

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی

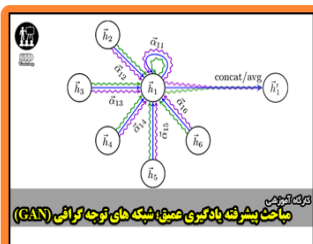


عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛  
شبکه های توجه گرافی  
(Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین آموزش استفاده از  
وب آو ساینس



کارگاه آنلاین مقاله روزمره انگلیسی

## تحلیل تئوریک یک مدل خودروی بادی ایرفویل

### مرتضی خیاط

دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف

### منوچهر راد

استاد دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی شریف - تهران خیابان آزادی - صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۳۶۵

First Author Email : khayyat@mehr.sharif.ir

**چکیده** خودروهای بادی که تاریخچه ای بقدمت قایق های بادبانی دارند، نیروی محرک خود را صرفاً از انرژی باد تامین می کنند. در بعضی از این نوع خودروها بجای بادبان از ایرفویل صلب استفاده می گردد. این ایرفویل بر اثر وزش باد، نیروی جلو برندگی در جهت خاصی ایجاد کرده و در نتیجه خودرو در جهتی متفاوت با جهت وزش باد حرکت می نماید. آزمایشات تجربی گوناگونی در سراسر دنیا روی این مدل خودروها انجام شده است ولیکن هیچگونه محاسبات علمی مدونی برای آنالیز نیروهای وارد بر آنها و تحلیل کامل تئوریک آنها، صورت نگرفته است.

هدف در این مقاله ارائه کد محاسباتی برای تخمین مشخصه های عملکردی این نوع خودروها بر اساس آنالیزهای آیرودینامیکی می باشد. این کد قابلیت محاسبه سرعت خودرو، نیروها و گشتاورهای وارده بر ایرفویل و سازه خودرو، همچنین تعیین زاویه دقیق ایرفویل برای دستیابی به ماکزیمم سرعت خودرو را دارا می باشد. این محاسبات بر اساس مدلسازی آیرودینامیکی ایرفویل و سازه در تمام زوایای باد ظاهری و زوایای حمله مختلف ایرفویل، با در نظر گرفتن پارامترهای حرکتی و پایداری خودرو، انجام می پذیرد. نتایج حاصل از این کد، با ایجاد درک دقیق از چگونگی حرکت جریان اطراف خودروهای بادی، امکان طراحی دقیق این نوع خودروها را با هر ابعاد، بدور از هر گونه سعی و خطایی فراهم آورده، همچنین هزینه آزمایشات تجربی را که به منظور تعیین ابعاد دقیق خودرو و بررسی دینامیک حرکت آنها انجام می پذیرد، کاهش می دهد.

**واژه های کلیدی:** ایرفویل - آیرودینامیک - خودروی بادی

### فهرست علائم

$\phi$	زاویه بین بردار سرعت باد طبیعی و بردار سرعت خودرو	$V_{mg}$	مولفه سرعت خودرو در جهت موازی با بردار سرعت باد طبیعی
$\beta$	زاویه بین بردار سرعت باد ظاهری و بردار سرعت خودرو	$F_A$	نیروی برآیند آیرودینامیکی وارد بر ایرفویل
$\alpha$	زاویه حمله ایرفویل	$F_T$	نیروی محرک خودرو
$\varepsilon$	زاویه کج شدن ایرفویل نسبت به خط قائم	$F_S$	نیروی جانبی وارده بر خودرو از طرف ایرفویل
$\theta$	زاویه بین خط وتر ایرفویل و محور طولی خودرو	$R_D$	نیروی مقاوم کل وارد بر خودرو
$V_T$	سرعت باد طبیعی	$F_{LW}$	نیروی برآی ایرفویل
$V_L$	سرعت خودرو	$F_{DW}$	نیروی پسای ایرفویل
$V_A$	سرعت باد ظاهری	$F_{DB}$	نیروی پسای بدنه

$F_f$	نیروی اصطکاک جانبی چرخها	$F_{LA}$	نیروی برای اکسل عقب خودرو
$\mu$	ضریب اصطکاک دینامیکی چرخها	$F_{DA}$	نیروی پسای اکسل عقب خودرو
$\eta$	زاویه بین چرخ جلو و هرکدام از چرخهای عقب	$F_W$	نیروی پسای چرخها
$W$	وزن کل خودرو		

## مقدمه

در دنیای رقابتی خودروهای بادی، شناخت کامل از مشخصات آیرودینامیکی خودرو لازم می باشد. تغییر در پارامترهای طراحی و تست این تغییرات در تونل باد، مفهوم دقیقی از چگونگی عملکرد خودرو را بیان می دارد. بدلیل هزینه بر بودن ساخت نمونه برای هر تغییر در طراحی و انجام تستهای لازم در تونل باد، تحلیل تئوریک این خودروها، قبل از ساخت نمونه اصلی مورد نیاز می باشد. در این مقاله عملکرد یک مدل خودروی بادی ایرفویلی که نمونه ای از مدل بادبانی آن در داخل کشور ساخته شده (شکل ۱)، مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای لازم برای بهینه سازی و بالا بردن قابلیت‌های خودروهای بادی از طریق این تحلیل بدست می آیند. در مورد خودروی بادی هدف از بالا بردن قابلیت عملکردی، رسیدن به سرعت مطلق بالا، همچنین سرعت‌های بالاتر نسبت به سرعت باد طبیعی در عین حفظ پایداری می باشد.

به منظور این تحلیل که نهایتاً منجر به ارائه یک کد محاسباتی می گردد، اصول علمی اولیه از هندسه اقلیدسی و استاتیک بدست آمده اند. همچنین از تئوری ایرفویل ها به منظور بررسی چگونگی عملکرد ایرفویل این خودرو استفاده گردیده است. سیستم نیروهای اعمال شده به خودرو در حالت تعادل به یک سیستم معادل نیرویی که مشتمل بر دو نیروی برآیند کلی است، کاهش می یابند. نیروهای برآیند کلی نیروی خالص آیرودینامیکی و نیروهای مقاوم می باشند. روابط بین این نیروها و ارتباط آنها با مثلث سرعت خودرو، معادلات اساسی حاکم بر این خودرو را تشکیل می دهند. این تئوری ها با اعمال شرایط خاص هر مساله، در مورد قایق ها، کایت ها، اسکیت بادی و خودروهای بادی حرکت کننده روی یخ، صادق می باشند [۱]. برای درک چگونگی حرکت خودروهای بادی، ابتدا لازم است مثلث نیروها و سرعت خودرو مورد بررسی قرار گیرند.

## مثلث سرعت خودروی بادی

مثلث سرعت نشان داده شده در شکل (۲)، ارتباط بین سرعت باد طبیعی  $V_T$ ، سرعت خودرو  $V_L$  و سرعت باد ظاهری  $V_A$  را در یک خودروی بادی نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است، زوایای  $\phi$  و  $\beta$  به ترتیب زاویه بین بردار سرعت خودرو با بردارهای سرعت باد طبیعی و باد ظاهری می باشند. مولفه سرعت خودرو در جهت موازی با بردار سرعت باد طبیعی، با نماد  $V_{mg}$  مشخص می گردد. برای  $\beta$  و  $V_T$  ثابت مکان هندسی راس  $P$  که یکی از رئوس مثلث سرعت می باشد، یک دایره خواهد بود. با استفاده از خواص هندسی دایره، می توان به نکات مهمی در مورد بردارهای سرعت دست یافت.

بر اساس بررسیهای بعمل آمده مشخص می گردد خودروی بادی می تواند در سرعت‌هایی بمراتب بالاتر از سرعت باد طبیعی و حتی سرعت باد ظاهری حرکت نماید. در شکل (۲) پنج نقطه  $P_1$  تا  $P_5$  مشخص شده اند که هر کدام از این نقاط نشان دهنده کمیت خاصی می باشند. این کمیات در جدول (۱) بطور دقیق ارائه گردیده اند. نقاط  $P_1$  تا  $P_5$ ، شرایطی را نشان می دهند که در آنها سرعت خودرو از سرعت باد طبیعی بیشتر می باشد. همچنین نقطه  $P_5$  نشان دهنده حالتی است که در آن

سرعت خودرو از سرعت باد ظاهری نیز بیشتر شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل مثلث سرعت خودروی بادی، اساس محاسبه نیروهای اعمالی وارد بر خودرو اعم از نیروهای آیرودینامیکی و مقاوم، می باشد [۵].

### مثلث نیروهای اعمالی وارد بر خودروی بادی

ایرفویل خودروی بادی بر اثر باد ظاهری همانند بال یک هواپیما نیروی برآ و پسا ایجاد می کند. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، برآیند نیروهای برآ و پسا، نیروی آیرودینامیکی کل وارد بر خودرو را تشکیل می دهد. این نیرو که با نماد  $F_A$  مشخص می گردد، در مرکز فشار ایرفویل وارد می شود. مولفه نیروی  $F_A$  در جهت حرکت خودرو، نیروی جلوبرنده خودرو می باشد که با  $F_T$  نمایش داده می شود. نیروی  $F_T$  را می توان در تونل باد تحت سرعتهای مختلف باد و زوایای حمله مختلف، و یا بصورت تئوریک محاسبه نمود.

این نیرو به منظور تعیین مشخصه های عملکردی در هر زاویه باد ظاهری و زاویه حمله ایرفویل، طبق معادله (۱) بدست می آید:

$$F_T = F_{LW} \sin(\beta) \cos(\epsilon) - F_{DW} \cos(\beta) - F_{DB} - F_{DA} - F_W \quad (1)$$

نیروی آیرودینامیکی کل مولفه نسبتاً بزرگی نیز در جهت جانبی خودرو بصورت عمود بر حرکت ایجاد می نماید. این نیرو که با  $F_S$  مشخص می شود، می بایستی توسط نیروی اعمالی از طرف چرخها خنثی گردد. وقتی که چرخها نیروی جانبی مساوی و خلاف جهت نیروی  $F_S$  ایجاد می نمایند، نیروی مقاوم  $R_D$  ایجاد می گردد که این نیروی پسا می بایستی به منظور تخمین سرعت خودرو محاسبه گردد.

نیروی جانبی خودرو که توسط ایرفویل ایجاد گردیده و باعث ناپایداری کناری (لغزش) می شود، طبق معادله (۲) بدست می آید:

$$F_S = F_{LW} \cos(\beta) \cos(\epsilon) + F_{DW} \sin(\beta) \quad (2)$$

هنگامیکه این نیروی جانبی با نیروی جانبی ایجاد شده توسط چرخها خنثی گردد و نیروی محرک با نیروی پسای کل برابر شود، خودرو در حالت تعادل خواهد بود و ماکزیمم سرعت حالت پایدار خودرو بدست می آید که این مقدار به اندازه نیروی آیرودینامیکی کل بستگی دارد.

استفاده از اکسل های به شکل ایرفویل در قسمت عقب خودروهای بادی به منظور ایجاد نیروی پایدار کننده در حین حرکت خودرو در سرعتهای بالا می باشد. این اکسلها نیروی برآی منفی ایجاد می نمایند که این نیرو علاوه بر تامین پایداری خودرو، به همراه نیروی وزن، ممان راست گرداننده در حین واژگونی خودرو ایجاد می نماید [۸].

کل نیروی عمودی وارد بر خودرو و نیروی اصطکاک جانبی چرخها به ترتیب، طبق معادلات (۳) و (۴) بدست می آید:

$$F_{down} = W + F_{LA} + F_{LW} \sin(\epsilon) \quad (3)$$

$$F_f = \mu \times F_{down} \quad (4)$$

هنگامیکه  $F_S > F_T$  گردد، ناپایداری کناری اتفاق می افتد، که این شرط ناپایداری در کد محاسباتی لحاظ گردیده است.

### ممانهای اعمال شده بر خودروی بادی

از آنجا که دیدگاه عمده در دینامیک خودرو نگرش اجسام صلب می باشد، بنابر این خودرو یک جسم صلب با گستره حرکت فضایی در نظر گرفته می شود. در مبحث گشتاورهای وارد بر خودرو، ممان های غلت زنی (Roll)، کله زنی (Pitch)، و چرخ زنی (Yaw) در نظر گرفته می شوند. در خودروی بادی تنها ممان محسوس ممان غلت زنی بوده که منجر به واژگونی این خودرو می گردد [۲]. همانطور که در شکل (۴) مشخص است محور واژگونی خودرو محور AB می باشد. زاویه  $\eta$  طبق رابطه (۵) محاسبه می گردد:

$$\eta = \arctan \frac{LM}{KL} \quad (5)$$

که LM نصف طول اکسل عقب و KL فاصله عمودی بین چرخ جلو و محور چرخهای عقب می باشد. نیروی وزن خودرو در مرکز ثقل خودرو و نیروی برای منفی ایجاد شده در اکسل عقب در مرکز اثر اکسل عقب وارد می گردد. این دو نیرو هنگام واژگونی خودرو ممان راست گرداننده به منظور حفظ پایداری خودرو ایجاد می نمایند. روابط (۶) و (۷) به ترتیب نشان دهنده بازوی ممتن نیروی وزن و بازوی ممتن نیروی برای منفی اکسل عقب می باشند:

$$ARM_w = (KL - OL) \times \sin(\eta) \quad (6)$$

$$ARM_{beam} = ML \times \cos(\eta) \quad (7)$$

بازوی ممتن برای محاسبه ممان واژگونی در شکل (۵) نشان داده شده است. این مقدار طبق رابطه (۸) محاسبه می گردد:

$$ARM_{Roll} = AC \times \cos(\epsilon) \quad (8)$$

از طرفی ممان راست گرداننده خودرو طبق رابطه (۹) محاسبه می گردد:

$$M_R = (W \times ARM_w) + (F_{LB} \times ARM_{beam}) \quad (9)$$

مولفه نیرویی که باعث ایجاد ممان واژگونی می گردد همچنین ممان واژگونی به ترتیب طبق روابط (۱۰) و (۱۱) بدست می آیند:

$$F_{Roll} = F_T \sin(\eta) + F_S \cos(\eta) \quad (10)$$

$$M_{Roll} = F_{Roll} \times ARM_{Roll} \quad (11)$$

هنگامیکه  $M_{Roll} > M_R$  باشد، خودرو واژگون می گردد که این حالت نیز همچون حالت ناپایداری کناری در کد محاسباتی حاضر، لحاظ گردیده است.

## کد محاسباتی تخمین عملکرد آیرودینامیکی

کد محاسبه و تخمین سرعت بعنوان یک ابزار نرم افزاری برای تخمین مشخصه های عملکردی یک خودروی بادی، مورد استفاده قرار می گیرد. با استفاده از مشخصه های استاتیکی و دینامیکی یک خودروی بادی که بوسیله تئوری و تستهای تونل باد بدست می آیند، امکان تخمین سرعت خودرو برای هر زاویه باد ظاهری و هر سرعت باد طبیعی فراهم می گردد [۳]. کد تخمین سرعت و عملکرد آیرودینامیکی خودرو اهداف مختلفی را دنبال می نماید. از جمله این اهداف می توان به تخمین مقاومت برای حرکت، بدست آوردن کل نیروها و گشتاورهای وارد بر خودرو، محاسبات اولیه متغیرهایی مثل مساحت ایرفویل، ابعاد اولیه طرح و مساله پایداری خودرو، انتخاب سائیزها و اصول طراحی، ارزیابی تغییر در سازه، بدست آوردن اطلاعات پایه برای ارائه به حمایت کنندگان طرح، آماده سازی پروپوزال طرح و ارزیابی نتایج بدست آمده از تحلیل CFD اشاره نمود [۴]. این برنامه قابلیت کالیبره شدن با مدل های کامل به منظور تخمین دقیقتر اثر تغییر در طراحی را دارا می باشد، بدین منظور که با سریعتر و کارا تر ساختن روند طراحی باعث کاهش زمان و هزینه می گردد. با دانستن کل بازه عملکردی خودرو، مهندسان تخمین دقیقی در زمینه طراحی سازه این خودرو به منظور مقاومت در برابر نیروها و گشتاورهای وارده بدست می آورند.

## روش حل

کد حاضر بر اساس الگوریتم تخمین سرعت قایق های بادی محاسبات خود را انجام می دهد [۹ و ۳]. اگرچه این کد برای خودروهای بادی با بادبان صلب (ایرفویل) نوشته شده است، ولیکن با جایگزینی معادلات مقاومت غلتشی برای هر مدل خودروی بادی خاص، قابل اجرا خواهد بود. با جایگزین ساختن مشخصات هندسی و پارامترهای آیرودینامیکی کلیدی، امکان مشاهده تغییرات طراحی بر عملکرد خودرو بوجود می آید. در این کد برای محاسبه مشخصه های آیرودینامیکی و سرعت خودرو، پارامترهای زیر به عنوان ورودی در نظر گرفته می شوند.

- سرعت باد طبیعی
- نسبت ضریب برآ به پسا برای ایرفویلی که ضریب پسای آن در زاویه حمله صفر، نسبت منظر آن، مساحت آن و افت نیروی برآ پس از عبور از نقطه واماندگی آن، مشخص می باشد.
- مشخصات جانبی مثل نیروی وزن و ابعاد هندسی خودرو
- تعداد چرخها

الگوریتم حل به این صورت است که ابتدا مقدار ثابتی برای سرعت جریان باد طبیعی در نظر گرفته می شود و فرض می گردد زاویه حمله ایرفویل در ابتدا صفر است. پس از انتخاب مقدار اولیه ای برای سرعت خودرو، نیروهای محرک و مقاوم بطور دقیق محاسبه می گردند. به منظور بدست آوردن این نیروها ابتدا نیروی برآیند آیرودینامیکی محاسبه شده و متعاقباً نیروهای جلو برنده (محرک) و جانبی وارد بر خودرو بواسطه وجود ایرفویل بدست می آیند. سپس کل نیروهای مقاوم وارد بر خودرو که شامل پسای بدنه، پسای دکل و پسای چرخها می باشد محاسبه می گردند.

در گام بعدی به منظور محاسبه سرعت حالت پایدار شرط نیروی محرک مساوی نیروی مقاوم برای تمام زوایای باد طبیعی (۰ - ۱۸۰) درجه و تمام زوایای ایرفویل نسبت به محور طولی (۰ - ۶۰) درجه، اجرا می گردد. در هر زاویه خاص،

سرعت و سایر مشخصه های آیرودینامیکی خودرو با شرط عدم لغزش و عدم واژگونی ثبت می شود. این پارامترها با در نظر گرفتن حالت لغزش و واژگونی، نیز محاسبه می گردند. این نتیجه در بهینه سازی طراحی خودرو برای رسیدن به سرعت واقعی کمک می نماید [۱۴].

یکی از مزایای این برنامه تخمین مقدار وزن مورد نیاز برای جلوگیری از واژگونی و لغزش می باشد. بر همین اساس این کد می تواند نیروی وارده بر خودرو را در هر سرعت باد و مسیر حرکت خودرو همچنین در هر سرعتی از خودرو محاسبه نماید. ذکر این نکته ضروری است که در محاسبات آیرودینامیکی ایرفویل خودرو در این کد، اثرات جریان پایین شو در نظر گرفته شده است.

## نتایج و بحث

کد تخمین سرعت و عملکرد آیرودینامیکی خودروی بادی ایرفویلی برای یک خودروی مدل با مشخصات ذکر شده در جدول (۲) اجرا گردیده است.

بر اساس نتایج بدست آمده ماکزیمم سرعت خودرو با افزایش سطح ایرفویل، افزایش نسبت ضریب برآ به پسای ایرفویل خودرو و همچنین کاهش نیروی مقاوم کل، افزایش نشان می دهد. از آنجایی که افزایش سطح ایرفویل می بایستی با وزن خودرو در حالت بالانس باشد، بدین معنی که استفاده از ایرفویل با مساحت بیشتر باعث افزایش وزن و کاهش شتاب خودرو می گردد، لذا بهترین راه برای افزایش سرعت، کاهش نیروی پسا با استفاده از بلبرینگ چرخهای کم اصطکاک تر و بدنه آیرودینامیک تر می باشد این نتیجه در شکل (۶) کاملاً مشخص است. بر اساس این شکل با افزایش ضریب مقاومت غلتشی چرخها در سرعت باد طبیعی ثابت، ماکزیمم سرعت خودرو همچنین زاویه باد طبیعی که در آن سرعت ماکزیمم می شود، کاهش می یابد. ولیکن زاویه ایرفویل نسبت به محور طولی خودرو که در آن سرعت ماکزیمم می گردد، افزایش نشان می دهد.

در کد محاسباتی حاضر در هر سرعت ثابتی از باد طبیعی، زاویه بردار سرعت باد طبیعی با محور طولی خودرو از درجه تغییر می نماید. همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می گردد، با افزایش سرعت باد طبیعی، ماکزیمم سرعت خودرو، زاویای باد طبیعی و ایرفویل خودرو نسبت به محور طولی که در آنها سرعت ماکزیمم می گردد، تا حد حفظ پایداری خودرو، افزایش نشان می دهند.

در شکل های (۸) و (۹) به ترتیب تغییرات ضرایب برآ و پسای ایرفویل خودرو نسبت به زاویای حمله متفاوت در سرعتهای متغیری از باد طبیعی نشان داده شده اند. تغییر در اندازه سرعت باد طبیعی باعث ایجاد تغییر در زاویه  $\beta$  می گردد که این زاویه با تغییر در زاویه حمله ایرفویل بر ضرایب برآ و پسای ایرفویل اثر می گذارد. این ضرایب با افزایش سرعت باد طبیعی، در زاویه حمله پایین تری به ماکزیمم مقدار خود می رسند. با استفاده از این منحنی ها نسبت ضرایب برآ و پسا در سرعتهای مختلف بدست می آید که این نسبت در محاسبات اندازه نیروی محرک خودرو مورد استفاده قرار می گیرد.

در شکل های (۱۰) و (۱۱)، به ترتیب تغییرات نیروی محرک خودرو با زاویای  $\phi$  و  $\alpha$  در سرعتهای متغیر باد طبیعی نشان داده شده اند. نتایج نشان می دهند در سرعت باد بیشتر، برای رسیدن به نیروی محرک بالاتر، ایرفویل خود را باید تحت زاویه حمله بزرگتری قرار گیرد. بدین معنی که نسبت به محور طولی خودرو تغییر زاویه بیشتری دهد. همچنین خودروی طوری کنترل شود که زاویه باد طبیعی با محور طولی خودرو افزایش یابد.

اشکال (۱۲) تا (۱۵) نمودار سرعت خودروی بادی با یک هندسه ثابت در وزنه های مختلف را نشان می دهند. این منحنی ها برای دو حالت متفاوت رسم شده اند. در یک حالت شرایط لغزش و واژگونی خودرو در نظر گرفته شده و در حالت

دیگر از لغزش و واژگونی صرفنظر شده است. با مقایسه این اشکال مشاهده می گردد افزایش وزن خودرو باعث نزدیک شدن دو نمودار سرعت در حالات لغزش و واژگونی و عدم آنها شده است. از این منحنی ها بمنظور تعیین حداقل وزن خودرو برای جلوگیری از لغزش و واژگونی استفاده می گردد و به این ترتیب قیود طراحی خودرو مشخص می گردند. نهایتاً در شکل (۱۶) تغییرات نسبت سرعتهای خودروی بادی با زاویه  $\beta$ ، نمایش داده شده است. افزایش زاویه  $\beta$ ، به دلیل افزایش در سرعت باد طبیعی،  $V_T$ ، و زاویه آن با محور طولی،  $\phi$ ، می باشد. لازم بذکر است، با توجه به اینکه نتایج اکثر آزمایشات تجربی در سراسر دنیا بر روی این مدل خودروها، بر اساس سیستم واحد انگلیسی ارائه گردیده اند، لذا در این مقاله نیز نتایج بر اساس این سیستم ارائه می گردند.

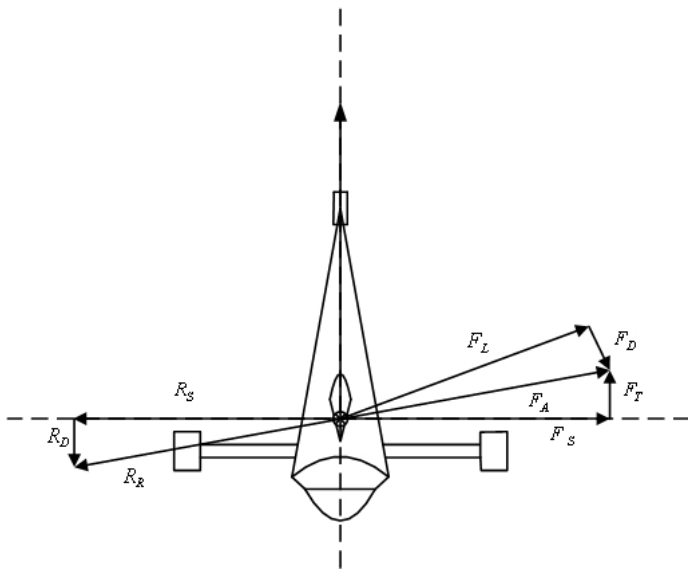
## مراجع

- [1] Larsson.L and Eliasson, R E , " Principle of Yacht Design ", Adlard Coles Nautical, London, second Edition, 2000.
  - [2] Claughton, Weellicome & Sheno, " Sailing Yacht Design Theory ", Addison Wesley Longman Limited, 1998.
  - [3] Van Oossanen , P., " Predicting the Speed of Sailing Yacht ", Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 101, 1993.
  - [4] Claughton, A.R. and Oliver J.C. " Development of a multi-functional velocity prediction program (VPP) for sailig yachts ", International Conference CADAP95, RINA, 1995.
  - [5] Stephens O.J., " Guides to the approximation of sailing yacht performance ", 9<sup>th</sup> CSYS SNAME, 1989.
  - [6] Larsson.L., " Numerical predictions of the flow and resistance components of sailing yachts ", Proceedings from Conference on Yachting Technology, University of West Australia, Perth, 1987.
  - [7] Marchaj, C A, " Aero-hydrodynamics of sailing ", Adlard Coles Nautical, London, second Edition ,1988, reprinted 1993.
  - [8] Larsson.L., " Scientific Methods in Yacht Design ", Annual review of Fluid Mechanics, Vol. 22, 1990.
  - [9] Keuning , J.A., Sonnenberg, U.B., " Developments in the Velocity Prediction based on the Delft Systematic Yacht Hull Series ", The Modern Ycht Conference March 1998.
  - [10] Schwenn, P., Hazen, G., " Drawing with Performance Prediction ", Proceedings of the 12<sup>th</sup> Chesapeaks Sailing Yacht Symposium, Jan., 1995.
  - [11] Somers, Dan M , " Effects of Airfoil Thickness and Maximum Lift Coefficient Roughness Sensivity ", Airfoils, Inc, 1998.
  - [12] Eppler, Richard, " Airfoil Design and Data ", Springer-Verlag (Berlin), 1990.
  - [13] Keuning , J.A and Kapsenberg, G., " Wing-Body interaction on a sailing yacht ", Report 1019-P, 1995.
- [۱۴] منوچهر راد، مازیار سیاح نژاد، مرتضی خیاط، "ساخت و آزمایش یک مدل بادبانی (پاراگلایدر) و خودروی بادی (ایرفویلی)"، مجموعه مقالات پژوهشی دانشکده مهندسی مکانیک سال ۱۳۸۱ دانشگاه صنعتی شریف.

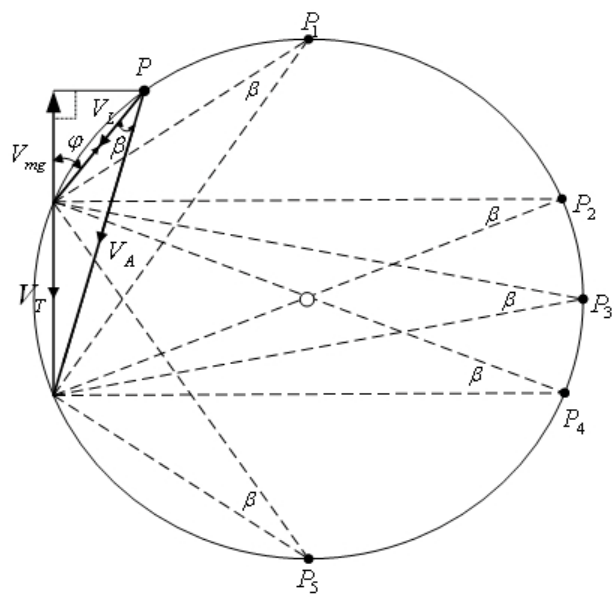




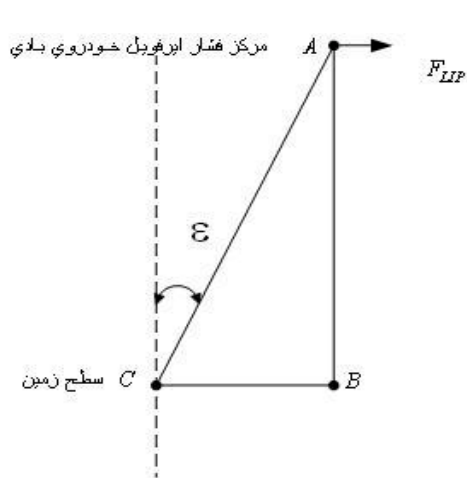
شکل ۱ - نمونه خودروی بادی با بادبان غیر صلب ساخته شده در داخل کشور



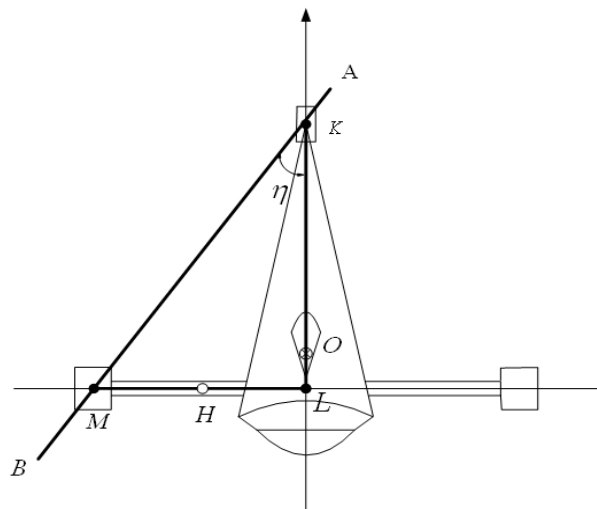
شکل ۳ - مثلث نیروهای خودروی بادی



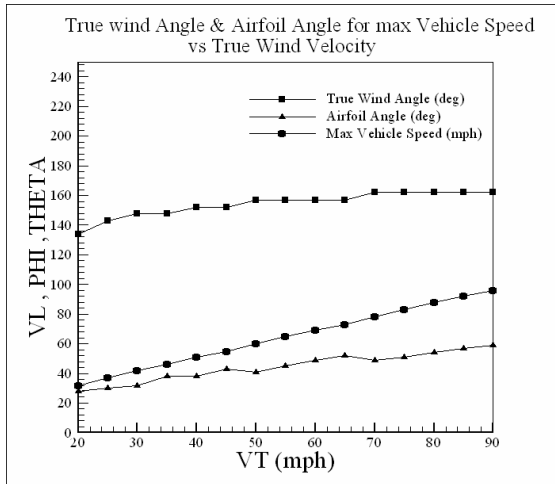
شکل ۲ - مثلث سرعت خودروی بادی در صفحه افقی



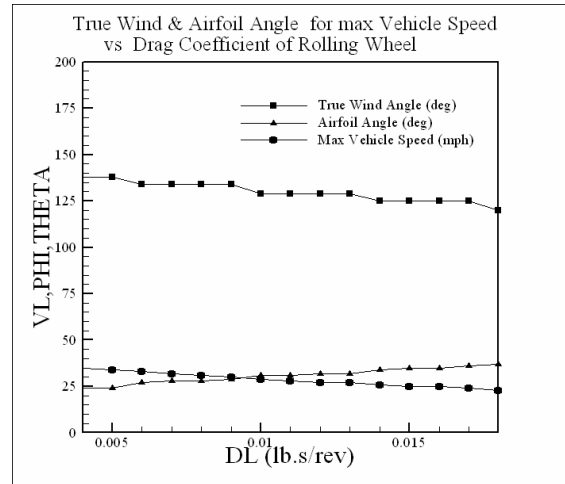
شکل ۵ - شماتیک کج شدن ایرفویل نسبت به محور قائم



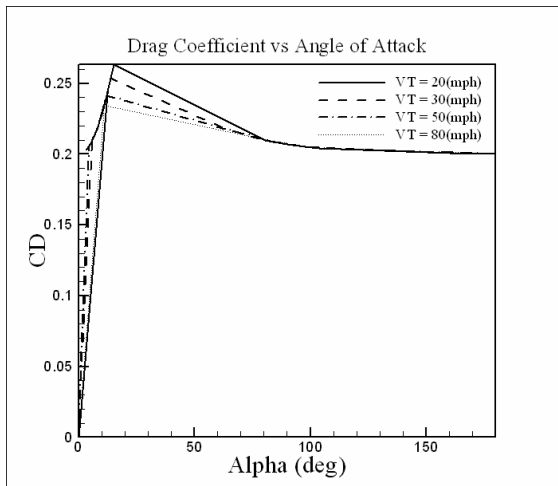
شکل ۴ - شماتیک محور واژگونی خودروی بادی



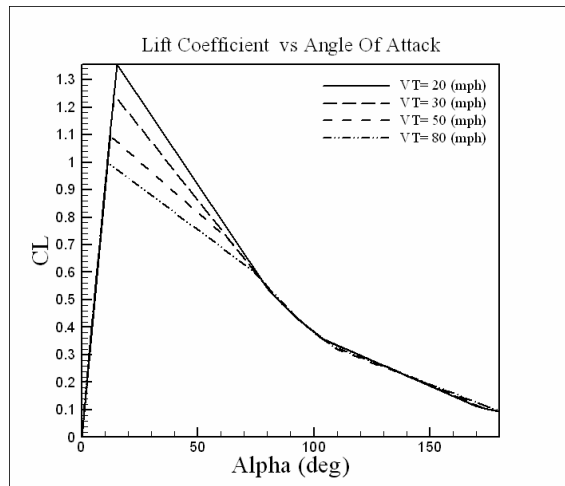
شکل ۷- تاثیر سرعت باد طبیعی بر روی سرعت، زاویه باد طبیعی و زاویه ایرفویل متناظر با ماکزیمم سرعت خودرو



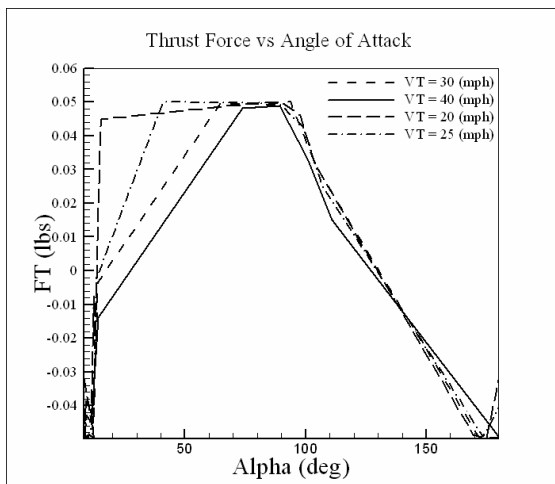
شکل ۶- تاثیر مقاومت غلتشی چرخها بر روی سرعت، زاویه باد طبیعی و زاویه ایرفویل متناظر با ماکزیمم سرعت خودرو



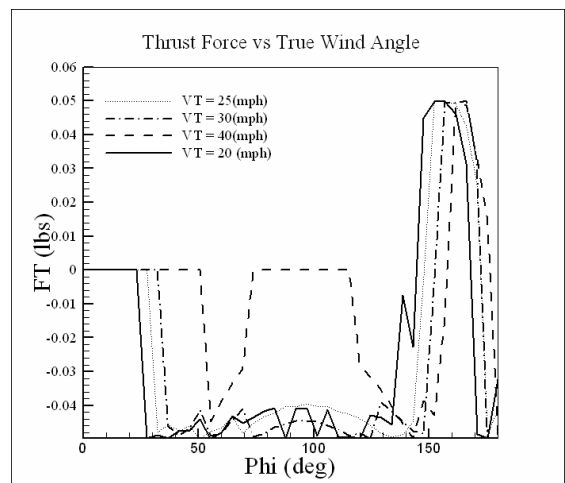
شکل ۹- تغییرات ضریب پسای ایرفویل نسبت به زاویه حمله در سرعتهای مختلف باد طبیعی



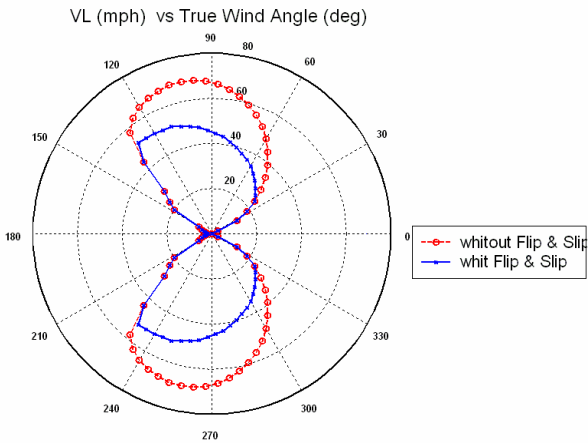
شکل ۸- تغییرات ضریب برآی ایرفویل نسبت به زاویه حمله در سرعتهای مختلف باد طبیعی



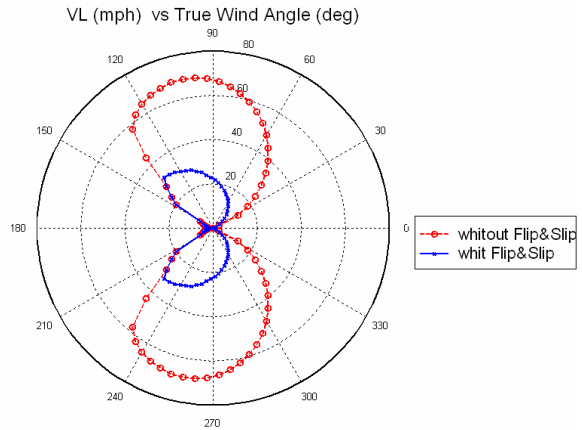
شکل ۱۱- تغییرات نیروی محرک خودرو نسبت به زاویه حمله ایرفویل در سرعتهای مختلف باد طبیعی



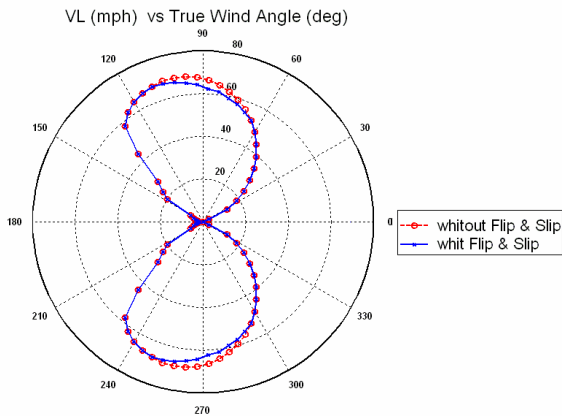
شکل ۱۰- تغییرات نیروی محرک خودرو نسبت به زاویه باد طبیعی در سرعتهای مختلف باد طبیعی



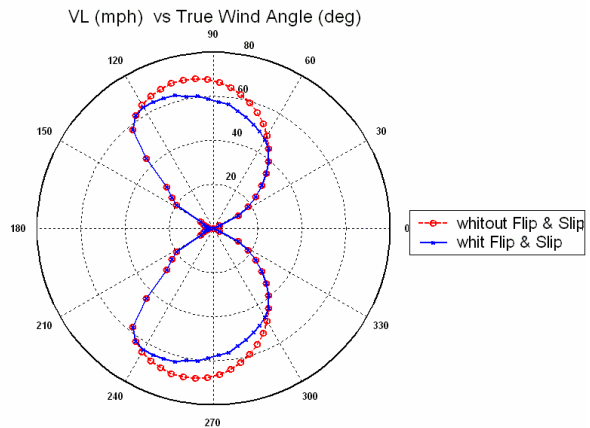
شکل ۱۳ - تغییرات سرعت خودرو با زاویه باد طبیعی در (W=10 kg)



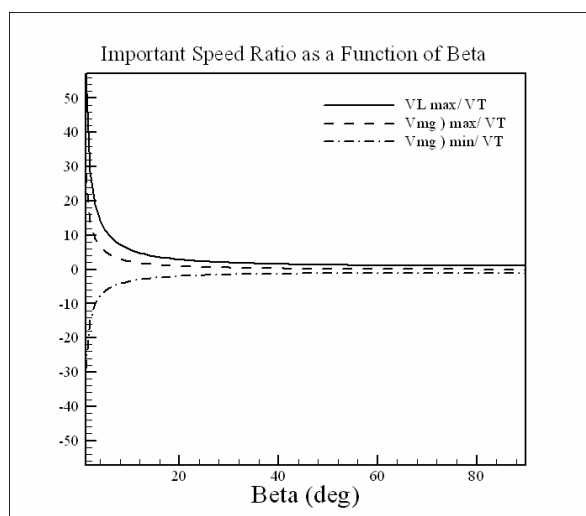
شکل ۱۲ - تغییرات سرعت خودرو با زاویه باد طبیعی در (W=2 kg)



شکل ۱۵ - تغییرات سرعت خودرو با زاویه باد طبیعی در (W=25 kg)



شکل ۱۴ - تغییرات سرعت خودرو با زاویه باد طبیعی در (W=20 kg)



شکل ۱۶ - تغییرات نسبت سرعت‌های خودرو با زاویه باد ظاهری

جدول ۱- نسبت سرعتها بر حسب زوایای مختلف باد طبیعی برای خودروی بادی

	زاویه $\phi$	سرعت بی بعد خودرو $\frac{V_L}{V_T}$	سرعت بی بعد باظاهری $\frac{V_A}{V_T}$	نسبت سرعتها $\frac{V_A}{V_L}$	سرعت بهینه قایق $\frac{V_{mg}}{V_T}$	کمیت شاخص
$P_1$	$\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2}$	$\frac{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2})}{\sin(\beta)}$	$\frac{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2})}{\sin(\beta)}$	$\sqrt{\frac{1 + \sin(\beta)}{1 - \sin(\beta)}}$	$\frac{1}{2 \sin(\beta)} - \frac{1}{2}$	$V_{mg})_{\max}$
$P_2$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{\tan(\beta)}$	$\frac{1}{\sin(\beta)}$	$\frac{1}{\cos(\beta)}$	0	$V_A)_{\max}$
$P_3$	$\frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2}$	$\frac{1}{2 \sin(\frac{\beta}{2})}$	$\frac{1}{2 \sin(\frac{\beta}{2})}$	1	$-\frac{1}{2}$	$V_L = V_A$
$P_4$	$\frac{\pi}{2} + \beta$	$\frac{1}{\sin(\beta)}$	$\frac{1}{\tan(\beta)}$	$\cos(\beta)$	-1	$V_L)_{\max}$
$P_5$	$\frac{3\pi}{4} + \frac{\beta}{2}$	$\frac{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2})}{\sin(\beta)}$	$\frac{\sin(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2})}{\sin(\beta)}$	$\sqrt{\frac{1 - \sin(\beta)}{1 + \sin(\beta)}}$	$-(\frac{1}{2 \sin(\beta)} + \frac{1}{2})$	$V_{mg})_{\min}$

جدول ۲- مشخصات خودروی بادی مدل

10 kg	وزن کل W
0.25	ضریب پسای ایرفویل در زاویه حمله صفر $CD_0$
1.3 m	ارتفاع ایرفویل SPAN
0.2 m	سطح مقطع ایرفویل $A_w$
18 deg	زاویه واماندگی ایرفویل Stall
0.7	ضریب پسای بدنه $CD_{body}$
0.08 m	قطر چرخ جلو $Di_f$
0.11 m	قطر چرخهای عقب $Di_r$
0.9 m	فاصله افقی بین چرخهای عقب Track
1.2 m	فاصله چرخ جلو تا محور چرخهای عقب Wheelbase
0.75	ضریب اصطکاک دینامیکی چرخها $\mu$
0.08 m	طول خط وتر ایرفویل اکسل عقب $C_{beam}$
0.012 m	ضخامت ایرفویل اکسل عقب $T_{beam}$
0.2	ضریب پسای اکسل عقب در زاویه حمله صفر $(CD_0)_{beam}$

# SID



سرویس های  
ویژه



سرویس ترجمه  
تخصصی



کارگاه های  
آموزشی



بلاگ  
مرکز اطلاعات علمی

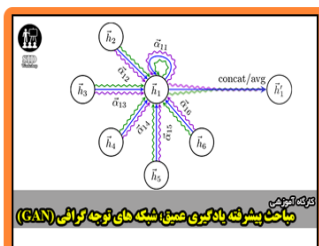


عضویت در  
خبرنامه



فیلم های  
آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛  
شبکه های توجه گرافی  
(Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین آموزش استفاده از  
وب آوساینس



کارگاه آنلاین مقاله روزمره انگلیسی