقعی، شناسایی تمایز دادن انسان از اشیاء محیط پیرامون آن است. در این مقاله الگوریتمی جهت تشخیص انسان در محیط با استفاده از دو اسکنر لیزری با سنسورهای ال-آر-اف ارائه و پیاده‌سازی آن بر روی یک ربات سرویس رسان خانگی انجام شده است. در این روش یک حالت انحنادار بر پایه اطلاعات سنسورهای لیزر استخراج و با داده بدست آمده از موقعیت پاها و قفسه سینه ترکیب می‌شود. برای شبیه‌سازی از محیط گرافیکی آر-ویز در میان‌افزار راس استفاده شده است. برای این منظور از محیط آر-ویز برای تشخیص یک انسان با قد نرمال یعنی در بازه ۱۵۰ تا ۱۹۰ سانتی متر اجرا می‌گردد. پس از مدت زمان کمتر از یک ثانیه (برابر ۲۵ میلی ثانیه که زمان یک دور اسکن سنسور لیزر است)، داده‌های لیزر اسکنر تحت پردازش الگوریتم نوشته شده به صورت بلادرنگ قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که سرعت تشخیص این الگوریتم به صورت بلادرنگ می‌باشد. آزمایش برای ۱۶ شخص مختلف و هر یک در ۷ وضعیت متفاوت، جمعاً ۱۱۲ نمونه آزمایشی برای الگوریتم انجام شد، که در بیش از ۹۴٪ از موارد موفق به تشخیص درست گردید که در مقایسه با الگوریتم مشابه، بیش از ۶٪ ارتقاء را نشان می‌دهد.

واژه‌های راهنما: ربات، هوش مصنوعی، سنسور لیزر، بینایی ماشین، تشخیص انسان

**Benyamin Jafari
Moghadam Fard**

MSc., Center of
Robotics, Mechatronics
Research Lab, Qazvin
Branch, Islamic Azad
University, Qazvin

**Farzad
Cheraghpour
Samavati***

Assistant Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Pardis
Branch, Islamic Azad
University, Tehran Iran

Human detection based on laser scanning of environment

Abstract: Today human or person detection in various environments is important for smart robots and autonomous vehicle in Artificial Intelligence and robotics. In this paper a new method for human detection using two Laser Range Finder (LRF Sensor) that implemented on servicing at home robot explained. This proposed approach is extracting a curve state from laser scanner data and fusion of Legs detection and Torso detection. For visualization, used Rviz (ROS Visualizer) in ROS (Robotic Operating System) middleware. The results have been shown accuracy and efficiency of proposed algorithm.

Keywords: Robot, Artificial Intelligence. Laser Scanner, Machine Vision, Human Detection

آن راه حل پیدا کرد. از سوی دیگر، یافتن پاسخ در حداقل زمان ممکن و همچنین توجه به هزینه محاسباتی و کاهش حجم پردازشی در الگوریتم تشخیص، از جمله محدودیت‌هایی است که وقتی کاربرد ربات ایجاب می‌کند که بصورت بلادرنگ کار کند، باید بدان توجه ویژه کرد.

در روش پیشنهادی در این مقاله، به منظور کاهش حجم داده و همچنین کم کردن هزینه محاسباتی و حجم پردازش، از دو سنسور لیزری ال-آر-اف، که بر خلاف دوربین دارای داده‌های سبک‌تری می‌باشد، استفاده می‌شود.

الگوریتم‌های مختلفی برای تشخیص و ردیابی انسان با استفاده از دوربین، [۹-۱۰]، و نیز با استفاده از سنسور لیزر اسکنر، [۱۱-۱۲]، با استفاده از سنسورهای سه‌بعدی، [۱۳-۱۴]، استفاده از سنسورهایی بر اساس آر-جی-بی-دی، [۱۵-۱۶]، و استفاده از ترکیب سنسور لیزر و دوربین، [۱۷-۲۰]، ارائه شده است. در روش‌های اشاره شده، تشخیص انسان با استفاده از دو سنسور لیزر یکی برای تشخیص پاها و دیگری برای تشخیص قفسه سینه انسان انجام شده است که از مشکلات آن می‌توان به بلادرنگ نبودن، تشخیص نادرست پاهای جفت شده و تشخیص نادرست پایه‌های میز به عنوان پا و یا تشخیص بعضی اجسام به اشتباه به عنوان انسان اشاره نمود.

هدف این مقاله تشریح و ترکیب دو الگوریتم برای بدست آوردن الگوی پا و قفسه سینه با فرض انحنای پا و قفسه سینه و روشی برای تشخیص بهتر دو پای جفت شده است.

۳- معرفی الگوریتم ارائه شده

الگوریتم ارائه شده برای پیدا کردن انسان در محیط، به سه مرحله تقسیم می‌شود:

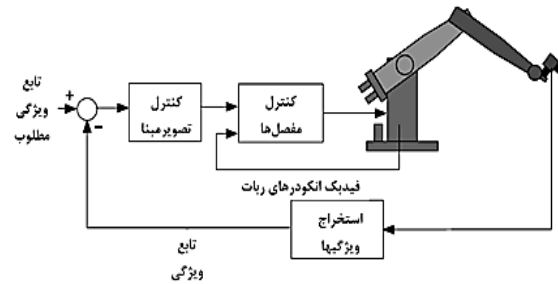
مرحله اول: پیدا کردن پا و یا جفت پاها در محیط و ذخیره کردن موقعیت و تعداد آن‌ها؛

مرحله دوم: پیدا کردن قفسه سینه در محیط؛

مرحله سوم: ترکیب کردن پاها و قفسه سینه متناظر جهت تشخیص و ذخیره موقعیت انسان و احتمال قطعیت آن در محیط؛ در ادامه به ارائه توضیحات فنی و جزئیات هریک از این سه مرحله پرداخته شده است.

۳-۱- الگوریتم تشخیص پا

مراحل اجرای الگوریتم تشخیص پا در روندنمای شکل ۳ نشان داده شده است. پس از آغاز الگوریتم، ابتدا سیستم عامل چک



(ب)

شکل ۲ انواع ساختارهای کنترل تعقیب دید؛ (الف) کنترل تعقیب دید موقعیت مبنا؛ (ب) کنترل تعقیب دید تصویر مبنا

در سیستم دید موقعیت مبنا، که در شکل ۲-الف نشان داده شده است، از ویژگی‌های دیداری مشاهده شده استفاده می‌شود؛ این مهم با یک دوربین کالیبره شده و یک مدل هندسی شناخته شده از جسم هدف، برای تعیین وضعیت آن نسبت به دوربین انجام می‌شود. سپس ربات به سمت آن وضعیت حرکت می‌کند و فرآیند کنترل در فضای کاری ربات اجرا می‌شود که معمولاً فضای با سه بُعد است.

برای تخمین وضعیت الگوریتم‌های خوبی وجود دارد، اما از نظر محاسباتی این الگوریتم‌ها پرهزینه هستند و این هزینه محاسباتی به شدت به دقت کالیبراسیون دوربین و مدل هندسی جسم بستگی دارد.

در سیستم دید تصویر مبنا، که در شکل ۲-ب نشان داده شده است، گام مربوط به تخمین وضعیت حذف می‌شود و مستقیماً از ویژگی‌های تصویر استفاده می‌شود. فرآیند کنترل در مختصات دو بعدی تصویر اجرا می‌شود. وضعیت مطلوب دوربین نسبت به هدف بصورت غیر صریح بوسیله ویژگی‌های تصویر در موقعیت هدف تعریف می‌شود.

در مقایسه، سیستم دید مبنا دارای چالش کنترلی است چراکه ویژگی‌های تصویر تابعی به شدت غیر خطی از وضعیت دوربین است، [۷].

۲- تشخیص انسان توسط ربات در محیط

در استفاده از ربات در محیط‌هایی که انسان به کار مشغول است، نظیر ربات‌های خدمتکار و ربات‌های صنعتی، تشخیص و پیدا کردن موقعیت انسان در محیط یکی از چالش‌های مهم به شمار می‌رود [۸]. در حل این چالش، تشخیص درست اجسامی که به نوعی هندسه‌ای مشابه بدن انسان دارند، مانند پایه میزها یا قفسه‌ها و همچنین تشخیص درست بدن انسان در وضعیت‌های متفاوت، از جمله مسائلی است که می‌بایست برای

خوانش سنسور اسکن لیزری، فاصله یا مترایی است که یک پرتو لیزر ارسالی از سنسور، پس از برخورد با مانع، بازگشته و مجدداً توسط سنسور دریافت می‌شود. این داده‌ها در قالب یک آرایه برای هر دور عملیات اسکن، ذخیره می‌شود.

با داشتن فاصله خوانده‌شده پرتو لیزر و اندیس متناظر آن پرتو از آرایه و همچنین در اختیار داشتن زاویه میان هر دو پرتو لیزر، در نهایت مختصات قطبی آن نقطه اسکن شده از محیط در صفحه افق، بدست خواهد آمد. برای سنسور بکارگرفته شده، زاویه میان هر دو پرتو لیزر، که به توان تفکیک سنسور لیزر شناخته می‌شود، برابر با 0.25° درجه است.



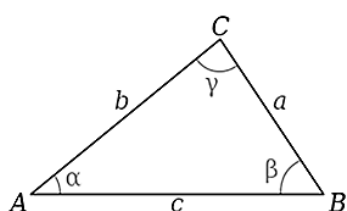
شکل ۴ سنسور اسکن لیزری هوکویو یو-تی-ام [۲۱]

با تبدیل هر یک از عناصر آرایه بدست آمده از سنسور لیزر به مختصات قطبی نقطه اسکن شده، سطری از نقاط روی صفحه افقی تشکیل خواهد شد، که در محیط واقعی نسبت به زمین برابر با ارتفاع نصب سنسور فاصله دارند. روی ربات، سنسور لیزر اسکنر در فاصله ۱۵ سانتی‌متر از سطح زمین نصب شده است؛ حال باید از این داده‌های خام، الگویی خاص جهت تشخیص پا در محیط استخراج شود. برای این کار ابتدا عملیات خوشه‌بندی روی داده‌ها به ترتیب زیر انجام می‌شود.

نخست فاصله میان هر دو نقطه متوالی با رابطه مثلثاتی زیر، با تعاریف پارامترها مطابق شکل ۵، محاسبه می‌شود:

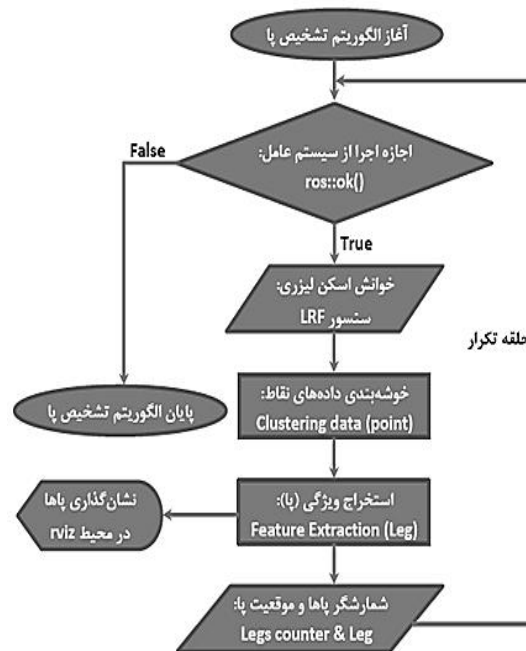
$$c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos \gamma} \quad (1)$$

که در آن a و b دو فاصله متوالی اندازه‌گیری شده از سنسور لیزر، و γ زاویه میان پرتوها است، مطابق شکل ۵.



شکل ۵ هندسه زوایای مورد استفاده در الگوریتم تشخیص پا

می‌کند که آیا الگوریتم با توجه به سایر زیربرنامه‌های اجرایی ربات وارد اجرا بشود یا خیر. این مرحله همچنین تصمیم خواهد گرفت که الگوریتم در چه زمانی متوقف شود. در گام بعد، سنسور ال-آر-اف فعال می‌شود و به اسکن لیزری محیط پیرامونی ربات می‌پردازد؛ داده‌های بدست آمده خوشه‌بندی می‌شوند تا برای استخراج ویژگی‌های مشترکی که به عنوان تشخیص پای انسان در محیط تعریف شده است، مورد استفاده قرار گیرند؛ در صورت تشخیص پا، الگوریتم برای نشان‌گذاری آن روی تصویر در محیط آر-ویز خروجی می‌دهد؛ همچنین پس از تشخیص هر جفت پا، الگوریتم در قالب یک شمارنده به تعداد شمارش شده پاها یک واحد می‌افزاید و مختصات موقعیت آن را نیز ذخیره می‌کند. این روند در یک حلقه تکرار تا زمانی که سیستم عامل فرمان توقف دهد، اجرا می‌شود.



شکل ۳ روندنمای الگوریتم تشخیص پا

سنسور لیزر اسکنر مورد استفاده در این تحقیق، یک سنسور هوکویو یو-تی-ام، مطابق شکل ۴ است، که مطابق مشخصات سازنده دارای ۱۰ متر برد مفید است؛ این سنسور از نقطه‌نظر محدوده دید، افق را 270° درجه پوشش می‌دهد و از نقطه‌نظر سرعت اسکن، در هر ثانیه ۴۰ بار اسکن، معادل ۲۵ میلی‌ثانیه/اسکن، انجام می‌دهد؛ در بهره‌گیری از اطلاعات ارسال شده توسط سنسور لیزر، از ۴۰۰ پرتو سنسور لیزر در محدوده 150° درجه استفاده شده است [۲۱].

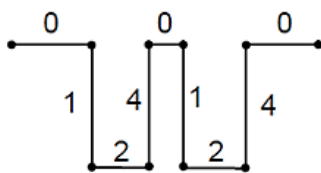
در گام ششم، با استفاده از رابطه (۲)، زاویه γ برای هر یک از خوشه‌ها محاسبه می‌شود:

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (۲)$$

در گام هفتم، الگوریتم می‌بایست از خوشه‌های استخراج شده، پای جفت شده انسان را تشخیص دهد. برای بدست آوردن پاهای جفت شده که در حالت ایده‌آل از دو نیم دایره تشکیل شده، دو روش اعمال می‌شود:

روش اول، خوشه مورد نظر را از وسط به دو خوشه تبدیل کرده و عملیات تشخیص انحنا بر هر دوی آنها انجام می‌شود؛ اگر خروجی هر دو متناسب با شرط‌های مورد نظر بود، آن دو به عنوان یک جفت پا در نظر گرفته می‌شود.

روش دوم، پاهای جفت شده را به رشته‌هایی چون، L (کاهش فواصل) و R (افزایش فواصل) تبدیل می‌کنیم؛ اگر رشته‌ای که از آن خوشه بدست می‌آید، مطابق شکل ۷، برابر با "LRLR" بود، به عنوان یک جفت پا در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷ حالت پاهای جفت شده به صورت "LRLR"

در نهایت خروجی تشخیص پاها و تشخیص جفت پاها با دو روش ذکر شده بعنوان خروجی LegDetector ذخیره می‌شود.

۳-۲- الگوریتم تشخیص قفسه‌سینه

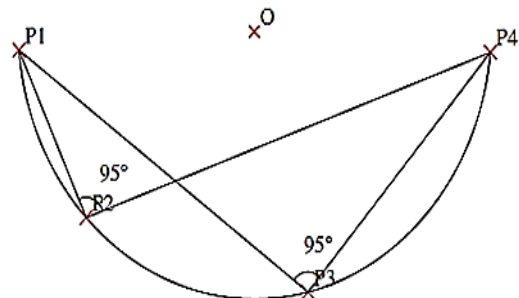
مراحل اجرای الگوریتم تشخیص قفسه‌سینه در روندنمای شکل ۸ نشان داده شده است. مراحل این الگوریتم نیز مشابه مراحل الگوریتم تشخیص پا است، با این تفاوت که در مرحله استخراج ویژگی، از الگوی تعریف شده برای تشخیص قفسه‌سینه انسان استفاده می‌شود. پس از تشخیص هر قفسه‌سینه، الگوریتم در قالب یک شمارنده به تعداد شمارش شده یک واحد می‌افزاید و مختصات موقعیت آن را نیز ذخیره می‌کند. این روند در یک حلقه تکرار تا زمانی که سیستم عامل فرمان توقف دهد، اجرا می‌شود.

شایان ذکر است که در این قسمت الگوی قفسه‌سینه، از روی داده‌های دومین سنسور لیزر، که در فاصله ۱۵۰ سانتیمتری

در گام بعد، زوج فواصل a و b متوالی را، در طول یک بازه کوچک (مثلاً ۲ زوج متوالی) در نظر گرفته و چک می‌شود که آیا می‌توان آنها را بعنوان به یک خوشه به هم پیوسته در نظر گرفت یا خیر. در پایان این گام، از میان داده‌های اندازه‌گیری شده، تعدادی خوشه به هم پیوسته از نقاط در دست خواهد بود.

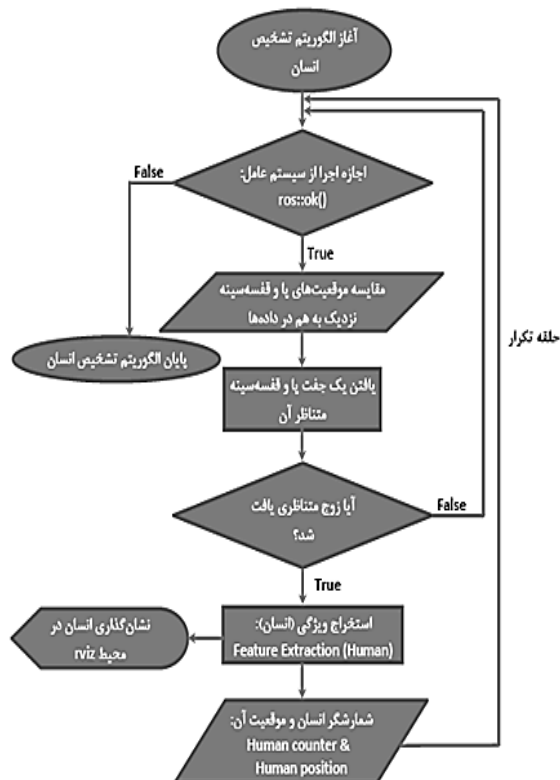
در گام سوم، برای بهبود فرآیند خوشه‌بندی، نقاط اول و آخر هر دو خوشه متوالی در نظر گرفته می‌شود، و فاصله میان آن دو تعیین می‌شود. اگر فاصله در حدفاصل یک آستانه تعیین شده قرار داشت، آن دو خوشه با هم ترکیب شده و تبدیل به یک خوشه واحد می‌شوند. و این روند تا مادامیکه که دیگر تغییری در خوشه‌های بدست‌آمده اعمال نشود، ادامه می‌یابد.

در گام چهارم، و با در دست داشتن خوشه‌ها، اندازه هر خوشه محاسبه می‌شود. در این گام خوشه‌هایی با ابعاد بزرگ و یا کوچک که نمی‌توانند وجود پا را در محیط توصیف کنند، حذف می‌شوند. در گام پنجم، منحنی‌هایی از خوشه‌ها که شبیه به الگوی پا انسان هستند، تشخیص داده می‌شوند. روند کار به این صورت است که نقاط اول و آخر هر خوشه را ثابت در نظر می‌گیریم و با استفاده از دیگر نقاطی که در خوشه وجود دارد و آن دو نقطه‌ای ابتدایی و انتهایی، مثلث‌هایی موسوم به مثلث تشخیص، مطابق شکل ۶، تشکیل داده می‌شوند. هدف بدست آوردن زاویه γ از شکل ۵ در این مثلث‌ها است. مطابق یک فرآیند سعی و خطا در آزمایش‌های تجربی انجام شده در این تحقیق، برای آنکه مثلث‌های تشخیص بتوانند توصیف کننده الگوی پای انسان باشند، می‌بایست نقطه راس آنها روی محیط یک دایره (نیم دایره) قرار گرفته باشد و یا به عبارتی زاویه راس آنها (زاویه γ در شکل ۵) برابر ۹۵ درجه باشد.



شکل ۶ چگونگی تشکیل مثلث تشخیص، با چهار نقطه $P1$ تا $P4$ در الگوریتم تشخیص پا

در پایان گام پنجم، خوشه‌های استخراج شده با الگوی شبیه به پای انسان، ذخیره می‌شوند؛ سپس نقطه میانی هر خوشه، تعیین می‌گردد.



شکل ۹ روندنمای الگوریتم تشخیص انسان

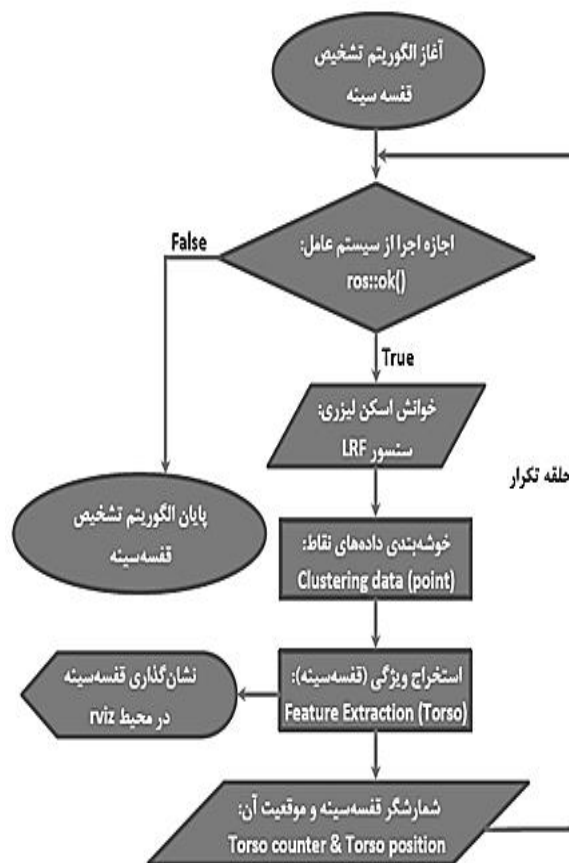
۴- پیاده‌سازی

پیاده‌سازی کار روی ربات خانگی آزمایشگاه ربات‌های سرویس‌رسان مرکز تحقیقات مکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی قزوین انجام شده است. مشخصات کلی ربات در مرجع [۲۱] و [۲۲] آمده است. ربات پایه‌متحرک مورد استفاده، مطابق شکل ۱۰، دارای دو سنسور لیزر با مشخصات عنوان شده مطابق با شکل ۴ است، که سنسور پایه در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از سطح زمین نصب شده است. همچنین حداکثر سرعت پایه حرکتی ربات ۱/۲ متر بر ثانیه است.

بر روی این ربات دو کامپیوتر صنعتی با مشخصات یکسان وجود دارد که هرکدام از یک پردازنده ۴ هسته‌ای اینتل با فرکانس ۳/۱ گیگاهرتز بهره می‌برند؛ اجرای کد پیاده‌سازی شده تشخیص انسان، با زبان پایتون و در بستر میان‌افزار راس در یکی از کامپیوترهای ذکر شده انجام می‌شود.

ابتدا تست در محیط شبیه‌سازی شده مربوط به یکی از سناریوهای لیگ ربات خانگی در مسابقات روبوکاپ انجام می‌شود؛ برای این منظور از محیط آر-ویز برای تشخیص یک انسان با قد نرمال یعنی در بازه ۱۵۰ تا ۱۹۰ سانتی‌متر اجرا می‌گردد. پس از مدت زمان کمتر از یک ثانیه (برابر ۲۵ میلی ثانیه که زمان یک دور اسکن سنسور لیزر است)، داده‌های لیزر

از سطح زمین و بر روی سینه ربات نصب شده است، بدست آورده می‌شود. در الگوریتم استخراج ویژگی سینه، دیگر با چالش‌هایی مانند دو پای جفت شده در محیط مواجه نخواهیم بود. در این قسمت نیز به تشخیص انحنای خوشه‌ها پرداخته شده است؛ تفاوت اصلی تشخیص قفسه سینه آن است که در آزمایش‌های صورت گرفته، زاویه ۷ برای هر مثلث تشکیل شده ۱۲۰ درجه می‌باشد.

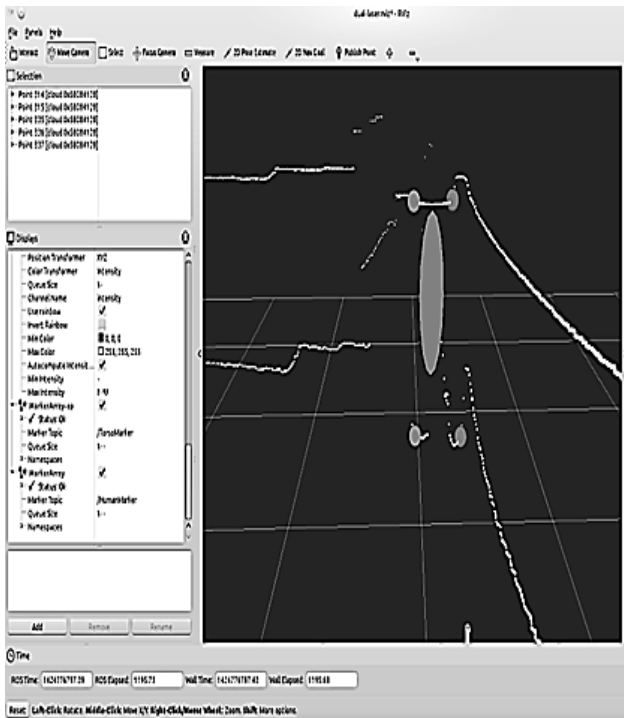


شکل ۸ روندنمای الگوریتم تشخیص قفسه‌سینه

۳-۳- الگوریتم تشخیص انسان

مراحل اجرای الگوریتم تشخیص انسان در روندنمای شکل ۹ نشان داده شده است.

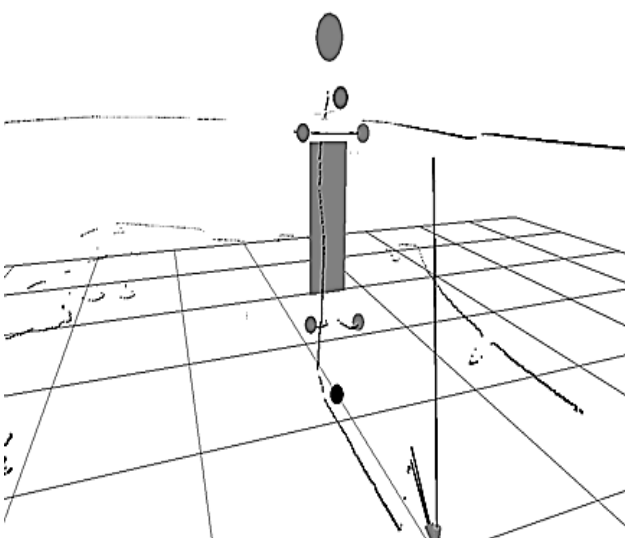
در این بخش با استفاده از خروجی‌های تشخیص پاها و قفسه‌سینه انسان در محیط شناسایی می‌شود؛ روش کار بدین صورت است که نقاطی که به عنوان پا و قفسه سینه بدست آمده‌اند، با هم مقایسه شده و هر دو نقطه‌ای را که نسبت به هم اختلاف مختصات کوچک ΔX , ΔY داشته باشند، بعنوان انسان شمرده می‌شوند. این اختلاف مختصات بعنوان دقت الگوریتم تشخیص در یک فرآیند بهینه‌یابی قابل محاسبه خواهد بود.



شکل ۱۱ محیط گرافیکی نرم افزار استاندارد آر-ویز تحت راس

۵- نتیجه گیری

با تکرار انجام آزمایش برای ۱۶ شخص مختلف و هر یک در ۷ وضعیت متفاوت، جمعاً ۱۱۲ نمونه آزمایشی برای الگوریتم ایجاد شد، که در بیش از ۹۴٪ از موارد موفق به تشخیص درست گردید. این عملکرد در مقایسه با الگوریتم مشابه، مطابق مرجع [۵]، بیش از ۶٪ ارتقا را نشان می دهد.



شکل ۱۲ تشخیص و علامتگذاری انسان در محیط آر-ویز

اسکنر تحت پردازش الگوریتم نوشته شده قرار می گیرد و خروجی آن به صورت شکل ۱۲ و شکل ۱۳ در محیط گرافیکی آر-ویز نشان داده شده اند. در این شکل ها، نقاط ریز معرف داده های بدست آمده از سنسور لیزر هستند و دایره های تو پر معرف نقاط ابتدایی و انتهایی مربوط به پاها و قفسه سینه های تشخیص داده شده در محیط هستند. شایان ذکر است که سرعت تشخیص این الگوریتم به صورت بلادرنگ می باشد.

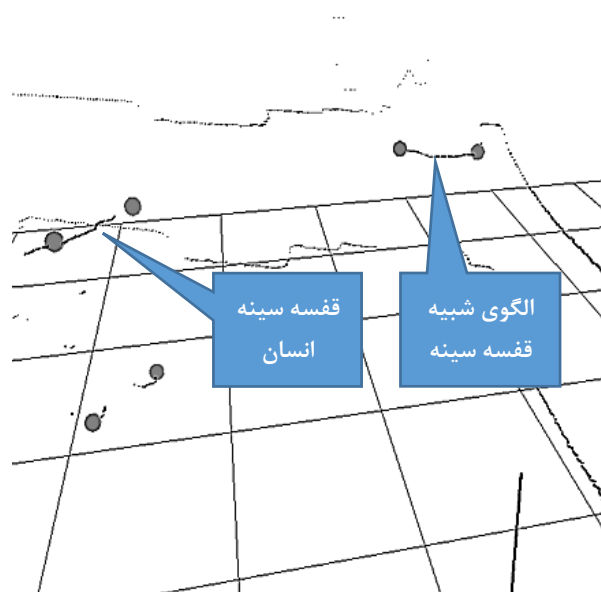


شکل ۱۰ ربات پایه متحرک مورد استفاده در پیاده سازی الگوریتم

همچنین برای بازنمایی خروجی های الگوریتم از ابزار محیط گرافیکی آر-ویز در راس استفاده شده است. مطابق خروجی نشان داده شده در شکل ۱۱ از محیط آر-ویز، نقاط اسکن شده توسط سنسور لیزر و همچنین خروجی الگوریتم تشخیص قفسه سینه و الگوریتم تشخیص پاها، قابل مشاهده اند.

۶- مراجع

- [1] Wang, R., Wu, A., Chen, X., and Wang, J., "A point and distance constraint based 6R robot calibration method through machine vision", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 65, pp. 10195, (2020).
- [2] Cheng, L., Dai, Y., Peng, R., and Nong, X., "Positioning and navigation of mobile robot with asynchronous fusion of binocular vision system and inertial navigation system", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 14, No. 6, 1729881417745607, (2017).
- [3] Jean Paul, S., "Artificial intelligence: scope, players, markets and geography", *Digital Policy, Regulation and Governance*, (2019).
- [4] Alfarraj, O., and Tolba, A., "A two-level computer vision-based information processing method for improving the performance of human-machine interaction-aided applications" *Complex & Intelligent Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 1265-127, (2021).
- [5] Zenggang, X., Zhiwen, T., Xiaowen, C., Xue-min, Z., Zhang, Kaibin, Z., and Conghuan, Y., "Research on image retrieval algorithm based on combination of color and shape features", *Journal of signal processing systems*, Vol. 93, No. 2, pp. 139-146, (2021).
- [6] Tölgyessy, M., Dekan, M., Duchoň, F., Rodina, J., Hubinský, P., and Chovanec, L., "Foundations of visual linear human-robot interaction via pointing gesture navigation", *International Journal of Social Robotics*, Vol. 9, No. 4, pp. 509-52, (2017).
- [7] Corke, P., "Robotics, Vision and Control", Springer Tracts in Advanced Robotics, Springer Berlin, Heidelberg, Vol. 118, (2017).
- [8] Yan, Z., Duckett, T., and Bellotto, N., "Online learning for 3D LiDAR-based human detection: Experimental analysis of point cloud clustering and classification methods", *Autonomous Robots*, Vol. 44, No. 2, pp. 147-164, (2020).
- [9] Jung, B., and Sukhatme, G. S., "Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment", in *Proc. 8th Conf., Intell. Auton. Syst.*, pp. 980-98, (2004).
- [10] Sheng, H., Zhang, Y., Chen, J., Xiong, Z., and Zhang, J., "Heterogeneous association graph fusion for target association in multiple object tracking", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 29, No. 11, pp. 3269-3280, (2018).



شکل ۱۳ تشخیص یک انسان در چپ و یک قفسه سینه منفرد در راست که به عنوان انسان شناخته نشده و یک آویز لباس بوده است



شکل ۱۴ تمایز میان تشخیص انسان و آویز لباس با توجه به ترکیب تشخیص قفسه سینه و تشخیص پا

نکته مهم در قابلیت ویژه الگوریتم ارائه شده نسبت به الگوریتمهای پیشین در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، موردی آورده شده که تشخیص انسان توسط الگوریتم‌های پیشین ناموفق و با الگوریتم ارائه شده موفق انجام می‌گیرد. شکل ۱۳ درحقیقت شمای درک الگوریتم از فضای فیزیکی نشان داده شده در شکل ۱۴ است. در سمت چپ شکل یک جفت پا به همراه یک قفسه سینه بر روی آن تشخیص داده شده است که با ترکیب این دو توسط الگوریتم پیشنهادی، تشخیص انسان به درستی صورت گرفته است. درحالی‌که در سمت راست شکل تنها یک الگو بمانند قفسه سینه تشخیص داده شده، و چون یک جفت پای متناظر برای آن یافت نشده است، الگوریتم آن را به عنوان یک انسان شناسایی نکرده که در واقعیت نیز یک آویز لباس بوده است. این چالش دستاورد ویژه الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

- mobile robot using an omnidirectional camera and a laser", *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006*, IEEE, (2006).
- [18] Kazuhiro, F., Tasaki, R., Sakurai, T., and Terashima, K., "Development and experimental verification of a person tracking system of mobile robots using sensor fusion of inertial measurement unit and laser range finder for occlusion avoidance", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 33, No. 1, pp. 33-4, (2021).
- [19] Bellotto, Nicola, and Huosheng Hu. "Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 39, No. 1, pp. 167-181, (2008).
- [20] Yan, Z., Duckett, T., and Bellotto, N., "Online learning for 3D LiDAR-based human detection: Experimental analysis of point cloud clustering and classification methods", *Autonomous Robots*, Vol. 44, No. 2, pp. 147-164, (2020).
- [21] Fathzadeh, R., Abdollahi, F., Nabavi, N., Abazari, F., Zahedi, J., Shahabian, R., Bagheri, H., Ahmadi, R., and Ghiasvand, B., "MRL@ Home 2014 Team Description Paper", https://fei.edu.br/rcs/2014/TeamDescriptionPapers/RoboCup@Home/MRL_AtHome_TDP_2014.pdf, (2014).
- [22] Yousefi Moghaddam, M., and Cheraghpour Samavati, F., "Experimental object manipulation of assistive robotic arm for pick and place task", *Journal of Computer & Robotics*, Vol. 14, No. 1, pp. 69-84, (2021).
- [11] Jung, E.-J., Lee, J. H., Yi, B.-J., Park, J., Yuta, S., and Noh, S.-T., "Development of a laser-range-finder-based human tracking and control algorithm for a marathoner service robot", *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1963-197, (2013).
- [12] Wu, Chong., Tao, B., Wu, H., Gong, Z., and Yin, Z., "A UHF RFID-based dynamic object following method for a mobile robot using phase difference information", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, pp. 1-1, (2021).
- [13] Urtasun, R., Fleet, D. J., and Fua, P., "3D people tracking with Gaussian process dynamical models", *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, New York, Vol. 1, IEEE, (2006).
- [14] Limoyo, O., Chan, B., Marić, F., Wagstaff, B., Mahmood, R., and Kelly, J., "Heteroscedastic uncertainty for robust generative latent dynamics", *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 4, pp. 6654-6661, (2020).
- [15] Choi, W., Pantofaru, C., and Savarese, S., "Detecting and tracking people using an RGB-D camera via multiple detector fusion", *IEEE international conference on computer vision workshops (ICCV workshops)*, IEEE, (2011).
- [16] Zhao, Y., Zhao, M., Jia, C., and Chen, S., "Light-field imaging for distinguishing fake pedestrians using convolutional neural networks", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 18, No. 1, 172988142098740, (2021).
- [17] Kobilarov, M., Sukhatme, G., Hyams, J., and Batavia, P., "People tracking and following with



کنترل مبتنی بر رواداری خطا برای سیستم فرمان با سیم خودرو

چکیده: سیستم فرمان سیمی شامل واحد کنترل الکترونیکی، موتور کمکی فرمان و سنسورهایی است که می توانند با جایگزینی قطعات مکانیکی، سر و صدا، لرزش و وزن خودرو را کاهش دهند. این نوع فرمان بدلیل دارا بودن قطعات الکترونیکی شرایط حساس تری را نسبت به فرمان مکانیکی دارند و این بدان معناست که باید این سیستم ها تحمل پذیر خطا باشند. از اجزای مهم سیستم های کنترل فرمان سیمی می توان به محرک ها، سنسورها و میکروکنترلرها اشاره کرد. از چالش های این نوع سیستم حساس بودن به عملکرد نادرست اجزای الکترونیکی (سنسورها، سیم کشی، برقراری جریان برق، و میکروکنترلرها) می باشد. هدف این مقاله، معرفی سیستم های کنترل تحمل پذیر خطا برای جبران خطاها در سیستم فرمان سیمی می باشد. از این رو ساختار کنترل تطبیقی، پیش بینی مدل، کنترل دو طرفه، فرمان کمکی دیفرانسیل، تخصیص کنترل مجدد، کنترل مقاوم و ساختار متغیر مورد استفاده قرار می گیرد. کنترل های مذکور می توانند پایداری و مقاوم بودن سیستم را نسبت به عدم قطعیت و آشفتگی ها تضمین کنند.

واژه های راهنما: فرمان با سیم، کنترل رواداری خطا، خطای محرک، خطای میکروکنترلر، خطای سنسور

حسین صیاد کشوری

دانشجوی کارشناسی ارشد

سلمان ابراهیمی نژاد

رفسنجانی*

استادیار

مسعود مسیح طهرانی

استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی

سیستم های دینامیکی خودرو،

دانشکده مهندسی خودرو،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

Hossein Sayad

Keshvari

M.Sc. Student

Salman

Ebrahimi-Nejad

Rafsanjani*

Assistant Professor

Masoud

Masih Tehrani

Assistant Professor,

Vehicle Dynamical

System Research Lab,

Faculty of Automotive

Engineering, Iran

University of Science

and Technology, Tehran

Fault tolerance-based control for vehicle steer by wire system

Abstract: Steer-by-wire system includes an electronic control unit, auxiliary steering motor and sensors that can reduce noise, vibration and vehicle weight by replacing mechanical parts. This type of steering has more sensitive conditions than mechanical steering due to the presence of electronic components, which means that these systems must be fault tolerant. Important components of wired steering control systems include actuators, sensors and microcontrollers. One of the challenges of this type of system is to be sensitive to the malfunction of electronic components (sensors, wiring, power supply, and microcontrollers). The purpose of this paper is to introduce fault tolerant control systems to compensate for errors in the wired steering system. Therefore, adaptive control structure, model prediction, two-way control, auxiliary differential control, re-control assignment, robust control and variable structure are used. These controls can ensure the stability and resilience of the system to uncertainty and turbulence.

Keywords: Steer by wire, Fault tolerance control, Actuator error, Microcontroller error, Sensor error

۱- مقدمه

سیستم فرمان با سیم، که به عنوان نسل بعدی سیستم فرمان شناخته می‌شود، یک سیستم فرمان الکترونیکی کنترل شده است که قطعات مکانیکی یک سیستم فرمان معمولی را با موتورهای الکتریکی و سنسورها جایگزین می‌کند. سیستم فرمان با سیم می‌تواند ایمنی خودرو را بهبود بخشد، قدرت مانور خودرو را افزایش دهد، از رانندگان بالاتری برخوردار باشد و عملکرد سیستم کنترلی راننده و خودرو را بهبود بخشد. [۱]. از جمله معایب سیستم‌های فرمان با سیم این است که دارای ویژگی‌های خرابی غیر قابل پیش‌بینی هستند و ممکن است منجر به نتایج جدی از جمله آسیب به وسیله نقلیه و آسیب دیدگی سرنشین شوند. از این رو نسبت به سیستم‌های فرمان معمولی به سطح بالاتری از رواداری خطا نیاز دارند. کنترل رواداری خطا می‌تواند به طور قابل توجهی ایمنی و راحتی راننده و سرنشینان را افزایش داده و از آسیب دیدگی یا مرگ جلوگیری کند. کمبود بررسی جامع استراتژی کنترل رواداری خطا در سیستم‌های فرمان با سیم از نقطه نظر سیستم کنترل وجود دارد، زیرا عملکرد کنترل ردیابی فرمان ضروری است [۲]. با توجه به محل وقوع در سیستم، خطاها به خطاهای محرک، سنسور، میکروکنترلر و خطا در خطوط ارتباطی طبقه‌بندی می‌شوند [۳].

هدف این مقاله بررسی انواع مختلف سیستم کنترل رواداری خطا^۱ با خرابی محرک، خرابی سنسور، خرابی میکروکنترلر و خرابی در خطوط ارتباطی برای سیستم فرمان با سیم می‌باشد. اطلاعات حاصل از مازول شناسایی و تشخیص خطا برای جبران خسارت باید به کنترل‌کننده خطا منتقل شود. کنترل‌کننده خطا برای دستیابی به عملکرد قابل قبول فرمان، با خطا سازگار می‌شود. روش‌هایی را که برای کنترل رواداری خطا برای سیستم‌های فرمان با سیم در این مقاله استفاده می‌گردد می‌توان به روش تخصیص مجدد کنترل [۴]، روش کنترل پیش‌بینی مدل^۲ [۵]، روش کنترل تطبیقی^۳ [۶] و کنترل اچ‌اینفینیتی^۴ [۷] طبقه‌بندی کرد.

روش کنترل پیش‌بینی مدل یک روش کارآمد برای جبران نقص سیستم و دستیابی به یک عملکرد مطلوب فرمان به طور هم‌زمان است. یک مزیت مهم روش کنترل پیش‌بینی مدل توانایی کنترل محدودیت‌های سخت سیستم است. در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی کنترل در طراحی سیستم رواداری خطا بسیار مهم است. با این حال، روش کنترل پیش‌بینی مدل نسبت

به عدم قطعیت سیستم و خطاهای برآورد حساس است. بزرگترین عیب کنترل پیش‌بینی مدل، اینست که اگر مدل ریاضی سیستم دقیق نباشد، پیش‌بینی‌های خروجی سیستم نیز معتبر نخواهد بود و در نتیجه منجر به خطا خواهد شد. بنابر این در این مقاله ترکیب این کنترلر با کنترلر مد لغزشی [۸] و اپراتورهای دلتا [۹] معرفی می‌شود.

عدم قطعیت پارامتر خودرو می‌تواند هم در مدل و هم در اندازه‌گیری وجود داشته باشد. حضور این موارد در سیستم‌های کنترل باعث می‌شود تا اهداف کنترلی آن چنان‌که باید تحقق پیدا نکند. کنترل مقاوم تلاشی است که برای از پیش‌رو برداشتن این مشکل انجام می‌شود. اما برای کنترل طولی خودرو مناسب نمی‌باشد. هدف استفاده از **کنترل تطبیقی** در سیستم رواداری خطا اینست که کنترلر طراحی شده بدین روش، بتواند در مقابل تغییرات آرام در سیستم فرمان و همچنین خطاهای مدل‌سازی فرمان پاسخ مناسب بدهد. طراحی از دیدگاه کنترل مقاوم به کنترلی می‌انجامد که در بازه مشخصی به پایداری سیستم فرمان می‌انجامد بدون آنکه نیازی به تغییر قوانین کنترلی باشد، ولی با روش کنترل تطبیقی می‌توان قوانین کنترلی را به گونه‌ای با تغییر شرایط تطبیق داد که سیستم پایدار شود [۱۰]. قسمت‌های باقیمانده مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، روش‌های کنترل خطا در سیستم‌های فرمان با سیم شرح داده شده است. در بخش ۳، برخی نتیجه‌گیری‌های انجام شده و شکاف‌های تحقیق برای مطالعه بیشتر مشخص می‌شود.

۲- روش‌های کنترل خطا در فرمان سیمی

پس از شناسایی خطا، کنترل‌کننده قابل تنظیم برای دستیابی به ثبات و عملکرد رضایت بخش با خطا سازگار می‌شود. توانایی مقابله با خطاها به کنترل‌کننده از پیش طراحی شده بستگی دارد. کنترل اولیه رواداری خطا با تغییر دادن کنترل‌کننده، شرایط کار را تغییر می‌دهد. کنترل‌کننده‌های پشتیبان فقط زمانی فعال می‌شوند که خطاها در یک کنترل‌کننده خاص رخ دهد. این روش تا حد زیادی به نوع خطا بستگی دارد که اطلاعات صحیحی راجع به نوع و محل خطاها ارائه می‌دهد تا کنترل‌کننده پشتیبان بتواند روشن شود. روش‌های کنترل خطا در فرمان سیمی در شکل ۱ نشان داده شده است.

³ Adaptive control

⁴ H-infinity (H_∞)

¹ Fault tolerant control system (FTCS)

² Model predictive control (MPC)

```

graph TD
    A[کنترل خطا در فرمان سیمی] --> B[روش ساختار متغیر]
    A --> C[با دو مونوز فرمان]
    B --> D[کنترل مقاوم]
    B --> E[فرمان کمکی دیگرانسیل]
    D --> F[کنترل تطبیقی]
    D --> G[کنترل پیش بینی مدل]
    E --> H[کنترل دو طفه]
    E --> I[تخصیص مجدد کنترل]
    C --> J[کنترل جایگزین]
    C --> K[میکرو کنترلر پشتیبان]
    J --> L[از طریق خطوط ارتباطی]
    J --> F
  
```

هی و همکاران، دو موتور فرمان سیستم‌های فرمان با سیم به مکانیزم رک و پینیون و میله تای راد متصل کرده‌اند[۱۱]. یک موتور توسط زاویه چرخ جلو و کنترل‌کننده موتور زاویه‌ای کنترل می‌شود و موتور دیگر توسط گشتاور فرمان و کنترل‌کننده موتور گشتاور کنترل می‌شود. پس از تشخیص وجود نقص در سیستم کنترل موتور زاویه‌ای، سیستم مذکور متوقف شده و سیستم کنترل موتور گشتاور نقش موتور زاویه‌ای را بازی می‌کند. الگوریتم کنترل، پارامترهای ارسالی را تنظیم می‌کند تا عملکرد اساسی فرمان را تحقق بخشد. شکل ۲ ساختار فرمان سیمی با دو موتور فرمان را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مراجع کنترل خطا در فرمان سیمی

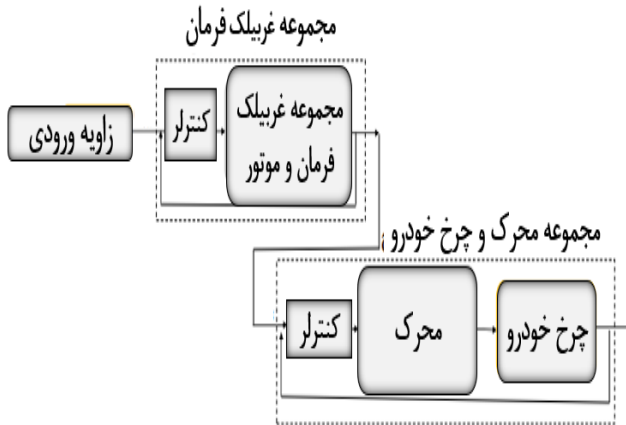
نوع کنترول	مراجع
کنترول با دو موتور فرمان	هانگ(۲۰۱۷)[8]
کنترول با روش جایگزینی	وانگ(۲۰۱۵)[11]
کنترول با میکروکنترولر پشتیبان	یو (۲۰۱۸)[13]
کنترول فرمان با خطوط ارتباطی	هانگ(۲۰۱۷)[8]
	لی(۲۰۱۱)[14]
کنترول پیش بینی مدل	گائو(۲۰۱۷)[5]
	ژانگی(۲۰۱۶)[15]
کنترول تطبیقی	گائو(۲۰۱۷)[5]
تخصیص مجدد کنترول	میهایلی(۲۰۱۵)[22]
	ییم(۲۰۱۴)[24]
کنترول دوطرفه	ژانگ(۲۰۱۸)[25]
فرمان کمکی دیفرانسیل	کرلی(۲۰۱۷)[27]
کنترول مقاوم	وانگ(۲۰۱۵)[29]
روش ساختار متغیر	زو(۲۰۰۹)[31]

اگر یک سنسور خراب شناسایی شود، می‌توان با قطع اطلاعات از سنسور خراب، پیکربندی مجدد خطا را انجام داد و مجموع سیگنال‌ها به میکروکنترلر منتقل می‌شود تا از عملکرد ایمن سیستم اطمینان حاصل شود [۱۲]. استراتژی پیکربندی مجدد خطای مشابه را می‌توان توسط یو و همکاران یافت [۱۳]. هنگامی که خطایی در سنسور گشتاور رخ می‌دهد، مدل کنترلی اصلاح خطا با تنظیم مجدد گشتاور موتور، گشتاور جایگزین سیستم را بازسازی می‌کند.

برای کنترل چرخ‌های جلو دو میکروکنترلر وجود دارد. هردوی آنها فرمان کنترل خود را محاسبه کرده و نتایج محاسبه شده را

وقوع خطاهای محرک و سنسور به دلیل وجود دستگاه‌های الکتریکی که ممکن است تحت چندین شرایط بحرانی احتمالی قرار داشته باشند، بیشتر رخ می‌دهد. سیستم رواداری خطا به این معنی است که هرگونه عملکرد ناقص یک یا چند قطعه سیستم منجر به عملکرد فاجعه‌بار سیستم کلی نمی‌شود و سیستم باید تا رسیدن به حالت ایمن (یعنی متوقف شدن خودرو) به کار خود ادامه دهد.

خطای مهم سیستم فرمان با سیم را در هنگام انحراف فرمان جلوی با زاویه غیر صفر در نظر می‌گیرند [۱۹]. شکل ۳ شماتیک سیمولینک فرمان سیمی را با کنترلر نشان می‌دهد.



شکل ۳ سیمولینک فرمان سیمی با کنترلر

۲-۶- کنترل خطا با روش کنترل تطبیقی

ویژگی اصلی کنترل تطبیقی^۵ تنظیم اتوماتیک پارامترهای کنترلر برای دستیابی به عملکرد مطلوب است. فکیج و همکاران یک کنترلر کننده تطبیقی مبتنی بر مدل مرجع با فناوری نگاه به جلو را برای سیستم‌های فرمان سیمی از وسایل نقلیه خود مختار در حضور خطاهای محرک پیشنهاد می‌کند [۲۰]. کنترلر مذکور سازگار است زیرا سیگنال تخمین خطا و عدم اطمینان به یک مؤلفه در کنترلر بازخورد تخمین حالت تبدیل می‌شود، در نتیجه اثرات عدم اطمینان محدود به دلیل خطا یا سیگنال‌های ورودی ناشناخته را که در خطای تخمین حالت ناظر عمل می‌کنند، لغو می‌کند.

۲-۷- کنترل خطا با روش تخصیص مجدد کنترلر

روش تخصیص مجدد کنترلر^۶ با موفقیت برای یک کنترلر کننده رواداری خطای فعال برای سیستم‌های مجهز به سیم استفاده شده است [۲۱]. اصل روش تخصیص مجدد کنترلر برای سیستم‌های فرمان با سیم ایجاد نیروی چرخ اضافی برای جابجایی اثر زاویه سیستم فرمان به دلیل خرابی سیستم فرمان است. بنابراین، وسیله نقلیه می‌تواند مسیر مورد نظر را دنبال کند و عملکرد ردیابی خوبی داشته باشد. پیکربندی مجدد سیستم معیوب فرمان با سیم بر اساس تکنیک‌های بهینه‌سازی محدود

از طریق شبکه ارتباطی با یکدیگر مقایسه می‌کنند. در میکروکنترلر پشتیبان یا ثانویه وقتی تفاوت در مقایسه دو دستور کنترلر بیش از مقدار ماکزیمم باشد، محاسبه خود را مجدداً انجام می‌دهد. هنگامی که خطایی در میکروکنترلر اولیه رخ دهد، میکروکنترلر ثانویه به فعال می‌گردد. ژائو و همکاران ساختار افزاری سیستم‌های فرمان با سیم را با میکروکنترلرهای سه گانه را طراحی کردند [۱۴]. در حالت عملکرد عادی، فقط یک میکروکنترلر دستورات کنترل را برای کنترلر موتور فرمان و احساس فرمان صادر می‌کند. دو میکروکنترلر دیگر در حالت خواب هستند که در آن فقط می‌توان سیگنال، پردازش سیگنال و الگوریتم فرمان را اجرا کرد.

۲-۴- کنترل خطای فرمان با روش خطوط ارتباطی

ژنگ و همکاران ساختار سیستم‌های فرمان با سیم با خطوط ارتباطی اضافی کن^۱ را پیشنهاد می‌کنند. در این معماری، محرک ها، حسگرها و میکروکنترلرها مستقیماً به سیستم دو گذرگاهی متصل می‌شوند. در طرح ژانگ و همکاران، میکروکنترلر پیام‌های صحیحی را به گذرگاه دو کانال منتقل می‌کند [۱۵] که می‌تواند از ویژگی‌های زمان واقعی وقوع خطا، قابلیت اطمینان و رواداری خطا اطمینان حاصل کند.

۲-۵- کنترل خطا با روش پیش بینی مدل

برای توسعه بیشتر کنترلر پیش‌بینی مدل^۲ یک کنترلر رواداری خطا شامل ترکیب کنترلر مد لغزشی^۳ با کنترلر پیش‌بینی مدل به منظور بهبود مقاومت سیستم در حضور اختلالات و عدم قطعیت‌های مدل سازی توسط هوانگ پیشنهاد شده است [۱۶]. از آنجا که نویز اندازه‌گیری و خطاهای ایجاد شده ممکن است منجر به تخریب عملکرد کنترلر مذکور شود، یک کنترلر پیش‌بینی مدل مبتنی بر اپراتور دلتا با جبران خطا توسط هانگ ساخته شده است [۱۷]. به‌طور مشابه، یک دامنه اپراتور دلتا مبتنی بر مینیماکس کنترلر پیش‌بینی مدل^۴ و عملکرد کنترلر بازخورد برای جبران مؤثر خرابی محرک ارائه شده است [۱۸]. ویژگی این طرح کنترلر این است که انواع مختلف خطاهای محرک، عدم قطعیت سیستم، آشفتگی و گشت‌وگذار در پارامترهای طراحی شده از ناظر خطا در نظر گرفته می‌شود. ژانگ و همکاران با استفاده از کنترلر پیش‌بینی مدل، وضعیت

^۴ minimax MPC

^۵ Adaptive control

^۶ Control reallocation method

^۱ Controller Area Network (CAN)

^۲ Model predictive control (MPC)

^۳ sliding mode control (SMC)

۲-۹- کنترل خطا با روش فرمان کمکی دیفرانسیل

کرلی و یولسوی برای اولین بار پیشنهاد کردند در صورت خرابی فرمان سیمی در ترکیب با کنترل پایداری خودرو از فرمان کمکی دیفرانسیل به عنوان یک استراتژی فرمان پشتیبان استفاده شود [۲۷]. هنگامی که محرک سیستم فرمان با سیم دچار مشکل شود، فرمان کمکی دیفرانسیل از بردار گشتاور برای هدایت وسیله نقلیه برای ایمنی استفاده می‌کند. از آنجا که بردار گشتاور ممکن است منجر به درگیری بین پایداری وسیله نقلیه و عملکرد فرمان شود، یک کنترل کننده سرعت پیشنهاد می‌شود تا درجه دیگری از آزادی را به سیستم کنترل کلی وسیله اضافه کند، بنابراین درگیری بین کنترل پایداری خودرو و فرمان کمکی دیفرانسیل با کاهش سرعت خودرو کاهش می‌یابد و اجازه می‌دهد تا استراتژی فرمان پشتیبان مبتنی بر فرمان کمکی دیفرانسیل با ایمنی خودرو را هدایت کند.

این مقاله ابتدا نیاز به توجه به آن را شناسایی می‌کند و استراتژی‌های تحمل‌پذیری خطا را برای رفع تعارض بین عملکرد فرمان و پایداری خودرو توسعه می‌دهد. شکل ۴ شماتیک فرمان کمکی دیفرانسیل را نشان می‌دهد. مطالعه مشابهی را می‌توان در مقاله تاشیرو یافت [۲۸]، که در آن پایداری حرکت جانبی و عملکرد فرمان‌پذیری قابل قبول، هر دو در طراحی کنترل کننده رواداری خطا برای جبران بروز نقص در سیستم‌های فرمان با سیم در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۱۰- کنترل خطا با روش کنترل مقاوم

وانگ و همکاران [۲۹]، در صورت خرابی کامل فرمان، مسئله کنترل زاویه‌ای بر اساس مکانیزم فرمان دیفرانسیل را بررسی کردند. از کنترل بازخورد خروجی H_∞ برای کنترل زاویه فرمان جلو توسط گشتاور درایو دیفرانسیل موتور استفاده می‌شود. یک کنترل کننده مقاوم در برابر خطا می‌تواند با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتر خودرو و ایجاد اختلالات خارجی، خودرو را در شرایط مختلف رانندگی مقاوم کند، اما برای کنترل طولی قابل استفاده نیست. برای حل این مشکل، وانگ و همکاران، یک قانون کنترل تطبیقی با برآوردگر حداقل مربع بازگشتی برای کنترل سرعت طولی و سرعت زاویه‌ای را پیشنهاد کردند و گشتاور هر موتور چرخ را برای کنترل خطاهای متوسط در موتورهای فرمان و یا سیستم‌های فرمان اختصاص دادند [۳۰].

است. معیار بهینه‌سازی این است که با در نظر گرفتن پویایی واقعی خودرو تفاوت بین حرکت زاویه‌ای اصلی و گشتاور زاویه‌ای اضافی را به حداقل برساند. راه‌حل بهینه‌سازی، نیروهای چرخ اضافی را برای جبران خطاها ایجاد می‌کند [۲۲]. این روش می‌تواند انواع مختلف خرابی محرک را کنترل کند. با این حال، از آنجا که به اطلاعات مربوط به خرابی محرک در طراحی قانون کنترل نیاز ندارد، کنترل کننده نمی‌تواند عملکرد اصلی کنترل را بدست آورد. در نتیجه، در صورت خرابی محرک ممکن است سیستم کنترل ناپایدار شود. وادا و دیگران یک کنترل کننده خطی با جبران ضد باد^۱ و یک تخصیص دهنده کنترل بر اساس بهینه‌سازی آنالین پیشنهاد می‌کنند [۲۳]. کنترل کننده خطی با جبران ضد باد می‌تواند پایداری حلقه بسته سیستم را هنگام خراب شدن محرک فرمان و تخصیص دهنده کنترل سیگنال‌های کنترل را بر اساس اطلاعات معیوب به هر محرک توزیع کند، به طوری که تخریب عملکرد به حداقل برسد. بیم یک روش وزنی تخصیص کنترل را برای مقابله با خرابی محرک سیستم‌های فرمان با سیم در توزیع گشتاور زاویه‌ای پیشنهاد می‌دهد. این روش می‌تواند پایداری چرخش خودرو را تضمین کرده و عملکرد فعال فرمان را در حضور خرابی محرک تحقق بخشد [۲۴].

۲-۸- کنترل خطا با روش کنترل دو طرفه

در یک طرح کنترل دو طرفه^۲، دو کنترل کننده طراحی شده است: یکی برای تثبیت سیستم و تشخیص خطای ردیابی استفاده می‌شود. دیگری برای ایجاد خروجی سیستم که دستورات فرمان راننده را به سرعت و به طور دقیق دنبال می‌کند. ژائو و همکاران یک کنترل کننده بازخورد برای ایجاد زاویه چرخ جلو برای دنبال کردن اهداف راننده و یک کنترل کننده بازخورد برای افزودن سیگنال زاویه چرخ جلو اصلاح شده به سیستم به منظور افزایش قابلیت اطمینان طراحی کردند [۲۵]. ساختارهای کنترلی مشابه با کنترل کننده‌های جداگانه برای سیستم‌های فرمان با سیم توسط ایتو و همکاران ارائه شده است [۲۶]. مطابق با تأثیر خطاهای سنسور و خطاهای محرک اعمال شده بر روی سیستم فرمان با سیم، هر کدام، از کنترل کننده‌های جداگانه استفاده می‌کنند. مزیت اصلی یک طرح کنترل دو طرفه این است که می‌تواند افزونگی اجزای سیستم را کاهش دهد در حالی که هنوز ایمنی را تضمین می‌کند.

^۱ Differential drive assisted steering control (DDAS)

^۵ H-infinity (H_∞)

^۱ anti-windup

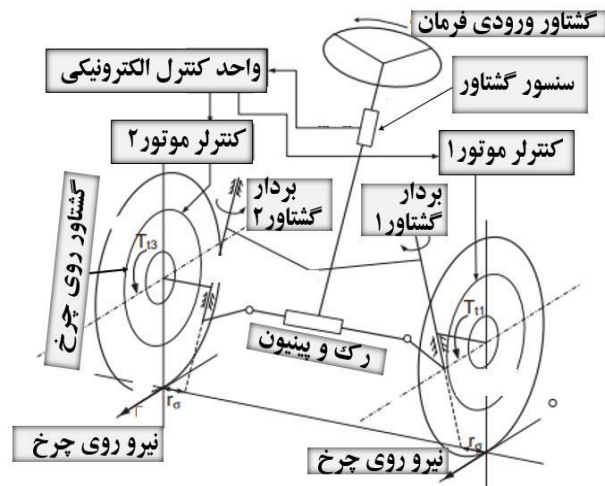
^۲ Two-way control

^۳ vehicle stability control (VSC)

استراتژی کنترل رواداری خطا مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مدل در دامنه دلتا برای دستیابی به عملکرد ردیابی خطای محرک، عدم قطعیت و اختلال سیستم می‌تواند انواع مختلف خطاهای محرک را کنترل کند. استفاده از روش کنترل دو طرفه H_{∞} با یک مازول مقاوم در برابر خطا می‌تواند ثبات سیستم را تضمین کند. کنترل پیش‌بینی حالت کشویی رواداری خطا با هدف تثبیت و دستیابی به عملکرد قابل قبول فرمان و رواداری خطاهای محرک عملکرد خوبی را در حضور عدم قطعیت مدل و اختلال و خطاهای محرک فراهم می‌کند.

تاخیر زمانی که باعث بی‌ثباتی و عملکرد نامناسب سیستم می‌شود اغلب در سیستم‌های فرمان با سیم رخ می‌دهد. پروتکل‌های ارتباطی ممکن است باعث قطع ارتباط و تأخیر زمان ارتباط شوند. افزایش تاخیر در ارتباطات می‌تواند به ناچار قابلیت اطمینان سیستم‌های فرمان با سیم را کاهش دهد. علاوه بر این، اگر تاخیر در کنترل خطا از حداکثر زمان پاسخ قابل قبول سیستم بیشتر باشد، دیگر نمی‌توان امنیت خودرو را تضمین کرد. نتایج بسیار کمی برای بررسی کنترل خطای سیستم‌های فرمان با سیم با مشکلات تاخیر متغیر با زمان انجام شده است. علاوه بر این، فاصله بین وقوع خطا و واکنش سریع کنترل کننده رواداری خطا، در حفظ عملکرد ایمنی نقش دارد. اگر فرآیند کنترل خطا مدت زمان زیادی طول بکشد، یکپارچگی سیستم فرمان با سیم ممکن است در معرض خطر باشد.

خطاهای انسانی بیش از ۹۰ درصد تصادفات را به خود اختصاص می‌دهد. خطاهای راننده عبارتند از: وضعیت ناگهانی رخ داده که در آن راننده نمی‌تواند به سرعت واکنش نشان دهد، خواب‌آلودگی ناشی از مدت طولانی رانندگی، مهارت کم در رانندگی، خواب‌رفتن یا هر اقدام دیگری که ممکن است خودرو را ناپایدار کند و منجر به تصادف شود. اگر عملکرد راننده مانند ترمزگرفتن، افزایش یا کاهش شتاب و مانور فرمان به موقع انجام نشود، کنترل‌های خودرو باید فوراً واکنش نشان دهند تا اقدامات دقیقی انجام گیرد یا توقف اضطراری را انجام دهد. واحد کنترل الکترونیکی باید توانایی شناسایی نوع خطای انسانی را داشته باشد و برای کنترل خطای راننده و دستیابی به عملکرد بهینه رانندگی، باید یک برنامه کنترل رواداری خطا طراحی شود. برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم فرمان با سیم باید تحقیقات بیشتری در مورد خطاهای انسان انجام شود.



شکل ۴ فرمان کمکی دیفرانسیل

۲-۱۱- کنترل خطا با روش ساختار متغیر

کنترل ساختار متغیر^۱ با حالت لغزشی دارای بسیاری از مزایا مانند پاسخ سریع، تحقق آسان و مقاومت در برابر اختلالات خارجی است. لی و همکاران یک کنترل کننده ساختار متغیر برای سیستم‌های فرمان با سیم با مشخصه رد اختلال ناشی از باد جانبی و جبران خطای چندگانه، ناشی از یک مدل بی نظیر از سیستم فرمان با سیم طراحی کردند. این کنترل کننده رواداری خطای غیرفعال می‌تواند با تخریب قابل قبول عملکرد، پایداری سیستم فرمان با سیم را حفظ کند [۳۱].

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، خصوصیات مختلف کنترل رواداری خطا برای سیستم‌های فرمان با سیم بررسی شده است. از آنجا که سیستم فرمان با سیم یک سیستم حیاتی در خودرو است که نیاز زیادی برای اطمینان از عملکرد ایمنی، قابلیت تحمل در برابر خطا و هزینه دارد، بسیاری از روش‌های کنترل رواداری خطا مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از نتایج مثبت از روش‌های فوق به دست آمده است، اگرچه هنوز برای طراحی بیشتر در این زمینه مشکلات طراحی زیادی وجود دارد. دقت مدل‌سازی فرمان سیمی تأثیر زیادی روی کاهش سرعت و زمان کنترل خطا دارد. طراحی سیستم کنترل رواداری خطا برای سیستم‌های فرمان با سیم تا حد زیادی به اطلاعات خطای ارائه شده توسط برنامه کنترلی سیستم شناسایی و جداسازی خطا متکی است. عملکرد سیستم کنترل رواداری خطای فعال بسیار وابسته به دقت سیستم شناسایی و جداسازی خطا است.

۴- مراجع

- [11] He, L., Chen, G. Y., and Zheng, H. Y., "Fault tolerant control method of dual steering actuator motors for steer-by-wire system", *International Journal of Automotive Technology*, Vol.16, No. 6, pp. 977-987, (2015).
- [12] Song, D. Y., Li, Q., Zou, F. L., and Yuan, B., "Fault-tolerant control architecture for steering-by-wire system", *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, Vol. 1, IEEE, (2008).
- [13] Xu, F.-X., Liu, X.-H., Chen, W., Zhou, C., and Cao, B.-W., "The fractional order pid method with a fault tolerant module for road feeling control of steer-by-wire system", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 6386513, (2018).
- [14] He, L., Zong, C., Chen, S., and Wang, C., "The tri-core fault-tolerant control for electronic control unit of steer-by-wire system", No. 2011-01-1006, SAE Technical Paper, (2011).
- [15] Hu, Z., Zhang, F., and Wei, Z., "Research on fault tolerant strategy and reliability of steering-by-wire", *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 6, No.2, pp. 106, (2016).
- [16] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 1810-1817, (2017).
- [17] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Delta operator-based model predictive control with fault compensation for steer-by-wire systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, (2018).
- [18] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Observer-based fault-tolerant controller for uncertain steer-by-wire systems using the delta operator", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 6, pp. 2587-2598, (2018).
- [19] Bian, C. T., Yin, G. D., Zhang, N., and Xu, L. W., "Fault tolerant control for steering by wire electric vehicle on the steering deadlocking condition with nonzero angle", *Dynamics of vehicles on roads and tracks vol 1: Proceedings of the 25th international symposium on dynamics of vehicles on roads and tracks (iavsd 2017), 14-18 august 2017, Rockhampton, Queensland, Australia*. CRC Press, (2017).
- [20] Fekih, A., and Devariste, D., "A fault-tolerant steering control design for automatic path tracking in autonomous vehicles", *2013 American Control Conference*, IEEE, (2013).
- [1] Alexander, A., and Majdanzic, D., "Design and implementation of a fault-tolerant drive-by-wire system", Master of Science Thesis in Embedded Electronics System Design, Department of Computer Science and Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden (2014).
- [2] Hayama, R., Higashi, M., Kawahara, S., Nakano, S., and Kumamoto, H., "Fault-tolerant automobile steering based on diversity of steer-by-wire, braking and acceleration", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95, No. 1, pp. 10-17, (2010).
- [3] Wang, R., and Wang, J., "Passive actuator fault-tolerant control for a class of overactuated nonlinear systems and applications to electric vehicles." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 3, pp. 972-985, (2012).
- [4] Wada, N., Fujii, K., and Saeki, M., "Reconfigurable fault-tolerant control of a vehicle with a steer-by-wire system", *The 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, IEEE, (2012).
- [5] Gao, T., Yin, S., Qiu, J., Gao, H., and Kaynak, O., "A partial least squares aided intelligent model predictive control approach", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 48, No. 11, pp. 2013-2021, (2017).
- [6] Zhang, J., Wang, H., Zheng, J., Cao, Z., Man, Z., Yu, M., and Chen, L., "Adaptive sliding mode-based lateral stability control of steer-by-wire vehicles with experimental validations", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, No. 9, pp. 9589-9600, (2020).
- [7] Wang, R., Jing, H., Hu, C., Chadli, M., and Yan, F., "Robust H_∞ output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering", *Neurocomputing*, Vol. 173, pp. 676-684, (2016).
- [8] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Fault tolerant sliding mode predictive control for uncertain steer-by-wire system", *IEEE transactions on cybernetics*, H., Vol. 49, No. 1, pp. 261-272, (2017).
- [9] Huang, C., Naghdy, F., and Du, H., "Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 1810-1817, (2017).
- [10] Sun, Z., Zheng, J., Man, Z., Fu, M., and Lu, R., "Nested adaptive super-twisting sliding mode control design for a vehicle steer-by-wire system", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 122, pp. 658-672, (2019).

- [27] Kirli, A., Okwudire, C. E., and Ulsoy, A. G., "Limitations of torque vectoring as a backup safety strategy for steer-by-wire vehicles due to vehicle stability control", *Dynamic Systems and Control Conference*, Vol. 58271, American Society of Mechanical Engineers, (2017).
- [28] Tashiro, T., "Fault tolerant control using disturbance observer by mutual compensation of steer-by-wire and in-wheel motors", *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, IEEE, (2018).
- [29] Wang, R., Jing, H., Hu, C., Chadli, M., and Yan, F., "Robust H_∞ output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering", *Neurocomputing*, Vol. 173 pp. 676-684, (2016).
- [30] Wang, R., and Wang, J., "Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 9, pp. 4276-4287, (2011).
- [31] Zou, F., Song, D., Li, Q., and Yuan, B., "A new intelligent technology of steering-by-wire system by variable structure control with sliding mode", *2009 International Joint Conference on Artificial Intelligence*, IEEE, (2009).
- [21] Härkegård, O., "Backstepping and control allocation with applications to flight control", Diss. Linköpings universitet, (2003).
- [22] András, M., and Gáspár, P., "Reconfigurable fault-tolerant control of in-wheel electric vehicles with steering system failure", *IFAC-Papers OnLine*, Vol. 48, No. 26, pp. 49-54, (2015).
- [23] Nobutaka, W., Fujii, K., and Saeki, M., "Reconfigurable fault-tolerant controller synthesis for a steer-by-wire vehicle using independently driven wheels", *Vehicle system dynamics*, Vol. 51, No. 9, pp. 1438-1465, (2013).
- [24] Yim, S., "Fault-tolerant yaw moment control with steer—and brake-by-wire devices", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 15, No. 3 pp. 463-468, (2014).
- [25] Han, Z., and Zhao, W., "Two-way H_∞ control method with a fault-tolerant module for steer-by-wire system", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No. 1, pp. 42-56, (2018).
- [26] Akira, I., and Hayakawa, Y., "Practical fault-tolerant control to protect steer-by-wire systems against sensor faults", *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, IEEE, (2015).