

تقدیم به پدر و مادرم که پند و اندرزشان چراغ راه من ، یاری ایشان موجب
دلگرمی من و محبتشان آسان کننده مشکلات من است

تشکر و قدردانی

از آقایان دکتر محمد جواد مغربی و دکتر عبدالامیر بک خوشنویس که با راهنمایی هایشان مرا در انجام این تحقیق یاری رسانده اند، بسیار سپاسگزارم.

عنوان :

تحليل عددی کاهش ضریب پسا با استفاده از
تسمه متحرک

Title

**Numerical Analysis of Drag reduction
using Conveyor Belt**

چکیده

اهمیت حفاظت از محیط زیست و منابع محدود انرژی، دانشمندان را بیش از پیش به تحقیق برای یافتن روشهای نوین بهینه سازی مصرف سوخت ترقیب نموده است. بخش اعظم مصرف سوخت به وسایل حمل بار جاده ای و به طور مشخص کامیون ها اختصاص می یابد. استفاده صحیح از تمهیدات موجود برای اصلاح آیرودینامیکی کامیون در مقایسه با کامیونی که مورد اصلاح قرار نگرفته می تواند تا ۲۵ درصد کاهش مقاومت آیرودینامیکی را به همراه داشته باشد که به تبع آن مصرف سوخت کامیون نیز بین ۶ تا ۱۲ درصد کاهش می یابد.

تاکنون روشهای بررسی شده برای کاهش پسا بیشتر ساکن بوده اند اما در این تحقیق تاثیر سطوح متحرک بر پسای آیرودینامیکی یک کامیون استاندارد مورد بررسی قرار می گیرد. تسمه هایی بر روی سقف و پشت تریلر (متعلق به کامیون کلاس ۸) نصب شده اند و تاثیر حرکت تسمه ها بر کاهش ضریب پسا برای تنظیمات متفاوتی از سرعت این سطوح، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تحلیل می گردد. نتایج تحلیل عددی نشان می دهد که کاهش پسای آیرودینامیکی با این روش قابل توجه نمی باشد و در بهترین حالت تنها ۱ درصد کاهش در پسای کلی حاصل می شود.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ب.....	تقدیم
ت.....	تشکر و قدردانی
ث.....	عنوان
ج.....	چکیده
چ.....	فهرست مطالب
ر.....	فهرست علائم
ز.....	فهرست جداول
س.....	فهرست اشکال
ع.....	پیشگفتار

فصل نخست : مقدمه

۲.....	۱-۱ : پسای آیرودینامیکی
۲.....	۱-۱-۱ : پسای اصطکاک پوسته ای
۴.....	۲-۱-۱ : پسای فشاری
۵.....	۳-۱-۱ : پسای القایی
۱۲.....	۲-۱ : سیستم‌های گردابه
۱۳.....	۱-۲-۱ : گردابه
۱۵.....	۳-۱ : پسا در هواپیما
۱۵.....	۱-۳-۱ : تفکیک پسا
۱۶.....	۲-۳-۱ : فن آوری جریان آرام طبیعی و هایبرید

- ۱۸-۳-۳: کاهش پسای حاصل از تولید برآ ۱۸
- ۲۰-۳-۴: مولدهای گردابه زیر لایه^۱ ۲۰
- ۲۲-۳-۵: فن آوری MEMS^۲ ۲۲
- ۲۳-۳-۶: کاهش پسای لزج بوسیله ریلتهها ۲۳
- ۲۵-۳-۷: مقایسه روش های کاهش پسا در هواپیما ها ۲۵
- ۲۶-۴-۱: پسا در کشتی ۲۶
- ۲۷-۴-۱: پسای ناشی از اصطکاک ۲۷
- ۲۸-۴-۲: بهینه سازی شکل بدنه و سطح کشتی ۲۸
- ۲۸-۴-۳: زبری سطح ۲۸
- ۲۹-۴-۴: آلودگی زیست محیطی سطح^۳ ۲۹
- ۳۰-۴-۵: مقاومت هوا ۳۰
- ۳۲-۴-۶: مقاومت موجی^۴ ۳۲
- ۳۲-۴-۷: روش تزریق حباب های ریز^۵ ۳۲
- ۳۴-۵-۱: پسا در خودرو ها ۳۴
- ۳۴-۵-۱: پسای اشکال پایه ۳۴
- ۳۵-۵-۲: بهینه سازی شکل بدنه ۳۵
- ۳۹-۵-۳: برآی آیرودینامیکی^۶ ۳۹
- ۴۰-۵-۴: پسای القائی ۴۰
- ۴۰-۵-۵: کاهش پسای آیرودینامیکی خودرو ها بوسیله مولدهای گردابه ۴۰

^۱ Sub-layer vortex generators

^۲ Micro Electro- Mechanical system

^۳ Fouling

^۴ Wave Drag

^۵ Micro bubble Method

^۶ Aerodynamic Lift

۴۵-۵-۶: تاثیر استوانه چرخان بر پسای آیرودینامیکی کامیون

۵۱-۵-۷: کاهش فعال پسای اصطکاک پوسته ای بوسیله کنترل خطوط اثر کم سرعت

فصل دوم: کشنده و تریلر^۱ متداول کلاس ۸

۵۸-۲-۱: تفکیک انرژی کامیون

۶۱-۲-۲: چه زمانی اصلاحات آیرودینامیکی موثرتر هستند

۶۱-۲-۲-۱: سرعت های زیاد

۶۲-۲-۲: سطح جلویی بزرگ

۶۳-۲-۳: طراحی آیرودینامیکی اولیه ضعیف

۶۷-۲-۳: روشهای کاهش مقاومت آیرودینامیکی کامیون

۶۷-۲-۳-۱: فاصله بین کشنده و تریلر

۷۱-۲-۳-۲: سطوح پشتی و زیرین تریلر

فصل سوم: بررسی تاثیر سطوح متحرک بر پسای کامیون

۸۱-۳-۱: پیشینه استفاده از سطوح متحرک در کاهش پسا

۸۲-۳-۲: حل عددی جریان اطراف کامیون

۸۵-۳-۳: مراحل شبیه سازی در نرم افزار Fluent

۸۶-۳-۳-۱: تولید شکل (هندسه مساله)

۸۸-۳-۳-۲: بررسی شبکه تولید شده

۸۹-۳-۳-۳: انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل

۹۳-۳-۳-۴: انتخاب معادلات اساسی

۹۷-۳-۳-۵: تعیین خواص سیال عامل

^۱ Tractor-Trailer

۶-۳-۳: تعیین شرایط مرزی ۹۷

۷-۳-۳: تعیین مقادیر اولیه ۹۹

فصل چهارم: نتایج تحقیق

۱-۴: تنظیمات سرعت صفحات متحرک ۱۰۲

۱-۱-۴: سقف و سطح پشتی تریلر ثابت ۱۰۲

۲-۱-۴: سقف متحرک و سطح پشتی ثابت ۱۰۳

۳-۱-۴: سقف ثابت و سطح پشتی متحرک ۱۰۴

۴-۱-۴: نتیجه ۱۰۵

۲-۴: تصاویر میدان جریان حاصل از تحلیل عددی حالت دائم ۱۰۶

۳-۴: تصاویر میدان جریان حاصل از تحلیل عددی حالت غیردائم ۱۱۲

پیشنهاد ۱۱۵

پیوست ۱ ۱۱۶

چکیده به انگلیسی ۱۱۷

مراجع ۱۱۸

فهرست علائم

C_D : ضریب پسای کلی

α_i : زاویه حمله بال

V_∞ : سرعت باد نسبی

D_i : پسای القایی

D_f : پسای پوسته ای

Dp : پسای فشاری

q_∞ : فشار دینامیکی

S : مساحت

c_d : ضریب پسای پروفایل

$C_{D,i}$: ضریب پسای القایی

AR : ضریب منظری

C_l : ضریب برآ

Re : عدد رینولدز

Q : دبی

Δp_{stag} : اختلاف فشار ایستایی

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۶۴	جدول ۱-۲ : رابطه کاهش مصرف سوخت با سرعت کامیون
۸۸	جدول ۱-۳ : محدوده محاسبات
۹۷	جدول ۲-۳ : خواص سیال عامل
۱۰۰	جدول ۳-۳ : مقادیر اولیه متغیر های وابسته
۱۰۳	جدول ۱-۴ : مقادیر پسا برای حالتی که $V_b = 0 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_{in} = 30 \cdot \frac{m}{s}$
۱۰۳	جدول ۲-۴ : مقادیر پسا برای حالتی که $V_b = 0 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_r = 30 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_{in} = 30 \cdot \frac{m}{s}$
۱۰۴	جدول ۳-۴ : مقادیر پسا برای حالتی که $V_b = 20 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_{in} = 30 \cdot \frac{m}{s}$
۱۰۴	جدول ۴-۴ : مقادیر پسا برای حالتی که $V_b = -20 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \cdot \frac{m}{s}$ و $V_{in} = 30 \cdot \frac{m}{s}$

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱: تغییرات ضریب پسا نسبت به اعداد رینولدز برای یک کره کوچک
۳	شکل ۱-۲: توزیع بدون بعد سرعت و فشار دینامیکی در لایه مرزی
۵	شکل ۱-۳: جریان حول اجسام و تاثیر شکل بر C_D
۶	شکل ۱-۴: بال محدود
۷	شکل ۱-۵: شماتیک گردابه های نوک بال
۸	شکل ۱-۶: تاثیر پایین شوی بر روی مقطع بال در جریان محلی
۹	شکل ۱-۷: نتایج آزمایشی ضریب پسای پروفایل برای کره
۱۱	شکل ۱-۸: چند بال مختلف
۱۱	شکل ۱-۹: نمونه ای از بال بیضوی بر روی هواپیما
۱۲	شکل ۱-۱۰: ضرایب منظری متفاوت
۱۴	شکل ۱-۱۱: خیابان گردابه ناشی از یک استوانه در جریان سیال
۱۵	شکل ۱-۱۲: هزینه های مستقیم عملیاتی یک هواپیمای دور برد
۱۶	شکل ۱-۱۳: تفکیک پسا ی یک هواپیمای بزرگ
۱۶	شکل ۱-۱۴: شماتیک اعمال سیستم مکش در بویینگ ۷۴۷
۱۹	شکل ۱-۱۵: وسایل نوک بال متفاوت
۲۰	شکل ۱-۱۶: انرژی جنبشی جریان عرضی در پایین دست نوک بال
۲۱	شکل ۱-۱۷: تاثیر مولدگردابه بر ضرایب پسا و برآ
۲۱	شکل ۱-۱۸: پروفیل جریان حاصل از حلال CFD حول مولدهای گردابه
۲۲	شکل ۱-۱۹: تاثیریک جت مصنوعی بر جریان اصلی

- شکل ۱- ۲۰: شماتیک ریبلت ها در جریان ۲۳
- شکل ۱- ۲۱: افزایش مقاومت کلی کشتی بر اثر آلودگی زیستی سطح ۲۹
- شکل ۱- ۲۲: مقاومت آیرودینامیکی چند نمونه کشتی ۳۱
- شکل ۱- ۲۳: شماتیک تزریق حباب ها ۳۳
- شکل ۱- ۲۴: نتایج حاصل از آزمایش در تونل باد برای اشکال پایه ۳۴
- شکل ۱- ۲۵: ضرایب پسا ی تعدادی نمونه در تونل باد ۳۶
- شکل ۱- ۲۶: نمونه آزمایشی ناسا دارای گوشه های تیز ۳۷
- شکل ۱- ۲۷: نمونه آزمایشی ناسا با گوشه های گرد شده و صفحات پشتی ۳۸
- شکل ۱- ۲۸: نمونه آزمایشی ناسا مجهز به دنباله مخروطی ۳۸
- شکل ۱- ۲۹: ضرایب برآی تعدادی نمونه تونل باد ۳۹
- شکل ۱- ۳۰: جریان حول یک خودرو سدان ۴۱
- شکل ۱- ۳۱: شماتیک پروفیل سرعت روی انتهای سقف ۴۲
- شکل ۱- ۳۲: شماتیک جریان حول یک مولد گردابه ۴۳
- شکل ۱- ۳۳: وضعیت قرار گرفتن مولدها ۴۳
- شکل ۱- ۳۴: توزیع سرعت روی سقف ۴۳
- شکل ۱- ۳۵: تاثیر مولدهای گردابه از نوع سپری شکل ۴۴
- شکل ۱- ۳۶: تاثیر مولدهای گردابه از نوع بال مثلثی شکل ۴۴
- شکل ۱- ۳۷: بردارهای سرعت در اطراف نقطه جدایش (CFD) ۴۵
- شکل ۱- ۳۸: (a) حالت موجود (b) حالت مطلوب ۴۶
- شکل ۱- ۳۹: نمونه کامیونت در تونل باد ۴۷
- شکل ۱- ۴۰: توزیع فشار بر روی تریلر با استفاده از روشهای گوناگون ۴۸

- شکل ۱-۴۱: توزیع سرعت حاصل از نرم افزار و تونل باد ۴۸
- شکل ۱-۴۲: گردابه فاصله، سرعت چرخش استوانه در فاصله $\frac{r}{\min}$ ۰ ۴۹
- شکل ۱-۴۳: گردابه پشت، سرعت چرخش استوانه در فاصله $\frac{r}{\min}$ ۰ ۴۹
- شکل ۱-۴۴: گردابه فاصله، سرعت چرخش استوانه در فاصله، $\frac{r}{\min}$ ۲۰۰۰ ۵۰
- شکل ۱-۴۵: گردابه پشت، سرعت چرخش استوانه در فاصله $\frac{r}{\min}$ ۲۰۰۰ ۵۰
- شکل ۱-۴۶: آشکارسازی جریان بوسیله دود ۵۲
- شکل ۱-۴۷: شماتیک ذهنی از روش ۵۳
- شکل ۱-۴۸: نمونه‌های از ساختار سیستم ۵۴
- شکل ۱-۴۹: نمونه سیستم ساخته شده ۵۶
- شکل ۲-۱: کشنده و تریلر متداول کلاس ۸ ۵۸
- شکل ۲-۲: تفکیک انرژی برای کشنده و تریلر ۵۹
- شکل ۲-۳: نمودار کلوچه ای تفکیک انرژی مصرفی کامیون ۶۰
- شکل ۲-۴: نیروی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت آیرودینامیکی و اصطکاک ۶۱
- شکل ۲-۵: تصویر سطح جلویی که در میزان پسا موثر است ۶۲
- شکل ۲-۶: شماتیک جریان حول یک کشنده و تریلر متداول بدون اصلاحات آیرودینامیکی ۶۳
- شکل ۲-۷: شماتیک جریان حول یک کشنده و تریلر متداول با اصلاحات آیرودینامیکی ۶۳
- شکل ۲-۸: سهم اجزاء کامیون از پسای آیرودینامیکی ۶۵
- شکل ۲-۹: تمهیدات به کار رفته برای کاهش مقاومت آیرودینامیکی کامیون ۶۵
- شکل ۲-۱۰: مواضع اصلی ایجاد پسا در کشنده و تریلر متداول ۶۶
- شکل ۲-۱۱: نمای جریان در فاصله، بدون باد جانبی ۶۷
- شکل ۲-۱۲: شماتیک تله های گردابه ۶۷

- شکل ۲-۱۳ : تله های گردابه نصب شده بر سطح تریلر ۶۸
- شکل ۲-۱۴ : شماتیک عملکرد تله ها ۶۸
- شکل ۲-۱۵ : پرده نصب شده در فاصله کشنده و تریلر ۶۸
- شکل ۲-۱۶ : مدل عددی مجهز به صفحه جداکننده (اندازه ها به میلیمتر) ۶۹
- شکل ۲-۱۷ : مدل مورد استفاده در تونل باد مجهز به صفحه جدا کننده با ۰/۷ طول ۷۰
- شکل ۲-۱۸ : نتایج آزمایش تونل باد برای صفحه جداکننده در زوایای حمله متفاوت ۷۱
- شکل ۲-۱۹ : شماتیک پشت تریلر ۷۲
- شکل ۲-۲۰ : شماتیک جریان در پشت تریلر از دو نما ۷۲
- شکل ۲-۲۱ : شماتیک نصب صفحات VSD ۷۲
- شکل ۲-۲۲ : نحوه نصب صفحات VSD ۷۲
- شکل ۲-۲۳ : نحوه نصب صفحات پشتی ۷۳
- شکل ۲-۲۴ : صفحات نصب شده در حین استفاده ۷۴
- شکل ۲-۲۵ : صفحات نصب شده ، غیر فعال ۷۴
- شکل ۲-۲۶ : (a صفحات پشتی زاویه دار b) صفحات پشتی خمیده ۷۴
- شکل ۲-۲۷ : نمودار تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله با صفحات پشتی ۷۵
- شکل ۲-۲۸ : نحوه عملکرد VSD ۷۶
- شکل ۲-۲۹ : نحوه نصب UFD ۷۶
- شکل ۲-۳۰ : نحوه نصب UFD ۷۶
- شکل ۲-۳۱ : شماتیک جریان حاصل از عملکرد UFD ۷۷
- شکل ۲-۳۲ : بررسی تنظیمات مختلف صفحات زیرین در حل عددی جریان ۷۸
- شکل ۲-۳۳ : تاثیر استفاده هم زمان از صفحات پشتی و صفحات زیرین ۷۸

- شکل ۲-۳۴: تمهیدات قابل اجرا بر روی کِشنده و تریلر متداول ۷۹
- شکل ۳-۱: نحوه نصب تسمه متحرک بر روی سیلندر ۸۱
- شکل ۳-۲: شبیه سازی خطوط جریان اطراف کامیون ۸۲
- شکل ۳-۳: کانتور سرعت در صفحه میانی عمود بر تریلر ۸۳
- شکل ۳-۴: کانتورهای فشار اطراف کامیون ۸۴
- شکل ۳-۵: بردارهای سرعت در گردابه پشتی ۸۴
- شکل ۳-۶: ابعاد مدل مورد نظر در آزمایشهای تونل باد و در ساخت هندسه مسئله ۸۶
- شکل ۳-۷: شماتیک موقعیت مدل و تونل باد ۸۷
- شکل ۳-۸: نمونه هندسه ایجاد شده، نشان دهنده قسمت کِشنده ۸۸
- شکل ۳-۹: مراحل حل تفکیکی ۹۱
- شکل ۳-۱۰: مراحل حل پیوسته ۹۱
- شکل ۳-۱۱: نمودار همگرایی ضریب پسا پس از ۱۰۰۰ مرتبه تکرار ۱۰۰
- شکل ۴-۱: بردارهای سرعت در اطراف کامیون ۱۰۲
- شکل ۴-۲: کانتورهای فشار ایستایی، $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ۱۰۶
- شکل ۴-۳: کانتورهای سرعت، $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ۱۰۶
- شکل ۴-۴: کانتورهای فشار در فاصله، $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ۱۰۷
- شکل ۴-۵: گردابه پشت تریلر از نمای بالا، $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ۱۰۷
- شکل ۴-۶: گردابه پشت تریلر از نمای جانبی، $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ۱۰۸
- شکل ۴-۷: بردارهای سرعت دیواره پشتی تریلر، $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ۱۰۸
- شکل ۴-۸: نمایی از جریان برخوردی با کِشنده ۱۰۹
- شکل ۴-۹: بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده ۱۰۹

- شکل ۴-۱۰ : بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده
۱۱۰
- شکل ۴-۱۱ : بردارهای سرعت در محل برخورد با لبه حمله تریلر
۱۱۰
- شکل ۴-۱۲ : بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده از نمای بالا و نزدیک
۱۱۱
- شکل ۴-۱۳ : بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده در صفحه $Y-Z$
۱۱۱
- شکل ۴-۱۴ : خطوط جریان اطراف کامیون پس از ۱۲ ثانیه از شروع
۱۱۲
- شکل ۴-۱۵ : خطوط جریان اطراف کامیون پس از ۱۲ ثانیه از شروع
۱۱۲
- شکل ۴-۱۶ : گردابه پستی مشخص شده با خطوط جریان ناشی از سقف
۱۱۳
- شکل ۴-۱۷ : گردابه پستی مشخص شده با خطوط جریان ناشی از صفحه $X-Y$
۱۱۳
- شکل ۴-۱۸ : جریان برخوردی با کِشنده، خطوط جریان در صفحه $X-Z$
۱۱۴
- شکل ۴-۱۹ : جریان در فاصله ، خطوط جریان در صفحه $X-Y$
۱۱۴

پیشگفتار

کاهش مقاومت آیرودینامیکی وسایل نقلیه از چند دهه قبل به یکی از مهمترین دغدغه های دانشمندان و طراحان بدل گردیده است. اهمیت این مطلب از آن روست که کاهش قابل توجه در مصرف سوخت نه تنها صرفه جویی اقتصادی به همراه دارد بلکه آلودگی زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت های فسیلی را نیز کاهش می دهد.

یک محاسبه ساده نشان می دهد برای کامیونی که سالانه ۱۶۰۰۰۰ کیلومتر مسیر می پیماید و به طور متوسط در هر ۱۰۰ کیلومتر ۳۵ لیتر سوخت مصرف می کند، ۶ درصد کاهش در مصرف سوخت به معنای ۳۳۶۰ لیتر صرفه جویی سالانه است. حال اگر این رقم را در تعداد کامیون های موجود ضرب کنیم میزان صرفه جویی بسیار چشمگیر خواهد بود.

روش های متفاوتی برای کاهش مقاومت آیرودینامیکی وسایل نقلیه آزموده، بعضی به عرصه صنعت وارد شده اند. از آن جمله می توان به استفاده از مولدهای گردابه^۱، ریبلتها^۲ در خودرو ها و هواپیماها و روش تزریق حباب برای کشتی ها اشاره نمود. نباید فراموش کرد که بهینه سازی شکل بدنه وسایل نقلیه همواره موثرترین روش بوده است.

تمامی روش های مورد استفاده در صنعت به نوعی روشهای استاتیک هستند زیرا تغییرات ایجاد شده در خودرو ثابت می باشند. رویکرد به استفاده از سطوح متحرک به منظور کاهش پسا^۳ عمر چندان زیادی ندارد [۱۱]، [۳۲]، [۳۳] و هنوز به عرصه صنعت وارد نشده است.

در این تحقیق سعی شده تا تاثیر استفاده از سطوح متحرک (تسمه نقاله) نصب شده بر رو و پشت یک مدل متداول تریلر نشان داده شود. به این منظور جریان حول تریلر مذکور با استفاده از نرم افزار Fluent به صورت سه بعدی مدل گردید و شرایط مسئله با استفاده از نتایج و تجربیات

آزمایشهای تونل باد انجام گرفته بر روی مدل مذکور تنظیم گردیدند. [۱۶]

^۱ Vortex Generators
^۲ Riblets
^۳ Drag

فصل نخست

مقدمه

۱-۱: پسای آیرودینامیکی

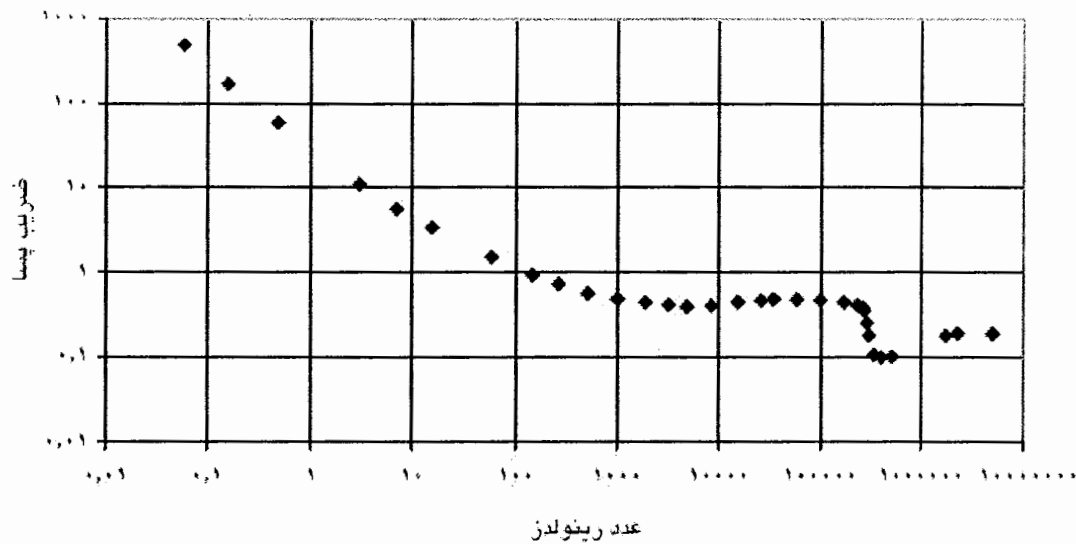
از آنجائیکه در مباحث آتی از میان مشتقات پسا تنها سه نوع از آنها یعنی پسای اصطکاک پوسته ای^۱، پسای القایی^۲ و پسای فشاری^۳ از اهمیت بیشتری برخوردارند، در این بخش تنها به ارائه توضیح درباره آنها بسنده می شود.

۱-۱-۱: پسای اصطکاک پوسته ای

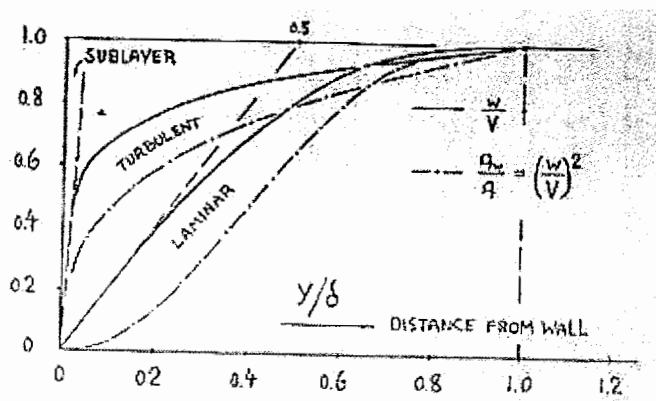
لزجت یک مقاومت مولکولی است که ذرات سیال در برابر حرکت نسبت به یکدیگر و نسبت به سطوح جسم مانع، از خود نشان می دهند.

به طور مستقیم این مقاومت خود را به شکل پسای اصطکاک نشان می دهد. این بدان معنی است که در یک حالت مشابه سرخوردن سطوح جامد بر روی یکدیگر که نیروی مماسی در بین آنها ایجاد می شود (در خلاف جهت هر کدام) و ما آن را اصطکاک می نامیم، نیروی مشابهی نیز در هنگام عبور هوا یا هر سیالی از روی سطح یک جسم ایجاد می شود. در اعداد رینولدز خیلی پایین - سیالاتی با لزجت زیاد و یا در ابعاد خیلی کوچک- لزجت پارامتر تعیین کننده پسای جسم می باشد. تغییرات ضریب پسای کره نسبت به عدد رینولدز در شکل ۱-۱ پس از انجام آزمایشات تجربی نمایش داده شده است.

^۱ Skin Friction Drag
^۲ Induced Drag
^۳ Pressure Drag (Form Drag)






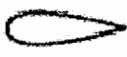

شکل ۱-۱: تغییرات ضریب پسا نسبت به اعداد رینولدز برای یک کره کوچک [۳]



شکل ۱-۲: توزیع بدون بعد سرعت و فشار دینامیکی در لایه مرزی

شکل ۱-۲ نشان دهنده توزیع بدون بعد سرعت و فشار دینامیکی در لایه مرزی است. برای لایه مرزی جریان آرام داریم:

$$\frac{w}{v} = \gamma \left(\frac{y}{\delta} \right) - \gamma \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\gamma} + \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\epsilon}$$

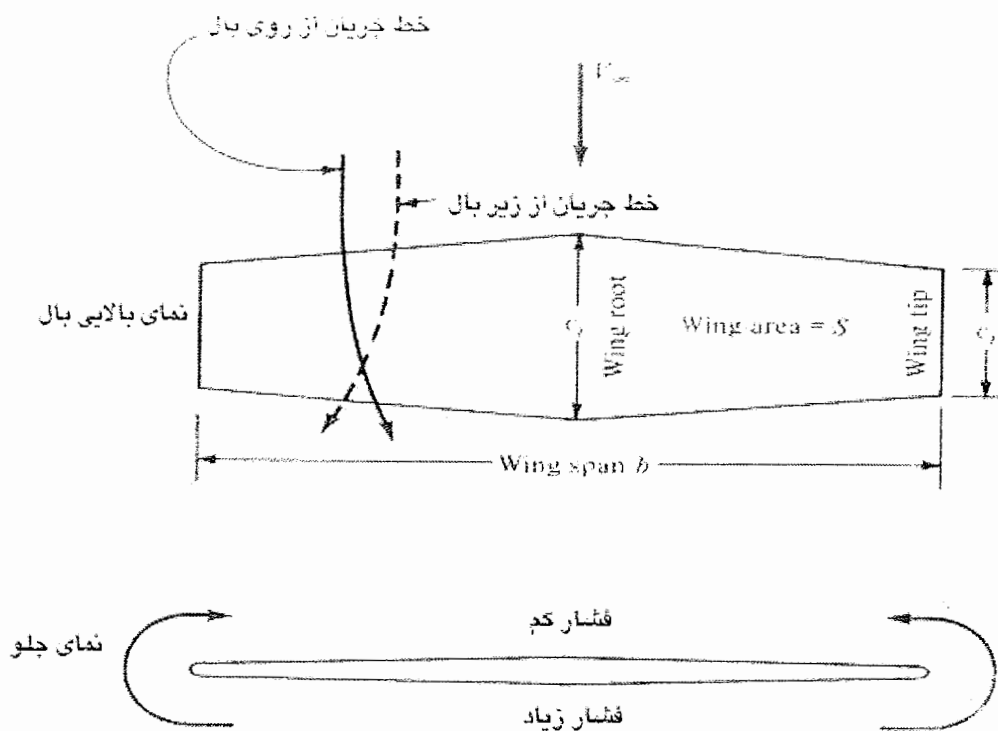
شکل	ضریب پسا
کره 	0.47
نیم کره 	0.42
مکعب 	1.05
بدنه استریم لاین 	0.04
نیم بدنه استریم لاین 	0.09

شکل ۳-۱: جریان حول اجسام و تاثیر شکل بر C_D [۱]

۳-۱-۱: پسای القایی

بر خلاف برآزاها^۱ که ماهیتی دو بعدی دارند، بالها باید سه بعدی فرض شوند. برای واضحتر شدن موضوع با شکل ۴-۱ ادامه می دهیم. در این شکل نمای جلو و بالای یک بال محدود را مشاهده می کنید. همانطور که میدانیم دلیل فیزیکی ایجاد نیروی برآ در بال وجود ناحیه پر فشار در زیر بال و ناحیه کم فشار در روی بال است. این عدم تعادل موجب ایجاد برآ می شود.

^۱ Airfoils



شکل ۴-۱: بال محدود^۱. [۲]

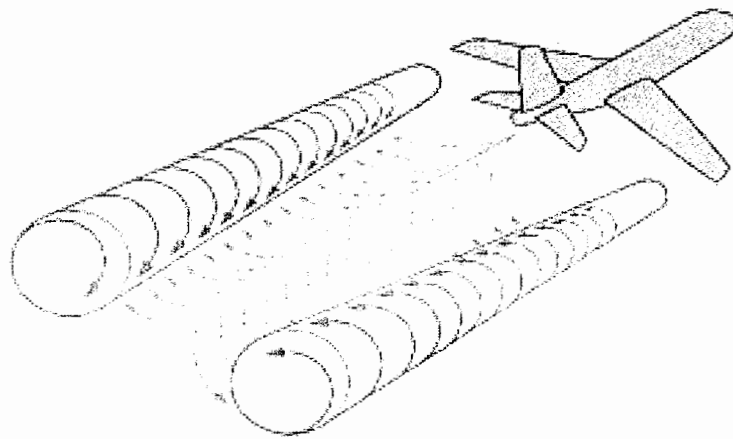
باید دقت داشت که این نابرابری فشاری باعث تمایل جریان به چرخیدن حول نوک از ناحیه پر فشار به ناحیه کم فشار (از پایین بال به بالای بال) می شود. این جریان حول نوک بالها را در نمای جلویی بال در شکل ۴-۱ می توانید مشاهده کنید.

در سطح بالایی بال عموماً یک مولفه عرضی جریان^۲ از سمت نوک بال به سمت ریشه بال ایجاد می شود که باعث خم شدن خطوط جریان روی سطح بالایی از نوک بال به سمت ریشه بال می شود. در سطح زیرین بال نیز در روندی مشابه و در جهت متفاوت خطوط جریان از سمت ریشه بال به سمت نوک بال خمیده می شوند.

^۱ Finite Wing
^۲ Span wise

این پدیده در نمای بالایی بال دیده می شود. بنابراین همانطور که گفته شد جریان حول یک بال محدود، سه بعدی است و باید توقع داشت خصوصیات آیرودینامیکی چنین بالی با مقاطع برآزا متفاوت باشد.

تمایل جریان به نشت کردن در حول نوک بالها یک اثر مهم دیگر هم بر روی آیرودینامیک بال دارد. این جریان یک حرکت چرخشی را ایجاد میکند که به سمت پایین دست بال فرار می کند و گردابه در حال فراری از نوک بال ایجاد می شود. این گردابه ها در شکل ۱-۵ نمایش داده شده اند. برای هواپیماهای بزرگ مانند بویینگ ۷۴۷، این گردابه ها به قدری عظیم هستند که قادرند هواپیماهای کوچک را در نزدیکی خود از کنترل خارج نمایند.

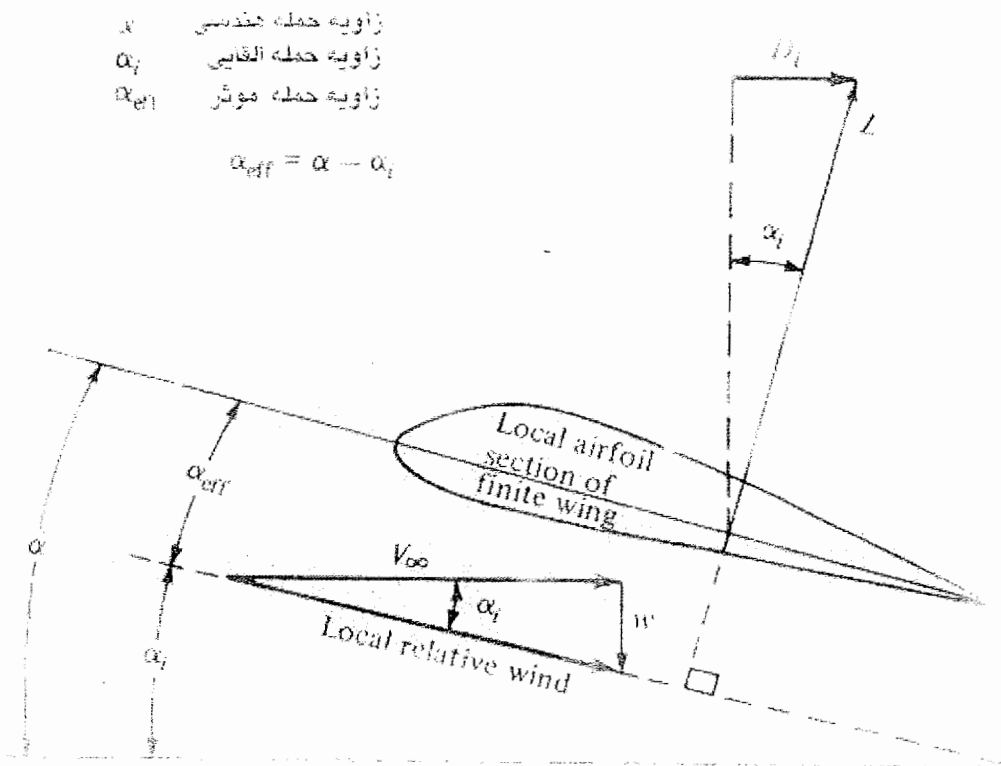


شکل ۱-۵: شماتیک گردابه های نوک بال

این گردابه ها در پایین دست و در همسایگی بال یک مولفه کوچک از سرعت هوا به سمت پایین ایجاد می نماید. دو گردابه تمایل دارند که با درگیر شدن با هوای اطراف، آن را به سمت پایین بکشند و این حرکت ثانویه باعث ایجاد یک مولفه سرعت کوچک به سمت پایین بال می شود. این مولفه را

پایین شوی^۱ می نامند و با W نشان می دهند. بر اثر ترکیب پایین شوی با جریان باد نسبی (V_∞)

یک باد نسبی محلی^۲ ایجاد می شود که در نزدیکی هر مقطع بال به سمت پایین به وجود می آید.



شکل ۱-۶ : تاثیر پایین شوی بر روی مقطع بال در جریان محلی [۲]

بردار برای محلی عمود بر جهت جریان نسبی محلی است و با راستای عمود زاویه α_i را می سازد.

بنابراین برآ دو مولفه دارد یکی در جهت جریان باد نسبی (V_∞) و دیگری عمود بر آن. مولفه ای که در

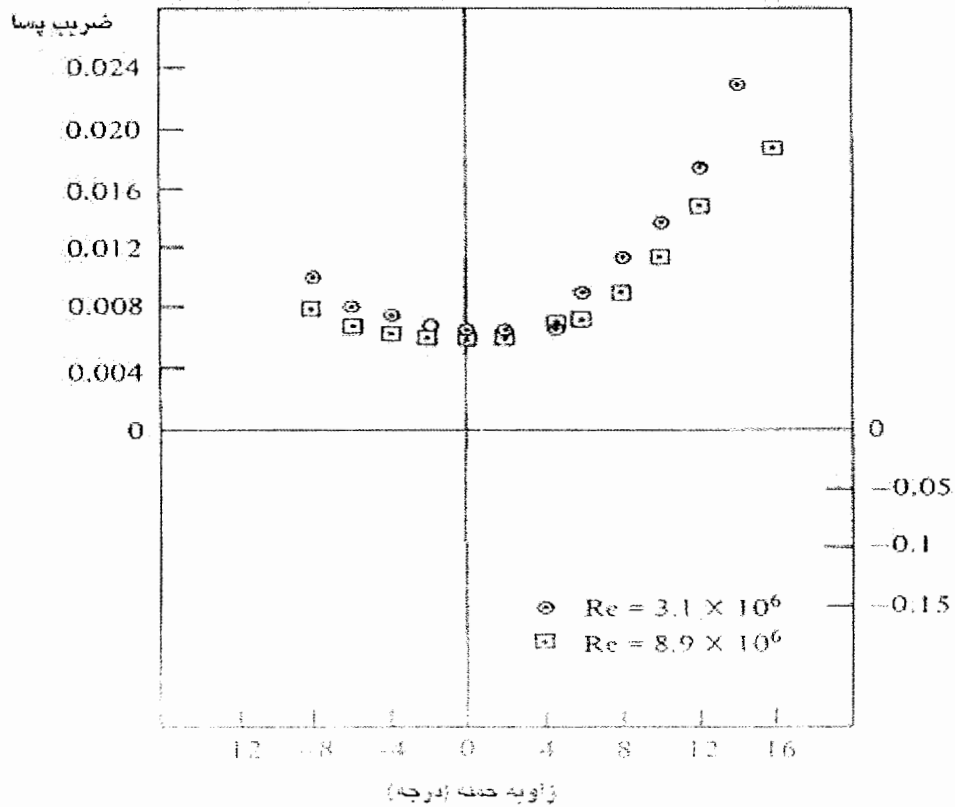
جهت باد نسبی است و با D_i نمایش داده می شود را پسای القایی^۳ یا پسای ناشی از برآ^۴ می نامند.

باید توجه داشت که پسای روی یک بال محدود مادون صوت مجموع پسای القایی D_i ، پسای اصطکاک

پوسته ای D_f و پسای فشاری D_p (حاصل از جدایش جریان) است.

^۱ Down Wash
^۲ Local Relative Wind
^۳ Induced Drag
^۴ Drag due to Lift

دو مورد آخر بر اثر لزجت حاصل می شوند و به مجموع آنها پسای پروفایل می گویند. ضریب پسای پروفایل c_d برای یک برآزای NACA ۲۴۱۲ در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱: نتایج آزمایشی ضریب پسای پروفایل برای NACA ۲۴۱۲ [۲]

ضریب پسای پروفایل c_d به شکل زیر تعریف می شود:

$$C_d = \frac{D_f + D_p}{q_\infty \cdot S}$$

ضریب پسای القایی $C_{D,i}$ نیز به شکل زیر تعریف می شود:

$$C_{D,i} = \frac{D_i}{q_\infty \cdot S}$$

و ضریب پسای کلی برای یک بال محدود (C_D) با رابطه زیر نشان داده می شود:

$$C_D = c_d + C_{D,i}$$

در رابطه بالا مقدار C_d معمولاً از اطلاعات برآزا به دست می آید (پایه تجربی دارد مانند آنچه در شکل ۱-۷ ارائه گردیده) و مقدار $C_{D,i}$ از تئوریهای مربوط به بال محدود قابل محاسبه است.^۱

با استفاده از تئوری خط برآی پرناتل^۲ و در نظر گرفتن توزیع بیضوی برآ $\left(\Gamma_{(y)} = \Gamma \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \right)$

با تعریف ضریب منظری^۳ به عنوان یک خصوصیت هندسی از بال محدود که به صورت زیر تعریف می شود:

$$AR = \frac{b^2}{S}$$

پسای القایی حاصل از محاسبات چنین خواهد بود:

$$C_{D,i} = \frac{c_L^2}{\pi \cdot e \cdot AR}, \quad 0 < e < 1$$

که برای توزیع بیضوی ($e=1$) بهترین نتیجه حاصل می شود:

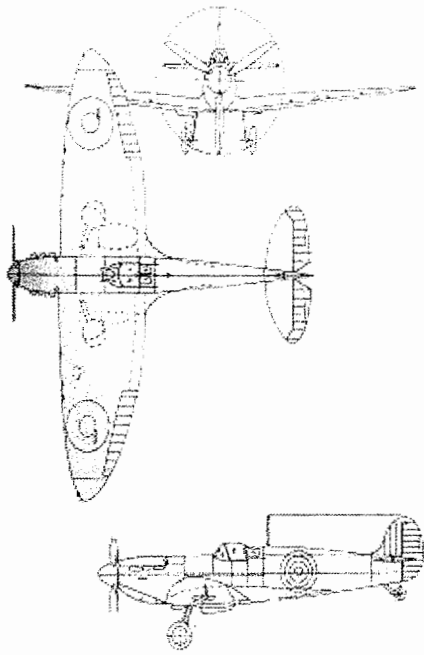
$$C_{D,i} = \frac{c_L^2}{\pi \cdot AR}$$

رابطه بالا یک نتیجه بسیار مهم است. این رابطه نشان می دهد که ضریب پسای القایی به طور مستقیم با مجذور ضریب برآ متناسب است. همانطور که پیشتر دیدیم، پسای القایی، ناشی از گردابه های تولید شده از جریان های نوک بال است که به علت اختلاف فشار پایین و بالای بال ایجاد می شوند و نیروی برآ نیز از همین اختلاف فشار ناشی می شود، پس فرمول به دست آمده دور از انتظار نیست.

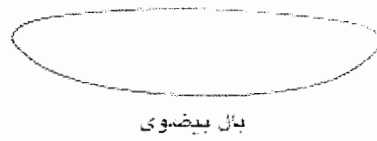
^۱ برای مطالعه بیشتر میتوانید به مرجع [۲] فصل ۵ مراجعه کنید.

^۲ Prandtl's Classical Lifting-Line Theory

^۳ Aspect Ratio



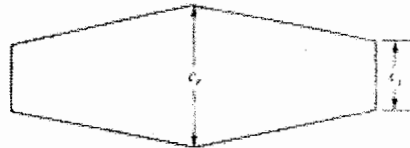
شکل ۱-۹: نمونه ای از بال بیضوی بر روی هواپیما [۲]



بال بیضوی



بال مستطیلی



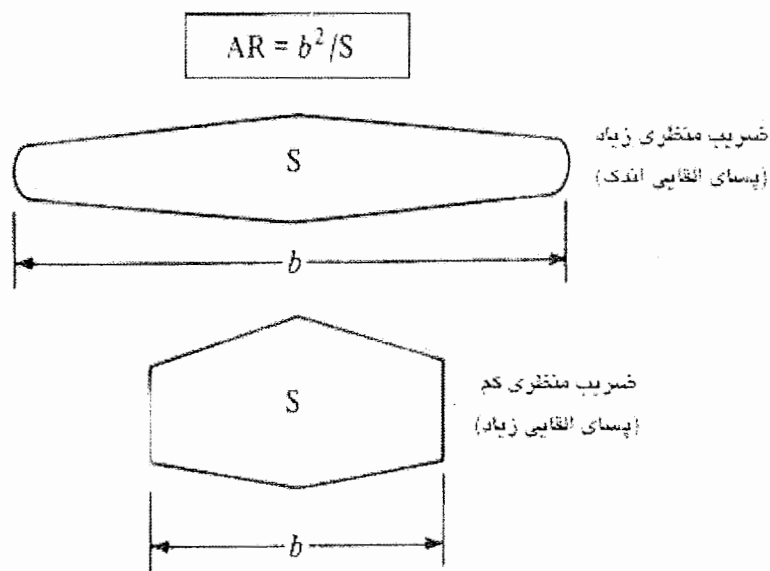
بال زاویه دار

شکل ۱-۸: چند بال مختلف [۲]

در حقیقت پسای القایی هزینه ای است که هواپیما برای تولید برآ می پردازد. باید توجه داشت که چون $C_{D,i} \propto C_L^2$ با افزایش ضریب برآ، ضریب پسا به سرعت افزایش می یابد و به بخش مهمی از پسای کلی بدل می شود. در مواردی مانند نشستن و برخاستن هواپیما و در سرعت های زیاد پروازی این میزان تا ۲۵٪ از پسای کلی می رسد.

نکته قابل توجه دیگر که از رابطه قبل به دست می آید این است که $C_{D,i}$ به طور معکوس با ضریب منظری بال نسبت دارد. بنابراین برای کاهش پسای القایی باید بالی بسازیم که حداکثر ضریب منظری ممکن را داشته باشد. دو بال با ضرایب منظری کم و زیاد در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده اند. متأسفانه طراحی بالهایی با ضرایب منظری بسیار زیاد به مقاومت ساختمانی بال محدود می شود.

ضریب منظری بال هواپیمای برادران رایت^۱ ۶ بود و ضریب منظری هواپیماهای مادون صوت امروزی نیز مابین ۶ و ۸ است.^۲



شکل ۱-۱۰: ضرایب منظری متفاوت [۲]

۱-۲: سیستم‌های گردابه

با حرکت دادن یک جسم در سیال، یک حرکت کمابیش منظم ذرات سیال در دنباله جسم به جای می‌ماند. گفته می‌شود که، معادل انرژی که برای حرکت دادن جسم بر خلاف پسای موجود صرف می‌شود، اندازه حرکت به سیال منتقل شده است.

^۱ Wright Flyer ۱۹۰۳

^۲ هواپیمای U-۲ ساخت شرکت لاکهید ضریب منظری معادل $AR = ۱۴/۳$ دارد.

۱-۲-۱: گردابه

حجم معینی از ذرات سیال شتاب می‌گیرد به گونه‌ای که جسم متحرک را تعقیب نماید. در جریان مغشوش این حرکت ذرات با مؤلفه‌های حرکتی آنها نسبت به یکدیگر ترکیب می‌شود. این نوع حرکات در دنباله و شکل‌گیری گردابه‌ها به شرح ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف (مغشوش

شکل‌گیری گردابه بدون یک ترتیب منظم و به شکل مغشوش پشت خیلی اجسام انجام می‌شود.

ب (گردابه‌های ساکن

در سوراخ‌ها و فاصله‌ها شکل می‌گیرند. کمابیش به مکان خود محدود می‌شوند اما اندکی مومنتوم سیال عبوری خارجی را مصرف می‌کنند.

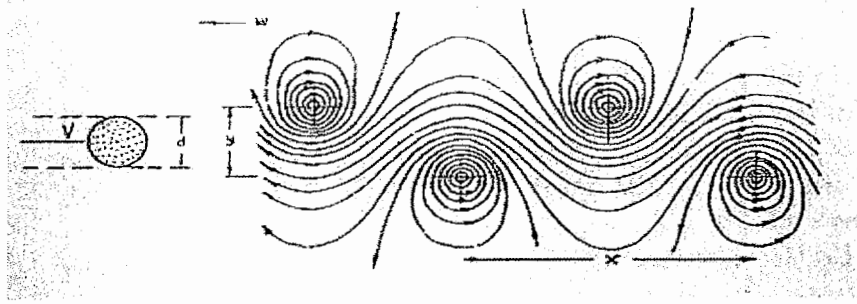
ج) گردابه‌های القایی

یک جفت گردابه که در پشت بالها شکل می‌گیرند. این گردابه‌ها همچنین در پشت خیلی اجسام غیر مولد برآ نیز به چشم می‌خورند مانند بدنه هواپیما و اتومبیل‌ها.

د) خیابان گردابه‌ها^۱

گردابه‌ای خاص که در دنباله اجسام دو بعدی همانند سیلندرها، صفحه‌ها و غیره دیده می‌شود. این سیستم نسبتاً پایدار گردابه دو ردیفی یا خیابان گردابه نامیده می‌شود. هر دو طرف جسم به طور متناوب و جایگزین گردابه مستقیم رها می‌سازند. خیابان مذکور به سمت بالا و پایین حرکت می‌کند و نقشی مانند آنچه در شکل زیر دیده می‌شود ایجاد می‌نماید.

^۱Vortex Street



(الف)



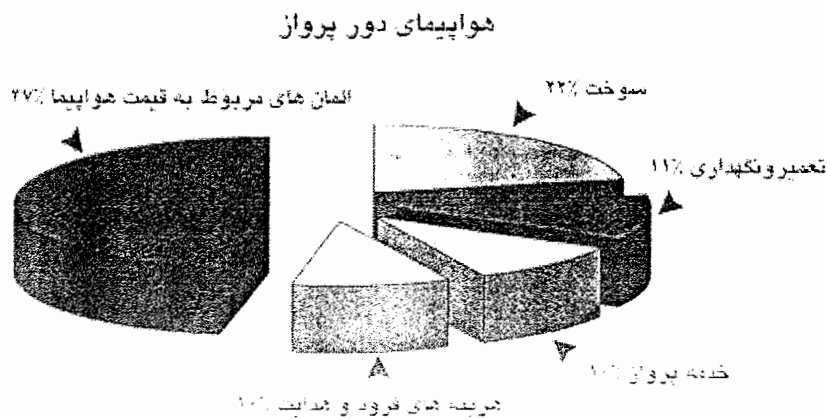
(ب)

شکل ۱-۱۱: (الف) خیابان گردابه ناشی از یک استوانه در جریان سیال

(ب) خیابان گردابه شکل گرفته در ابرها (جریان گذرنده از یک جزیره) [۳۶]

۳-۱: پسا در هواپیما

شکل ۱۲-۱ تفکیک هزینه های عملیاتی مستقیم را برای یک هواپیمای ترابری دوربرد نشان می دهد. کاهش پسا به طور مستقیم با مصرف سوخت که در حدود ۲۵٪ از هزینه های مستقیم عملیاتی^۱ را شامل می شود، نسبت دارد. باید توجه داشت که فن آوریهای مورد استفاده در کاهش پسا نباید وزن هواپیما را به طور ملموسی افزایش دهند یا به علت افزایش پیچیدگی قیمت هواپیما را با ایجاد دستورالعمل های جدید و هزینه های تعمیر و نگهداری بالا برند.



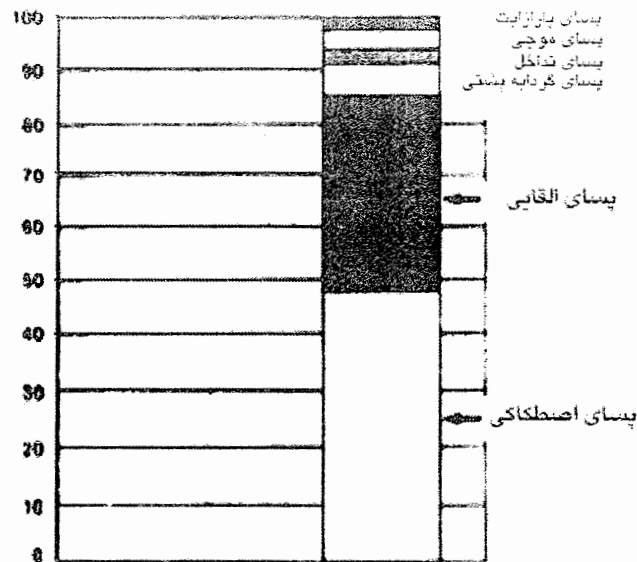
شکل ۱۲-۱: هزینه های مستقیم عملیاتی یک هواپیمای دور برد [۴]

۱-۳-۱: تفکیک پسا

شکل ۱۳-۱ تفکیک پسای یک هواپیمای ترابری را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می کنید، پسای اصطکاک پوسته ای^۲ به همراه پسای القایی بیش از ۸۰٪ از پسای کلی و سایر مولفه های پسا حدود ۲۰٪ را شامل می شوند که البته قابل صرف نظر هم نیستند.

^۱ Direct Operating Costs
^۲ Skin Friction Drag

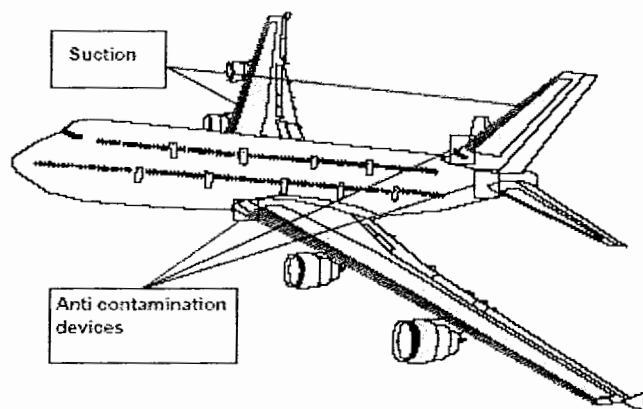
۱۳-۱ پيسای کلی



شکل ۱-۱۳: تفکیک پيسای یک هواپیمای بزرگ [۴]

۱-۳-۲: فن آوری جریان آرام طبیعی و هایبرید

در هواپیماهای کوچک با زاویه بال نسبت به بدنه کم^۱ در روش جریان آرام طبیعی^۲ جریان آرام با شکل دادن برآزا قابل حصول است، اما در اعداد رینولدز زیاد و زاویه بال زیاد در یک هواپیمای حمل و نقل بزرگ، مکش باید اعمال شود.



شکل ۱-۱۴: شماتیک اعمال سیستم مکش در بویینگ ۷۴۷، [۵]

^۱ Low Swept Wing
^۲ Natural Laminar Flow

در روش جریان آرام هایبرید^۱، با اعمال مکش در ناحیه لبه حمله، جریان آرام ثبات می یابد تا بدینوسیله گسترش جریان عرضی^۲ و ناپایداری شلختینگ مرکب با گرادیان فشار در ناحیه جعبه اسپار^۳ کنترل شود.

در این روش ابتدا باید اطمینان حاصل کرد که خط اتصال به طور یکنواخت باقی بماند. وسایل جلوگیری از آلودگی باید مورد استفاده قرار گیرند تا از آلودگی خط اتصال بوسیله جریان مغشوش ناشی از بدنه جلوگیری شود. آزمایشات نشان می دهند که نتایج زمانی موثرتر خواهند بود که هر دو روش فعال (مانند مکش) و غیر فعال (مانند ریبلتها) با هم استفاده شوند.

این تاثیر به حدی است که حتی می تواند از شروع مرحله گذار^۴ در طول پرواز جلوگیری نماید. قسمتهای اصلی یک سیستم مکش شامل صفحه تیتانیومی سوراخ کاری شده با لیزر و محفظه های مکش قابل کنترل بوسیله مجراهای مستقل می باشند. مشکلات سطحی مانند زبری سطح، فاصله ها، پله و موج ها می توانند ورود زودرس به مرحله گذار را موجب شوند. با یکنواخت سازی^۵ سکان عمودی، صفحه افقی دم و پوسته موتور ها، کاهش پسای کلی تا ۱۱٪ می رسد. برای یک هواپیمایی بزرگ که بر مبنای HLF^۶ طراحی و ساخته شده کاهش مصرف سوخت تا ۱۵٪ هم امکان پذیر است. پیشرفت های اخیر در فهم مختصات مرحله گذار در جریان حول یک بال مایل^۷ این اجازه را می دهد که مرحله گذار را با روش های غیر فعال کنترل کنیم. بعضی آزمایش ها نشان می دهند ورود به مرحله گذار ناشی از ناپایداری های جریان عرضی بوسیله استفاده از زبری مصنوعی به تعویق می افتد.

^۱ Hybrid Laminar Flow

^۲ Cross Flow

^۳ Spar Box

^۴ Transition

^۵ Laminarisation

^۶ Hybrid Laminar Flow

^۷ Swept-Wing

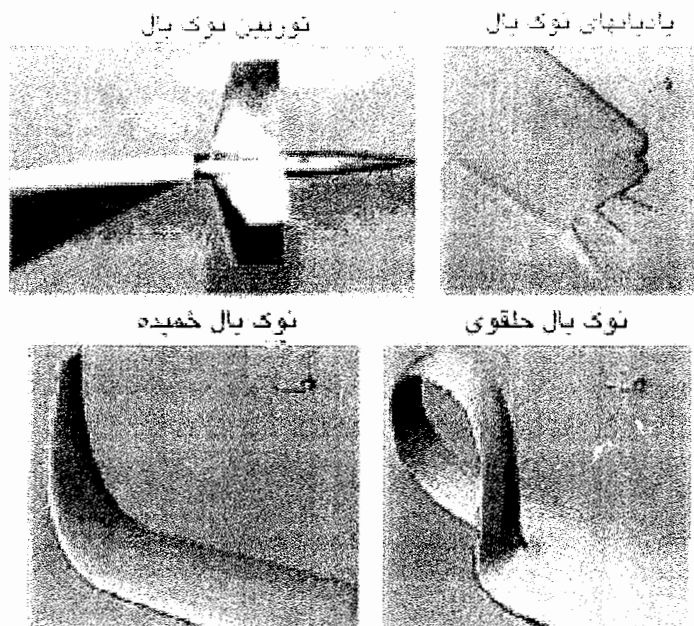
۳-۳-۱: کاهش پسای حاصل از تولید برآ

دومین بخش قابل ملاحظه از پسا، قسمتی است که در حین تولید برآ زاده می شود. روش کلاسیک کاهش این نوع پسا، افزایش ضریب منظری بال است. این روش در گذشته انجام گرفته و ضریب منظری بال ایر باس $A340$ به $9/3$ رسیده است اما افزایش ضریب منظری بین آیرودینامیک و خصوصیات ساختمانی هواپیما محدود می شود و مسلماً نمی توان آن را بیش از اندازه افزایش داد. روش جایگزینی استفاده از تمهیدات نوک بال^۱ است که روی گردابه های نوک بال یعنی سرچشمه های پسای حاصل از تولید برآ، تاثیر می گذارند.

تعداد زیادی از این وسایل تا کنون مورد آزمایش قرار گرفته اند. حلال های حجمی سیال^۲ امکان پیش بینی دقیق کاهش پسا را ایجاد نموده اند. مطالعات پایه نشان می دهند که کاهش پسا با تغییر هندسه سطح در یک طول کوچک از بال قابل حصول است. شکل ۱-۱۵ نمونه هایی از طرح های تحقیق شده را نشان می دهد. برای مثال توربین نوک بال، نوک بال خمیده و نوک بال حلقوی را می توان نام برد.

نوع نوک بال حلقوی^۳ به علت شکل پیچیده ای که دارد قابلیت تنظیم خوبی ندارد لذا زیاد متداول نیست. باکمی دقت مشاهده می کنید که این نوع، ترکیبی از نوک بال عمودی و نوک بال خمیده است.

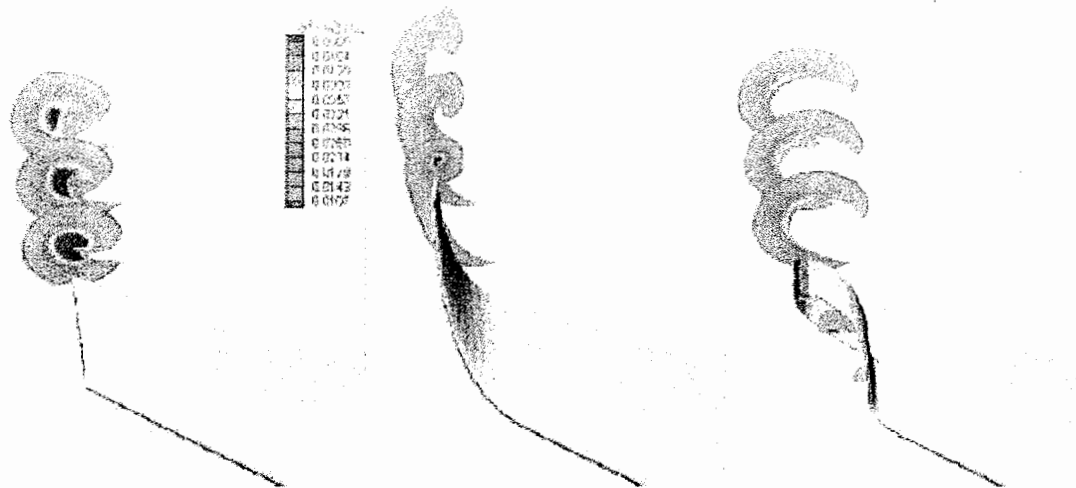
^۱ Wing tip devices
^۲ CFD Software
^۳ Spiroid Winglet



شکل ۱-۱۵: وسایل نوک بیل متفاوت [۵]

شدت گردابه های نوک بیل به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. پسای حاصل از تولید برآ، برای نوک بیل خمیده با ارتفاع معادل 6% اسپین^۱ مرکزی بیل در حدود 4% کاهش و برای نوک بیل حلقوی با حلقه ای به ارتفاع $3/8\%$ از اسپین مرکزی بیل حدود $3/3\%$ کاهش نشان می دهد. اما باید دقت داشت که یک سطح تر شده بزرگتر می تواند باعث ایجاد پسای لزجی بیشتر شود و در نهایت مقدار پسای کلی در تناقض بین کاهش پسای حاصل از تمهیدات نوک بیل و افزایش پسای حاصل از اصطکاک تعدیل می شود. در ضمن تغییرات در گشتاور خمشی ریشه بیل که به علت تغییر در جرم ساختار بیل حاصل می شود باید در مراحل طراحی مد نظر قرار گیرد.

^۱ Span



شکل ۱-۱۶: انرژی جنبشی جریان عرضی در پایین دست نوک بال [۵]

اما برای کاربرد های صنعتی تهمیدات نوک بال تاثیر بسیار زیادی بر ساختار بال دارند و تاثیرات آئروالاستیک باید طی مراحل بهسازی بال مورد توجه قرار گیرد.

۱-۳-۴: مولد های گردابه زیر لایه^۱

کنترل جدایش لایه مرزی در شرایط بعد از طراحی، بوسیله مولد گردابه در زیر لایه منجر به افزایش بازده هواپیمایی می شود. مولد های گردابه بر روی یک برآزای فوق بحرانی درتونل باد آزمایش شده اند.

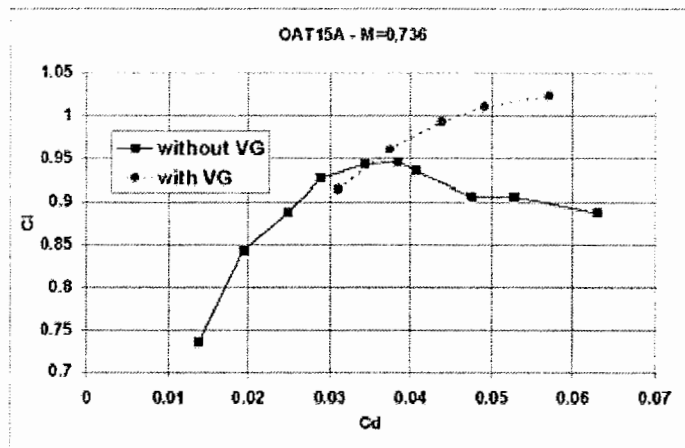
مولدهای انتخاب شده از نوع هم چرخشی^۲ با شکل مستطیل و با زاویه حمله ۳۰ درجه انتخاب شده و در بالا دست ضربه^۳ نصب شده اند و ارتفاع آنها $\frac{H}{S} = 1$ می باشد که S ضخامت لایه مرزی می باشد. اما در مطالعات اخیر مشاهده گردیده است که مولدهای گردابه با ارتفاع 0.12 ضخامت لایه مرزی و زاویه حمله ای معادل ۲۰ درجه نتایج مشابهی حاصل می کند.

^۱ Sub-layer vortex generators

^۲ Co - rotating

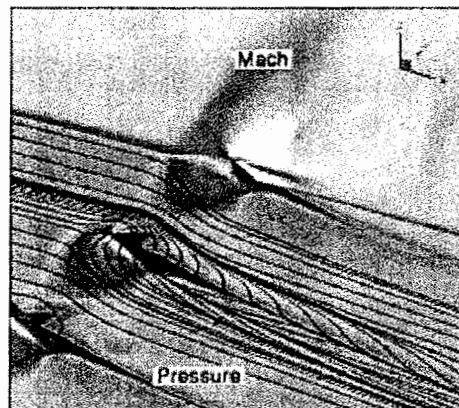
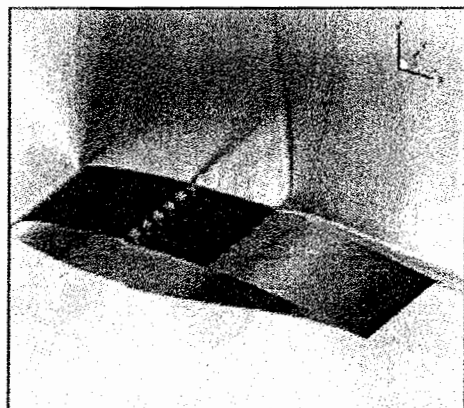
^۳ Shock

اندازه گیری ها در ماخ $M = 0.7$ و عدد رینولدز $Re = 4/5 \times 10^5$ انجام گرفت. نتایج تجربی (شکل ۱۷-۱) در ضرایب برای زیاد تاثیر بسزای مولد های گردابه را نشان می دهد. نوسانات فشار و ضربه به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.



شکل ۱- ۱۷: تاثیر مولدگردابه بر ضرایب پسا و برآ [۵]

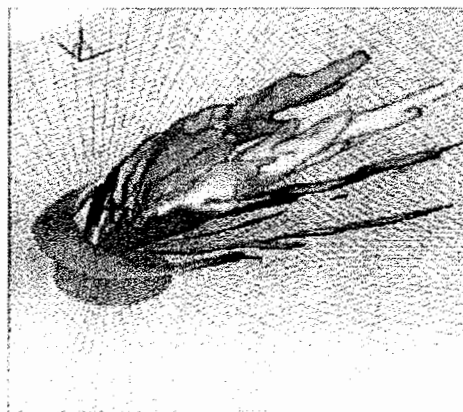
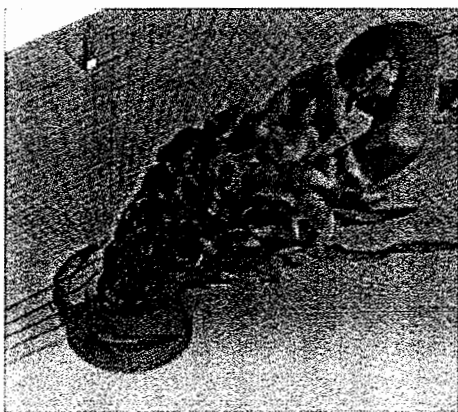
این نتایج نشان می دهد که بهسازی زیادی در جریان با استفاده از مدل های گردابه ای در لایه مرزی زیرین قابل حصول است.



شکل ۱- ۱۸: پروفیل جریان حاصل از حلال CFD حول مولدهای گردابه [۵]

۱-۳-۵: فن آوری MEMS^۱

بوسیله یک سیستم فعال به دور از معایب مولدهای گردابه که ضریب پسا را به ازای ضرایب برای کم افزایش می دهند، کاهش نواحی جدایش لایه مرزی امکان پذیر است. فن آوریهای MEMS برای کنترل جریان در میان ساختارهای متعدد و جریان نزدیک دیواره لایه مرزی قابل استفاده هستند. استفاده از عملگرهای سیالاتی مانند وسایل دمش و مکش بسیار مورد بررسی قرار گرفته است اما این روش ها هنوز پخته نیستند و گسترش این فن آوری های جدید می تواند با بهره گیری از تحلیلگرهای رایانه ای سیال سرعت بیشتری پیدا کند.



شکل ۱-۱۹: تاثیر یک جت مصنوعی بر جریان اصلی [۵]

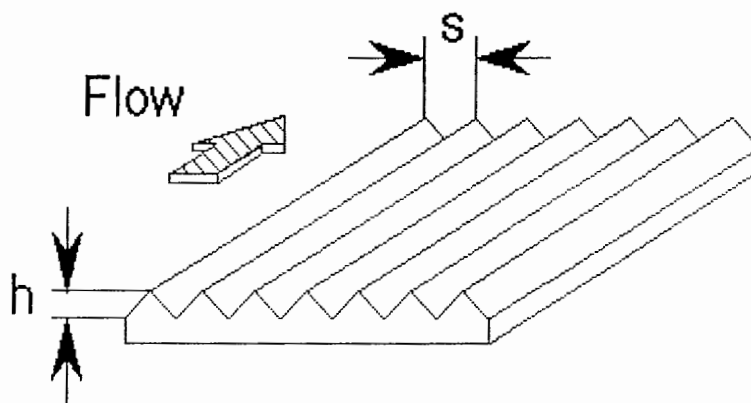
به عنوان مثال شکل ۱-۱۹ شبیه سازیهای تراکم پذیر و سه بعدی از تداخل یک جت مصنوعی و لایه مرزی مغشوش که با روش LES و توسط نرم افزار تحلیلگر رایانه ای انجام شده را نشان می دهد.

^۱ Micro Electro- Mechanical system

گردابه ها که باعث ایجاد اغتشاش در پایین دست می شوند می توانند بر روی جدایش تاثیر داشته باشند. چنین نتایجی در فهمیدن و مدل کردن مکانیزم های کنترل کمک می کنند و واضح است که قدم بعدی محاسبه عقب افتادن زمان جدایش است.

۱-۳-۶: کاهش پسای لزج بوسیله ریبلتها

در دو دهه گذشته فعالیت های تحقیقی قابل ملاحظه ای بر روی استفاده از ریبلت ها انجام گرفته است. ریبلت ها که شیارهای ریز ایجاد شده بر روی سطح در جهت جریان آزاد (شکل ۱-۲۰) هستند، بارها مورد آزمایش قرار گرفته اند و نتایج به اندازه ای قابل اتکا بوده که در شرایط پروازی هم امتحان شده اند.



شکل ۱-۲۰: شماتیک ریبلت ها در جریان [۶]

ریبلت هایی با شیار ۷ شکل متقارن (دارای ارتفاعی معادل فواصلشان) به طور گسترده ای توسط شرکت های آمریکایی مورد استفاده قرار گرفته اند. کاهش پسایی بین ۴ تا ۸ درصد حاصل گردیده

است. برای حالت‌هایی که گرادیان فشار صفر است تاثیر ریبلتها در نزدیکی دیواره ($\gamma^+ < 70$) بیشتر است.

با وجود تمام تحقیقات به عمل آمده در ۱۵ سال گذشته هنوز جواب علمی و دقیقی برای نحوه عملکرد ریبلتها در کاهش تنش برشی دیواره ارائه نگردیده است. مکانیزم های مختلفی پیشنهاد شده اند که از آن‌ها میتوان به موارد زیر اشاره کرد :

- تضعیف فرایند ترکیدن^۱ در نزدیکی دیواره
- به تاخیر انداختن قابل ملاحظه جریان در محدوده بین شیارها به علت افزایش سطح تماس سیال لزج
- افزایش ضخامت زیر لایه
- جلوگیری از حرکت عرضی^۲ گردابه ها

به نظر می رسد، تمام موارد فوق در تغییر تنش برشی دیواره موثر هستند. به موارد ذکر شده می توان کاهش شدت اغتشاش و تنش برشی رینولدز را نیز افزود. به علت ابعاد بسیار کوچک شیارها اندازه گیری در نزدیکی دیواره بسیار مشکل است. در سالهای اخیر اندازه گیری سرعت متوسط و مشخصه های توربولانسی جریان داخل شیارها با استفاده از ریبلت‌های مخصوص که دارای ابعاد بزرگتری می باشند امکانپذیر گردیده است. این نتایج نشان می دهند که تنش برشی دیواره در نوک شیارها افزایش یافته و به طور قابل ملاحظه ای در دامنه ها کاهش می یابد. تاثیر ریبلتها بر برآزا های فوق بحرانی^۳ بسیار اندک است.

^۱ Bursting Process
^۲ Span wise Motion
^۳ Super critical airfoil

۱-۳-۷: مقایسه روش های کاهش پسا در هواپیما ها

روش های گونا گون که مورد بررسی قرار گرفته اند در ذیل لیست شده اند :

- کاهش اصطکاک پوسته ای مغشوش بوسیله ریبلیت ها ۱ تا ۲ درصد
- فن آوری جریان آرام هایپرید ۱۰٪
- نوک بال های اصلاح شده ۲٪
- کنترل ضربه و وسایل لبه فرار که قابلیت تطابق با شرایط پروازی را به بال می دهند ۱٪

مولد های گردابه زیر لایه و فن آوریهای MEMS که می توانند از جدایش جریان جلوگیری کنند. این فن آوریها برای کاهش بشتر پسا قابل استفاده هستند. هواپیما های جریان آرام آینده می توانند برای مثال به تهمیدات نوک بال و ریبلیت های نصب شده در قسمت عقب و بالای بال مجهز شوند.

استفاده از کنترل جریان، پیچیدگی سیستم را کاهش می دهد و وزن ساختمان هواپیما را با بهره جستن از بال کوچکتر، کاهش می دهد.

تمام فن آوریهای ذکر شده اگر در مراحل طراحی هواپیمایی لحاظ شوند نسبت به بعد از ساخت آن، می توانند تاثیر بسیار بیشتری داشته باشند.

۴-۱: پسا در کشتی

تمام کشتیهای بزرگ خود را با اتکا به نیروی شناوری^۱ بر روی آب نگه می دارند. خصوصیات انواع بدنه کشتی ها^۲، در تولید نیروی پسا به طور دقیق در کتابهای راهنما آمده است. بنابراین در این مبحث تنها به اصول پایه ای پرداخته می شود تا یک دیدگاه مناسب نسبت به اجزای پسای کلی کشتی ها و اهمیت هر جزء برای خواننده ایجاد شود. همانطور که در ادامه خواهیم دید تاثیر پسای ناشی از لزجت مهمتر از پسای ناشی از امواج^۳ است. ابعاد و مشخصه های مورد استفاده در زیر آورده شده اند:

$\frac{l}{b}$ نسبت طول به دهانه^۴ (روی خط آب)

$\frac{b}{h}$ نسبت دهانه به عمق (از خط آب تا کف بدنه)

$C_{pris} = \frac{\nabla}{l.S}$ ضریب پریسماتیک^۵

$C_{\nabla} = \frac{\nabla}{l^3}$ ضریب حجمی

$\frac{S}{l^2}$ نسبت سطح تر شده

که در آنها:

l طول خط آب

$\nabla = \frac{w}{\gamma}$ حجم آب جابجا شده

S حداکثر سطح مقطع غوطه ور

S سطح تر شده

^۱ Buoyancy Force
^۲ Ship Hulls
^۳ Wave Drag
^۴ Water Line
^۵ Prismatic Coefficient

در بررسی مقاومت یا پسای کشتیها به دو طریق عمل می شود :

الف) ارائه نسبت پسا " D " به وزن " W " که W وزن آب جا به جا شده توسط کشتی است. این نسبت برای محاسبات مهندسی بسیار مفید است.

ب) ضریبی بر مبنای فشار دینامیکی $(q = 0.5 \times \rho \cdot V^2)$ و سطح تر شده بدنه کشتی. این ضریب برای ارائه مولفه های اصطکاکی یا لزجتی مقاومت مناسب تر است.

$$C_{D, wet} = \frac{D}{(q \cdot S)} = 2 \cdot (D/w) \cdot \left(\frac{V}{L^2} \right) / \left(F_l^2 \cdot \left(\frac{S}{L^2} \right) \right)$$

نسبت پسا به وزن از رابطه زیر به دست می آید :

$$D/w = \frac{1}{2} \cdot C_{D, wet} \cdot F_l^2 \cdot \left(\frac{S}{L^2} \right) / \left(\frac{V}{L^2} \right)$$

۱-۴-۱ : پسای ناشی از اصطکاک

پسای اصطکاک پوسته ای معمولا در کشتیهای بزرگ نقش اصلی را ایفا می کند. برای مثال در کشتیهای اقیانوس پیما معادل ۷۵٪ از کل مقاومت را شامل می شود. در کشتیهای تانکر و نفت کش ها این رقم تا ۹۵٪ (برای اعداد فرود کمتر از ۰/۱۵) می رسد. مناسبترین فرمول بندی برای پسای اصطکاک پوسته ای به عنوان تابع عدد رینولدز روابط " خط شونهر^۱ " است.

$$\log(R_l \cdot C_f) = \frac{0.724}{\sqrt{C_f}}$$

این رابطه تا مقادیر بسیار زیاد رینولدز برای کشتیها پاسخگو است. شکل دیگر این معادله که با تخمین ۲٪ اخیرا ارائه گردیده به شکل زیر است :

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = 3.46 \times \log R_l - 0.6$$

^۱ Schoenherr Line

۱-۴-۲: بهینه سازی شکل بدنه و سطح کشتی

اثر ضخامت دیواره

جدایش جریان بعد از بدنه با استفاده از اشکال خط جریان قابل پرهیز است. همانطور که می دانیم پسای بدنه ها با افزایش نسبت قطر به طول، به علت افزایش اتلاف اندازه حرکت سیال در لایه مرزی افزایش می یابد. برای مطالعه بیشتر و دستیابی به فرمول های دقیق تر به مرجع [۱] مراجعه کنید.

۱-۴-۳: زبری سطح

ممکن است گوناگونی بی پایانی در اندازه دانه ها، شکل دانه ها و تمرکز آنها داشته باشد. یک نوع که بسیار مورد توجه قرار گرفته نوع " زبری ماسه ای"^۱ است. در این روش دانه های شن با قطری یکسان و تمرکز یکنواخت بر روی کل سطح چسبانده می شوند. در این حالت پارامتر تعیین کننده تنها قطر دانه ها (k) خواهد بود.

پسای حاصل از یک سطح زبر در یک جریان مماسی ممکن است کاملاً لزج نباشد. در پشت هر برجستگی به اندازه کافی بزرگ، جریان امکان جدایش دارد و پسای منتهی تا قسمتی فشاری خواهد بود. توزیع سرعت در خارج لایه مرزی همان حالت عادی را دارد و تاثیر زبری سطح تنها در زیر لایه محسوس است که زبری ممکن است جایگزین لزجت فرض شود. پسای حاصل از زبری سطح را پسای پوسته^۲ می نامند. اثبات شده که بدنه های تمیز دارای رنگ متداول دریایی، در سرعتهایی حدود ۴ نات^۳ به شدت زبر می شوند (تاثیر زبری را نشان می دهند). پیچ و مهره ها، همپوشانی ها، جوشها و پرچ ها در سطح کشتی (تاثیرات همه آنها برآورد شده و در کتابهای راهنما موجود است) نیز می توانند به عنوان زبری هایی با تمرکز کم در نظر گرفته شوند. از آنجائیکه با پیشرفت فن آوری سطوح صیقلی تری نیز قابل تولید می باشند، لذا مقدار نهایی برای پسای اصطکاک پوسته قابل برآورد نیست.

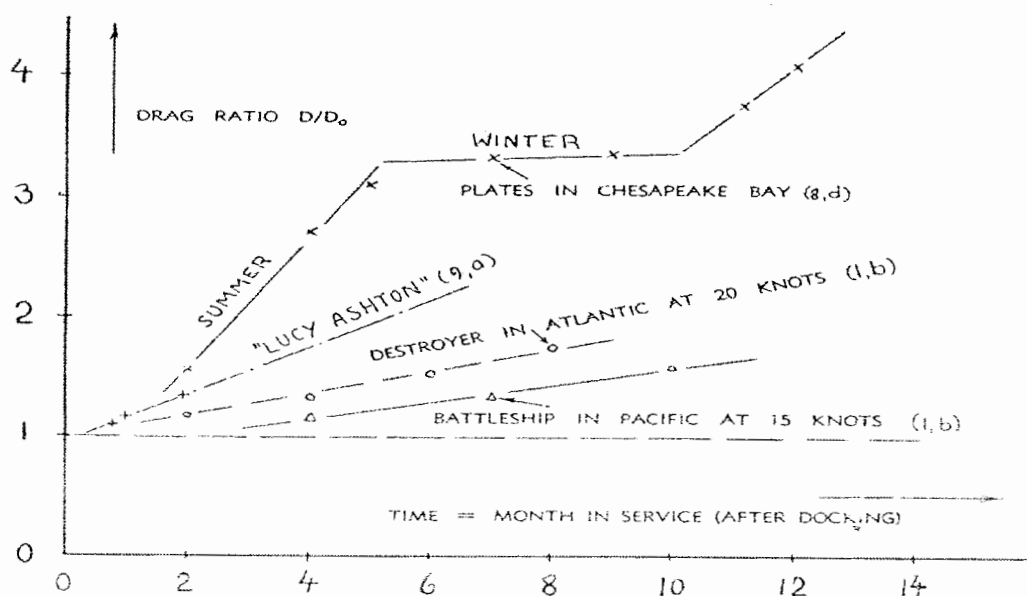
^۱ Sand Roughness

^۲ Skin Drag

^۳ Knot

۴-۴-۱: آلودگی زیست محیطی سطح^۱

بررسی زبری در سطوح کشتی ها از این هم فراتر می رود. رویش گیاهان دریایی بر بدنه کشتیها بدنه را از نظر دینامیک سیالات در مدت کوتاهی زبر می نماید. برای دست یافتن به یک مقیاس خوب از تاثیر این پدیده می توانید به شکل ۱-۲۱ مراجعه نمایید. در نمودار مربوطه اطلاعات آماری پسای مربوط به چندین کشتی در سرعت های معین نسبت به مدت سپری شده از زمان تمیز کاری و رنگ آمیزی^۲ سطح آنها ارائه گردیده است.



شکل ۱-۲۱: افزایش مقاومت کلی کشتی بر اثر آلودگی زیستی سطح [۱]

دیده می شود که پس از یک سال خدمت، پسای کلی (به طور عمده اصطکاکی در سرعت های عادی) کشتیهای نیروی دریایی تا دو برابر امکان افزایش دارد. به عنوان یک پدیده زیست محیطی، آلودگی زیستی سطح، به طور جدی به شرایط محیطی بستگی دارد، مانند بنادر و محل های لنگر اندازی.

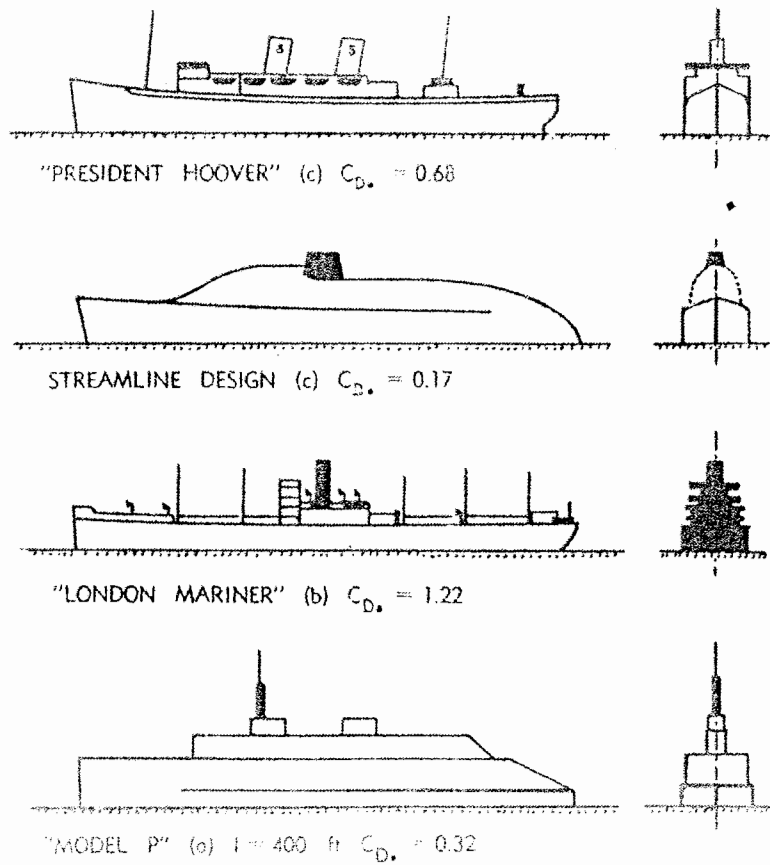
^۱ Fouling
^۲ Docking

شکل ۱-۲۱ در اثبات این نظر نشان می دهد که در حالت سکون آلودگی زیست محیطی شدت می گیرد، در طول زمستان روند آلوده شدن متوقف می شود در حالی که در طول تابستان نرخ آلودگی افزایش قابل توجهی می یابد. به عنوان یک نتیجه نهایی اینکه ضریب پسای کشتی ها هرگز ثابت نیست. بررسی پسای حاصل از تجهیزات و وسایل کشتی که با جریان سیال درگیر هستند، در این مکتوب نمی گنجد لذا با مراجعه به مرجع [۱] می توانید به اطلاعات مناسبی دست یابید.

۱-۴-۵: مقاومت هوا

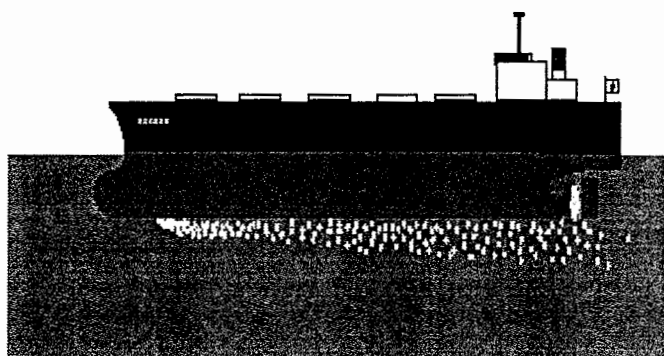
با در نظر گرفتن نسبت چگالی جرمی آب نسبت به هوا که در حدود ۸۴۰ است، ممکن است مقاومت هوایی بدنه و ساختارهای روی کشتی زیاد مهم به نظر نرسد. به علت شکل چند ضلعی و سطح مقطع تقریباً مستطیلی که سازه های روی کشتی دارند در مواجهه با باد و فشار دینامیکی که با مجذور مجموع سرعت کشتی و باد مخالف متناسب است، پسای آیرودینامیکی می تواند به بخش مهمی از مقاومت در برابر حرکت کشتی بدل شود. شکل ۱-۲۲ تعدادی از نمونه های ضریب پسای آیرودینامیکی (بر مبنای سطح جلویی کشتی در بالای خط آب) که بوسیله آزمایش در تونل باد حاصل شده اند را نشان می دهد.

با در نظر گرفتن باد نسبی مولفه پسا در جهت حرکت بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش می یابد. این شکل همچنین تاثیر استریم لاین کردن بدنه ها را نشان می دهد. با محاسبات انجام شده پسای آیرودینامیکی کشتی ها تا ۱۲٪ از کل پسا را می تواند شامل شود که با بهینه سازی شکل بدنه حداقل می توان نصف آن را حذف کرد.



شکل ۱-۲۲: مقاومت آیرودینامیکی چند نمونه کشتی [۱]

این تحقیق نشان داد که کاهش در نیروی برشی روی دیواره قابل حصول است به شرطی که در حین تزریق سرعت سیال تزریقی با سرعت جریان خارجی و آزاد سیال و متناسب با خصوصیات سطح متخلخل کنترل شود. وزش یکنواخت جریان تزریقی بسیار مهم است زیرا عدم یکنواختی می‌تواند موجب اغتشاش در جریان تزریقی و گذرنده از سطح شود. نحوه تزریق در شکل ۱-۲۳ نشان داده شده است :



شکل ۱-۲۳: شماتیک تزریق حباب ها

سرعت خارجی در همه محاسبات، $V = 0.9 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری ها در دو حالت قبل و بعد از تزریق انجام گرفته‌اند. اما در نهایت جدول ارائه شده از نیروهای برشی به خوبی کاهش این نیروها را پس از اعمال تزریق در سطح جامد نشان می‌دهد. توضیح کامل تر در مورد تداخل جریان‌ها و تغییرات فشاری در مراجع [۷] و [۸] قابل بررسی است.

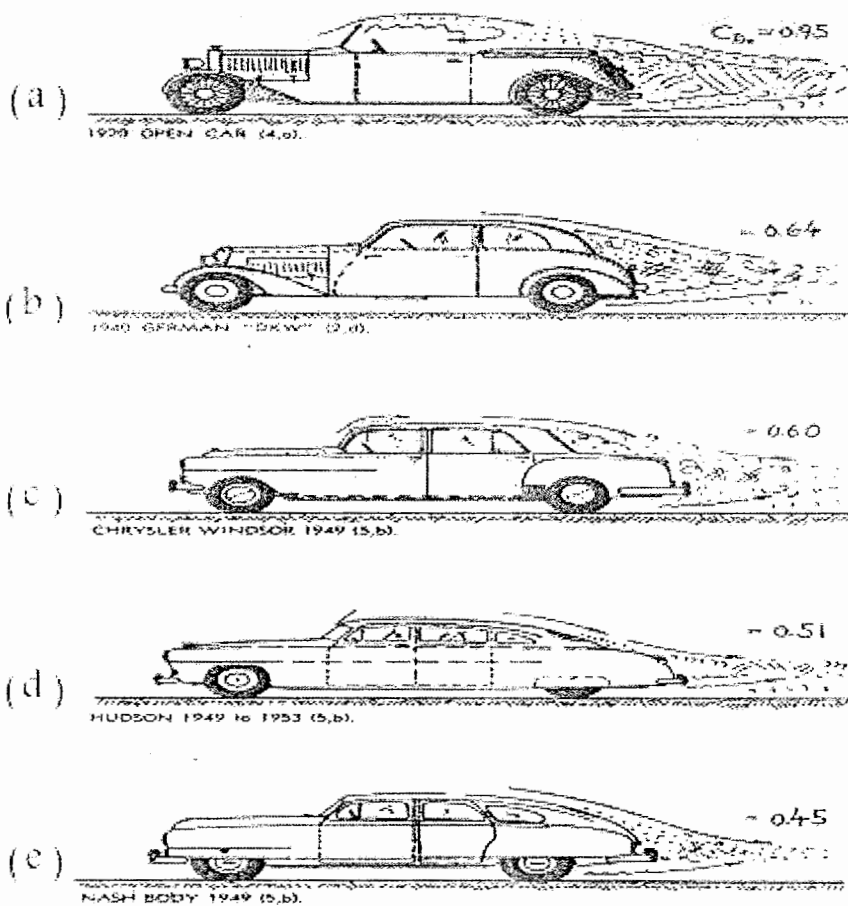
۱-۵: پسا در خودروها

مقاومت وسایل نقلیه زمینی در برابر حرکت به دو بخش عمده قابل تفکیک است:

- مقاومت مکانیکی (در چرخها، موتور و نقاط تماس با زمین).
- مقاومت آیرودینامیکی.

۱-۵-۱: پسای اشکال پایه

نتایج بسیار زیادی از آزمایشات تونل باد برای بدست آوردن پسای آیرودینامیکی خودروها موجود است. تعدادی از آنها را در شکل ۱-۲۴ مشاهده می‌نمایید.



شکل ۱-۲۴: نتایج حاصل از آزمایش در تونل باد برای اشکال پایه [۱]

۱-۵-۲: بهینه سازی شکل بدنه

خودرو های متداول که دارای سرعت متوسط ۱۰۰ تا ۱۲۰ کیلومتر در ساعت هستند عدد رینولدز

جریان گذرنده در اطراف آنها از مرتبه ده میلیون میباشد ($R_f = \frac{V \cdot L}{\nu}$) که در آن L طول کلی خودرو

است. ضریب اصطکاک پوسته ای منتهجه (برای لایه مرزی تقریبا مغشوش) به سختی به مقدار

$C_f = 0.003$ می رسد. پسای آیرودینامیکی یک خودرو تقریبا ۱۰ برابر پسای اصطکاک پوسته ای

آن است.

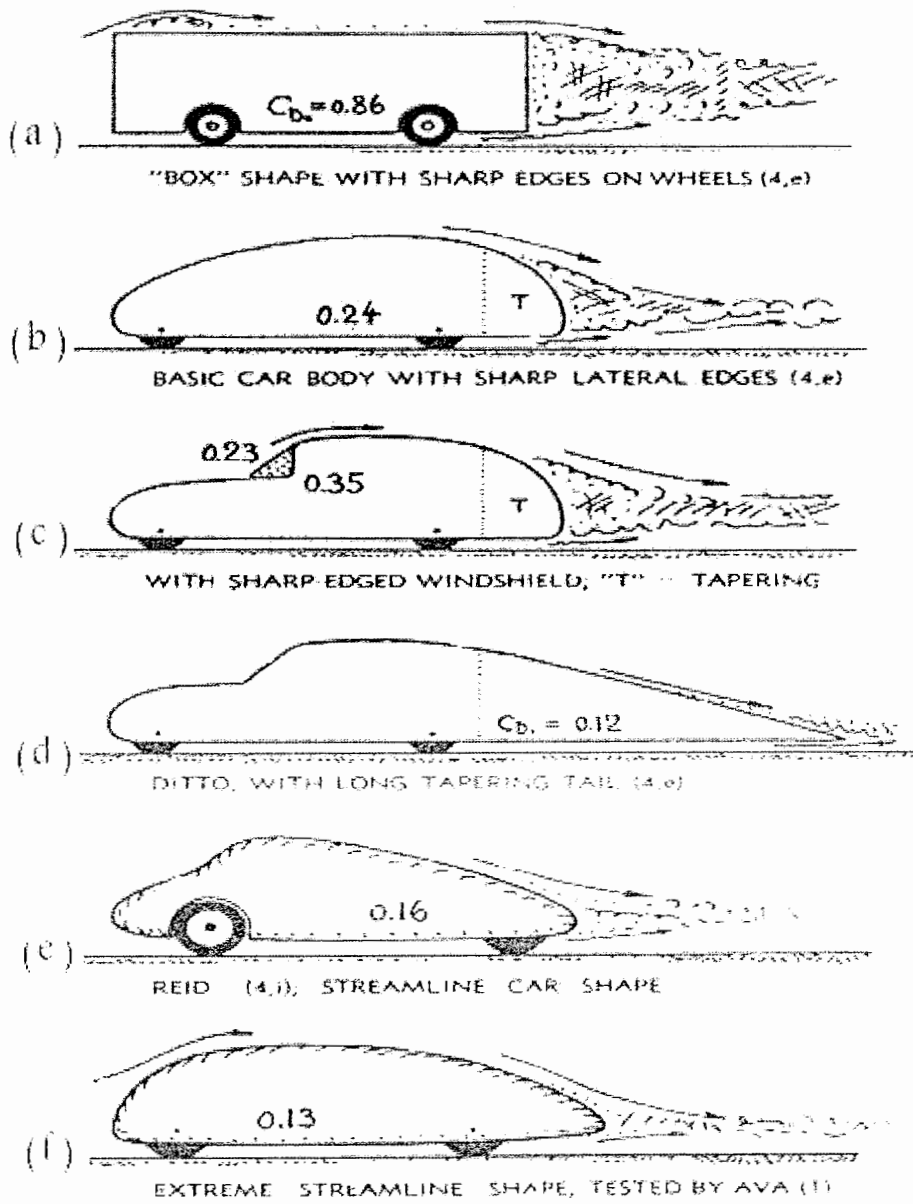
بزرگترین ضرایب پسا در نمونه های بدون سقف (شکل ۱-۲۴) و در انواع کند بسته^۱ (شکل ۱-۲۵)

به چشم می خورند. یک سری سیستماتیک از خودرو های پایه مورد بررسی قرار گرفته اند و نتایج

زیر حاصل گردیده است.

- با گرد کردن ابتدا و انتهای بدنه مقدار ضریب پسا تا $C_D = 0.3$ کاهش می یابد.
- گرد کردن انتها واقعا پسا را کاهش نمی دهد. اضافه کردن یک دنباله زاویه دار^۲، ضریب پسا را تا $C_D = 0.1$ کاهش می دهد.
- گرد کردن لبه های تیز حتی بدون افزودن دنباله ضریب پسا را تا $C_D = 0.13$ کاهش می دهد.

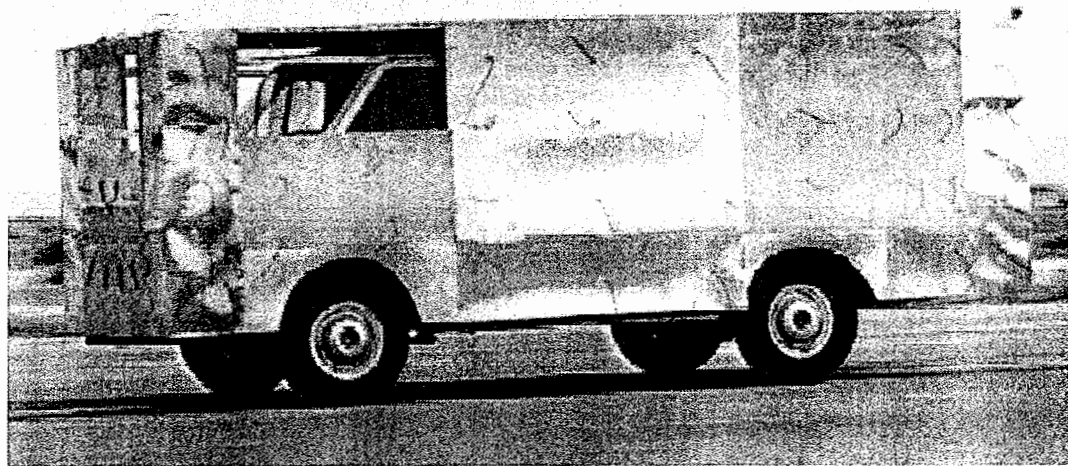
^۱ Blunt Box
^۲ Tapering Tail



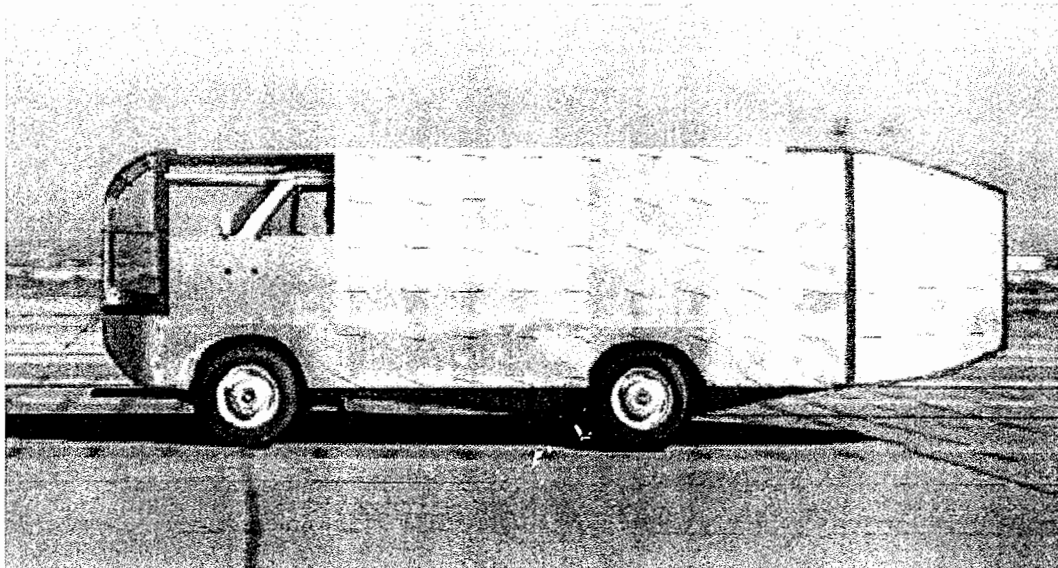
شکل ۱-۲۵: ضرایب پسا ی تعدادی نمونه در تونل باد [۱]

تأثیر اصلاح گوشه ها و استفاده از لبه های گرد شده به حدی زیاد است که دانشمندان ناسا با انجام آزمایش های زمینی بر روی یک نمونه ون از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۶۱، دست یافتن به ضریب پسای ۰/۲۵ را به عنوان هدف نهایی دست یافتنی دانستند. همانطور که در شکل ۱-۲۶ ملاحظه می کنید، گوشه هایی با زاویه تند معرف نمونه های آزمایشی دهه ۵۰ هستند. ضریب پسای این نمونه ها در حدود $Cd = 0.189$ است.

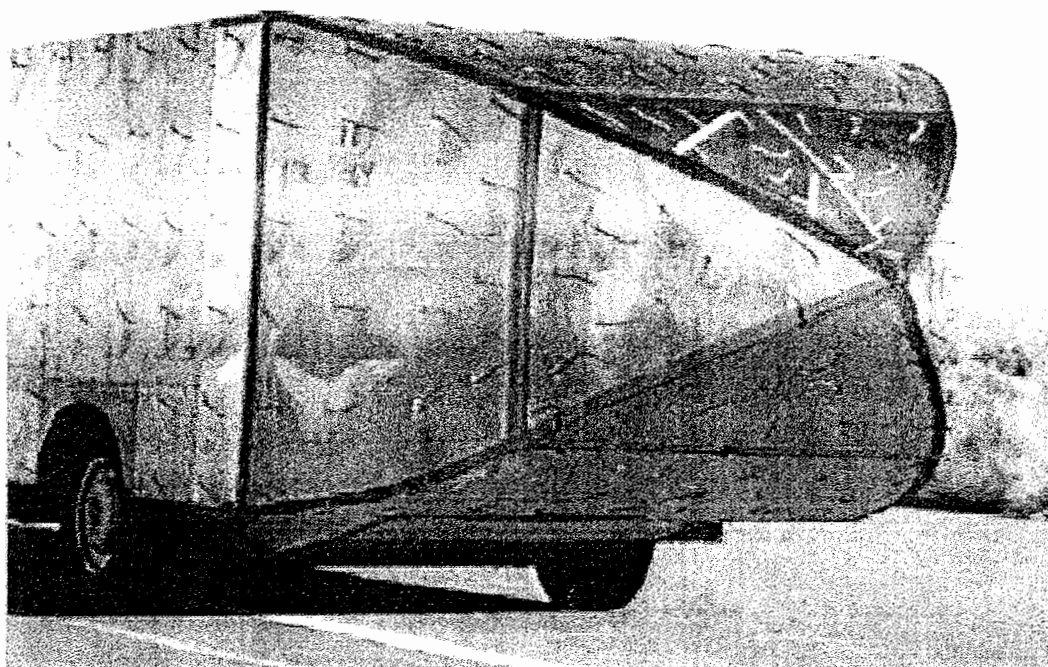
گرد کردن گوشه های تیز عمودی و افقی و صاف کردن سطح زیرین و در قدم نهایی استفاده از صفحات پشتی اصلاح شده دست یابی به ضریب پسای $Cd = 0.242$ را مقدور ساخته است که کاهش ۷۳ درصدی ضریب پسا را نشان می دهد. [۹]



شکل ۱-۲۶: نمونه آزمایشی ناسا دارای گوشه های تیز با ضریب پسای $Cd = 0.189$ ، [۹]



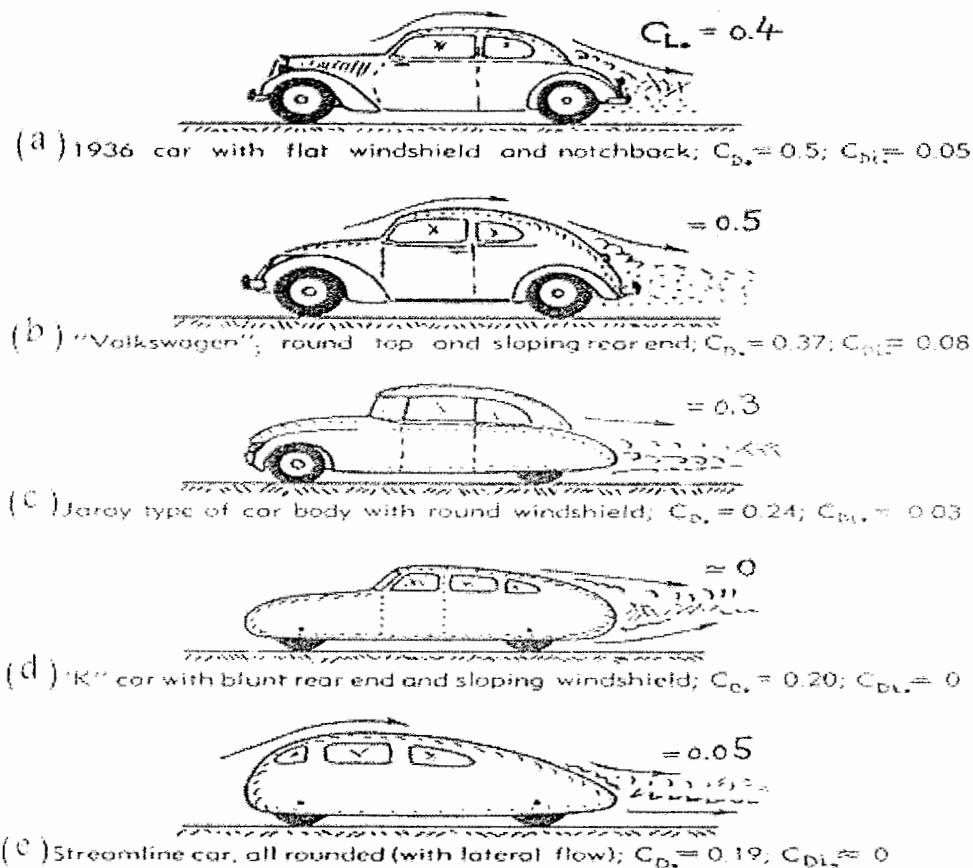
شکل ۱-۲۷: نمونه آزمایشی ناسا با گوشه های گرد شده و صفحات پشتی با ضریب پسای $Cd = 0.1242$



شکل ۱-۲۸: نمونه آزمایشی ناسا مجهز به دنباله مخروطی با ضریب پسای $Cd = 0.1238$ [۹]

۱-۵-۳: برای آیرودینامیکی^۱

از آنجائیکه سطح زیرین خودرو صاف است و سطح رویی خمیده است همچون عملکرد بال، نیروی برآیی در اثر اختلاف فشار ایجاد می گردد (ضریب منظری بسیار کم). دو گردابه ای که در مبحث بال از آنها صحبت شد، در یک جاده خاکی و در پشت خودرو در حال حرکت نیز به وضوح دیده می شوند. بر مبنای سطح جلویی، خودروها دارای ضرایب برآی متفاوتی هستند که در شکل ۱-۲۹ مشاهده می کنید.



شکل ۱-۲۹: ضرایب برآی تعدادی نمونه تونل باد [۱]

^۱ Aerodynamic Lift

برای مثال در خودرو سواری که با سرعت ۸۰ کیلومتر در ساعت حرکت می کند و ضریب برآیی معادل $C_l = 0.4$ دارد نیروی برآیی برابر 30 kg.f ایجاد می گردد. مشاهده می شود که نمونه هایی باسقف کاملاً گرد و با لبه های طولی تیز ضرایب برآیی بیشتری دارند (شکل ۱-۲۹ و b) اما لبه هایی مانند پنجره ها یک اثر مخرب در برآ دارند (شکل ۱-۲۹ و c) و بدنه های واقعاً استریم لاین (شکل ۱-۲۹ و e) نیروی برآیی زیادی ندارند.

۱-۵-۴: پسای القائی

همانطور که می دانیم تولید برآ بدون تولید پسا امکان ندارد. بنابراین با افزایش ضریب برآ، ضریب پسا بسیار افزایش می یابد

$$C_{D_i} = C_l^2 \div \pi$$

برای یک ضریب برآیی معادل $C_l = 0.4$ ضریب پسای القائی معادل $C_{D_i} = 0.05$ اجتناب ناپذیر است.^۱

۱-۵-۵: کاهش پسای آیرودینامیکی خودروها بوسیله مولدهای گردابه

یکی از دلایل اصلی پسای آیرودینامیکی خودروها جدایش جریان هوا در نزدیکی انتهای خودرو است. مولدهای گردابه سپری شکل^۲ بر روی لبه انتهایی سقف خودرو نصب گردیدند تا بدینوسیله جدایش به تعویق افتد.

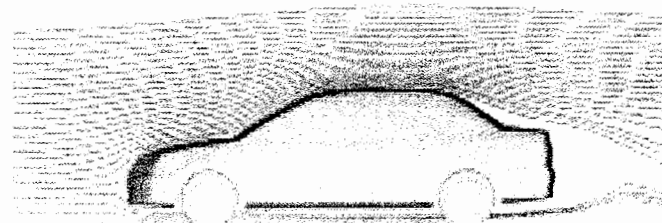
مولدهای گردابه ای که برای هواپیماها مورد استفاده قرار می گیرند خود نیز تولید پسا می نمایند اما تاثیر آنها در کاهش پسای آیرودینامیکی به علت جلوگیری از جدایش جریان قابل ملاحظه است.

^۱ برای مطالعه بیشتر می توانید از مرجع [۱] استفاده کنید.

^۲ Bump-shaped VGs

تاثیر مولدها بستگی به اندازه و شکل آنها دارد، بنابراین برای هر استفاده ای باید به یک اندازه و شکل بهینه دست یافت. نیاز به فضای مناسب برای حمل مسافر و بار طراحی ها را محدود می نماید و شکل آنها را به بدنه بلاف^۱ نزدیک می کند. که جدایش جریان در پشت چنین بدنه ای اجتناب ناپذیر است.

در خودرو های امروزی ضریب پسای بدنه بین ۰/۲ تا ۰/۵ می باشد در حالیکه برای یک بدنه کاملاً بلاف، این رقم ۱ و برای گلوله ها کمتر از ۰/۱ است. عوامل موثر بر ضریب پسای یک بدنه بلاف دو چیز است، یکی گردی گوشه های جلویی جسم و دیگری زاویه ای که پشت بدنه دارد. شکل ۱-۳۰ جریان حول یک خودرو را نشان می دهد.

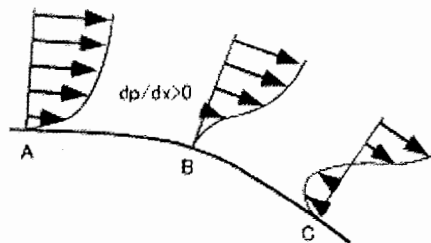


شکل ۱-۳۰: جریان حول یک خودرو سدان [۱۰]

به علت وجود صندوق در پشت ماشین جریان در انتهای سقف جدا شده و به سمت پایین پخش می شود. جریان در دو طرف خودرو مانند جریان حول یک جسم یکنواخت^۲ که انتهای آن زاویه دار شده عمل می کند. خودروهایی که دارای صندوق هستند نسبت به انواع واگن پسای کمتری تولید می کنند، به عبارت دیگر زاویه انتهایی خودرو به عنوان یک مولفه که جدایش را به تاخیر می اندازد عمل می کند. شکل ۱-۳۱ شماتیکی از پروفیل سرعت جریان در صفحه مرکزی خودرو نزدیک به

^۱ Bluff Body
^۲ Streamlined Shape

انتهای سقف را نشان می دهد. از آنجاییکه به سمت عقب خودرو ارتفاع کاهش می یابد یک جریان انبساط یافته^۱ حاصل می شود.

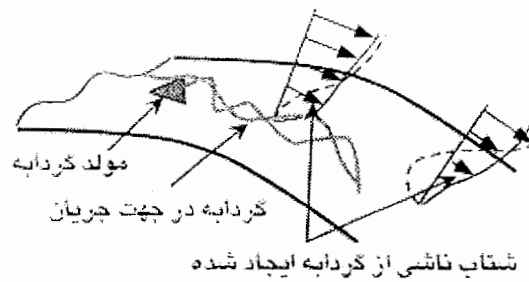


شکل ۱-۳۱: شماتیک پروفیل سرعت روی انتهای سقف [۱۰]

این موضوع باعث افزایش فشار در پایین دست شده، یک نیروی معکوس عمل کننده بر ضد جریان اصلی و در نتیجه جریان معکوس ایجاد می نماید (نقطه C). هیچ جریان معکوسی در نقطه A (بالا دست نقطه C) دیده نمی شود زیرا اندازه حرکت لایه مرزی بر گرادیان فشار ($\frac{dP}{dX}$) می چربد. نقطه B بین نقاط A و C نقطه جدایش جریان است جایی که گرادیان فشار و اندازه حرکت لایه مرزی به تعادل رسیده اند. همانطور که در شکل بالا ملاحظه می کنید، در ناحیه نزدیک سطح خودرو در لایه مرزی جریان هوا با حرکت به سمت پایین دست به علت اثر لزجت، به سرعت اندازه حرکت خود را از دست می دهد.

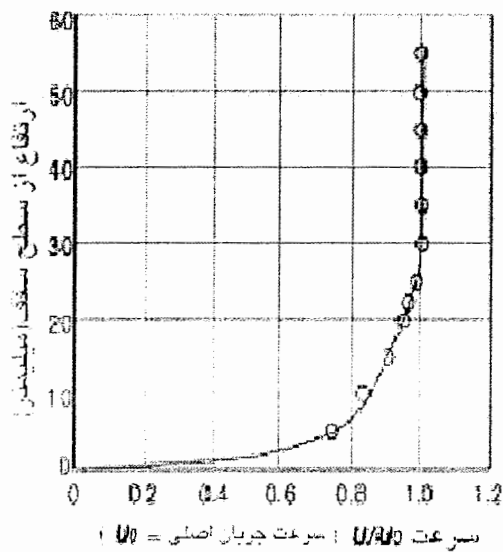
هدف از نصب مولدهای گردابه تامین اندازه حرکت^۲ جریان پایین دست (که دارای مقدار کمتری است) بوسیله تولید گردابه هایی در جهت جریان می باشد، لذا این مولدها باید قبل از محل جدایش جریان نصب شوند (شکل ۱-۳۲). این عمل باعث جا به جا شدن نقطه جدایش جریان به سمت پایین دست می شود.

^۱ Expanded Flow
^۲ Momentum

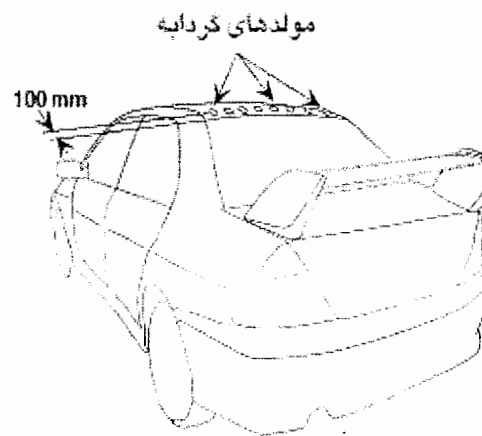


شکل ۳۲-۱: شماتیک جریان حول یک مولد گردابه [۱۰]

شکل ۳۴-۱ پروفیل سرعت را روی سقف و در بالادست لبه انتهایی سقف نشان می دهد.

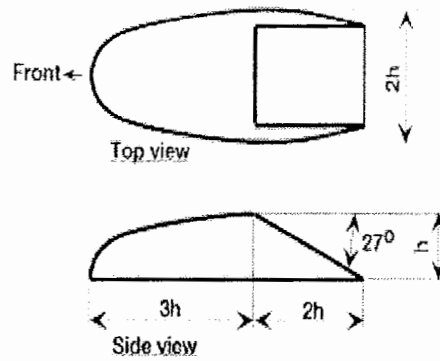
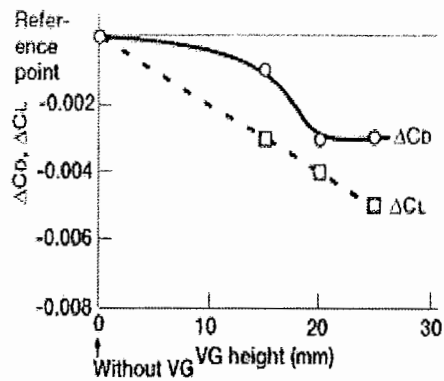


شکل ۳۴-۱: توزیع سرعت روی سقف [۱۰]

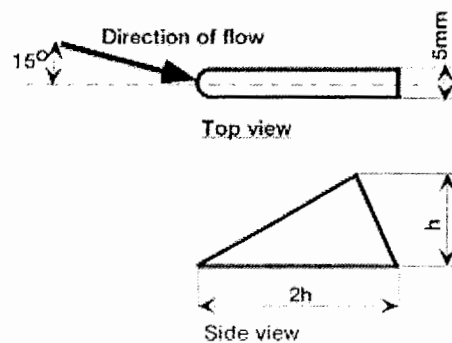
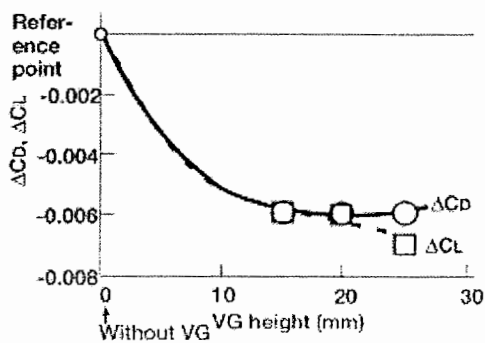


شکل ۳۳-۱: وضعیت قرار گرفتن مولدها [۱۰]

اشکال ۳۵-۱ و ۳۶-۱ دو نوع مولد مختلف و تاثیر آنها را در کاهش ضریب پسا نمایش می دهند.



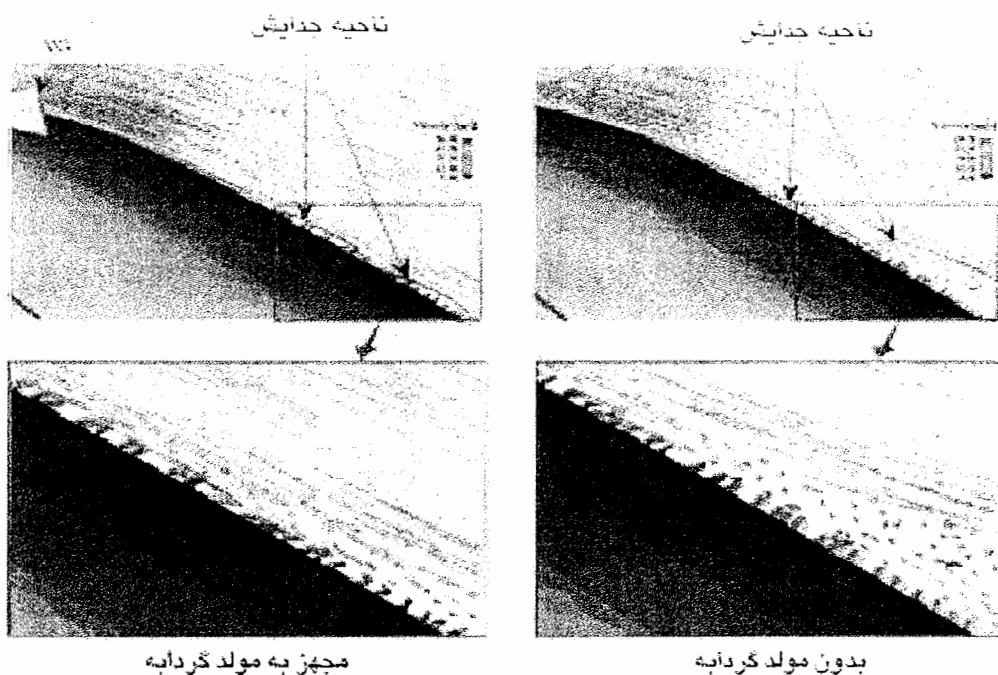
شکل ۱-۳۵: تاثیر مولدهای گردابه از نوع سپری شکل [۱۰]



شکل ۱-۳۶: تاثیر مولدهای گردابه از نوع بال مثلثی شکل [۱۰]

در مولدهای از نوع سپری شکل^۱ قسمت جلویی آنها خمیده شده تا پسای کمتری تولید نماید. مولدهای از نوع بال مثلثی شکل^۲ باید با زاویه نسبت به جریان اصلی نصب شوند تا تاثیر گذار باشند. در شکل ۱-۳۷ نحوه جدایش جریان را که بوسیله نرم افزار Fluent شبیه سازی شده برای هر دو نوع مولد مشاهده می کنید.

^۱ Bump-Shaped VGs
^۲ Delta-Wing VGs



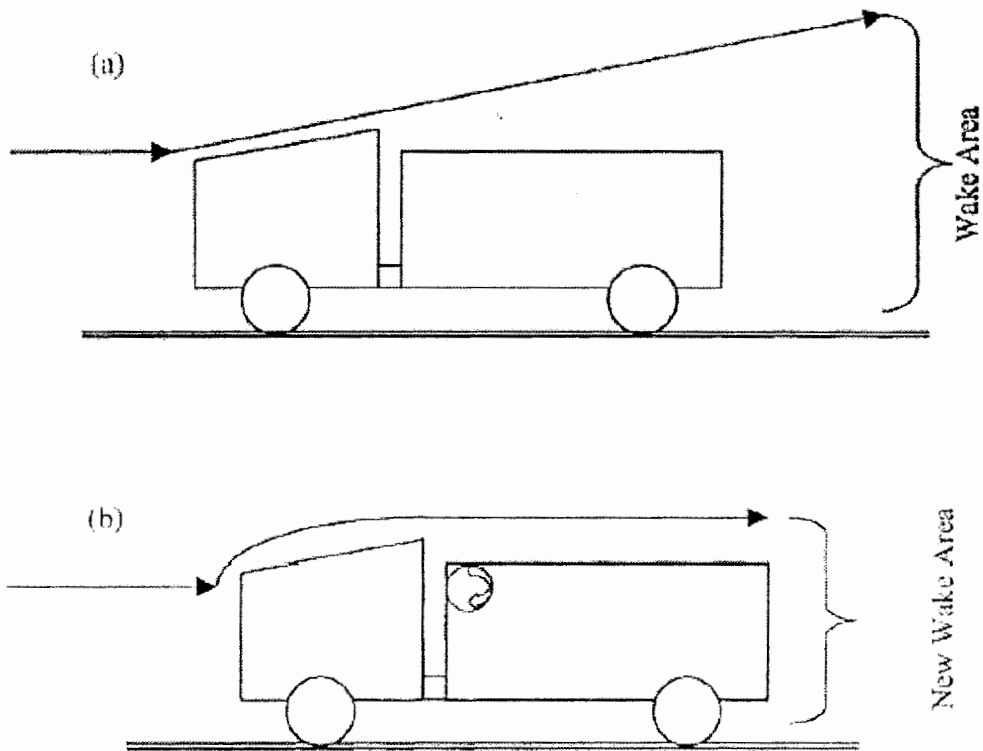
شکل ۱-۳۷: بردارهای سرعت در اطراف نقطه جدایش (CFD) [۱۰]

با استفاده از مولدهای گردابه بهینه تا $0/6\%$ کاهش در ضریب پسا قابل حصول است. عملاً مولدهای گردابه، گردابه‌هایی در جهت جریان تولید می‌کنند که باعث اختلاط لایه‌های بالایی و پایینی در لایه مرزی شده و این اختلاط و همگن‌سازی توزیع سرعت جدایش جریان را به تعویق می‌اندازد به عبارت دیگر مولدهای گردابه فشار را در کل ناحیه انتهایی خودرو افزایش می‌دهند و به این ترتیب پسا کاهش می‌یابد.

۱-۵-۶: تاثیر استوانه چرخان بر پسای آیرودینامیکی کامیون

در این روش مبنای کار تزریق اندازه حرکت با استفاده از یک استوانه چرخان به لایه مرزی است. استوانه مورد استفاده دارای قطر ۱ سانتیمتر و سرعت زاویه‌ای 4000 rpm می‌باشد. پسای آیرودینامیکی وسایل نقلیه بوسیله یکنواخت‌سازی سطح بدنه و با کنترل جدایش لایه مرزی قابل کنترل است.

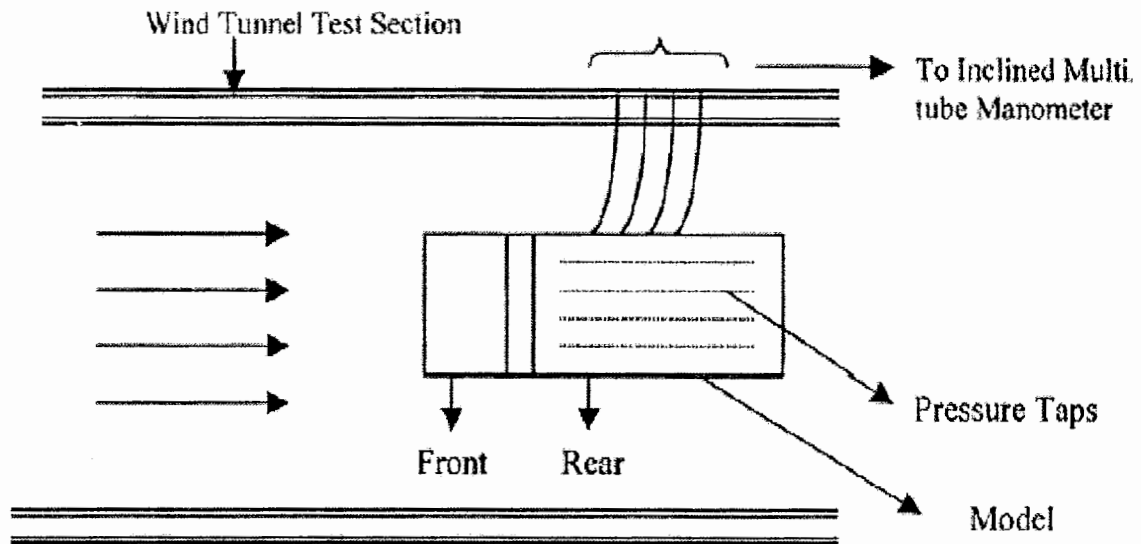
برای به تاخیر انداختن جدایش لایه مرزی در وسایل نقلیه زمینی کارهای بسیاری صورت گرفته که از آن جمله می توان به کاهش گوشه های تیز و جایگزینی آنها با گوشه های خمیده، بالچه های قابل نصب در عقب و روی خودروها، مولدهای گردابه و پرکننده های فضای بین اتاق و تریلر اشاره نمود.



شکل ۱-۳۸: (a) حالت موجود (b) حالت مطلوب، [۱۱]

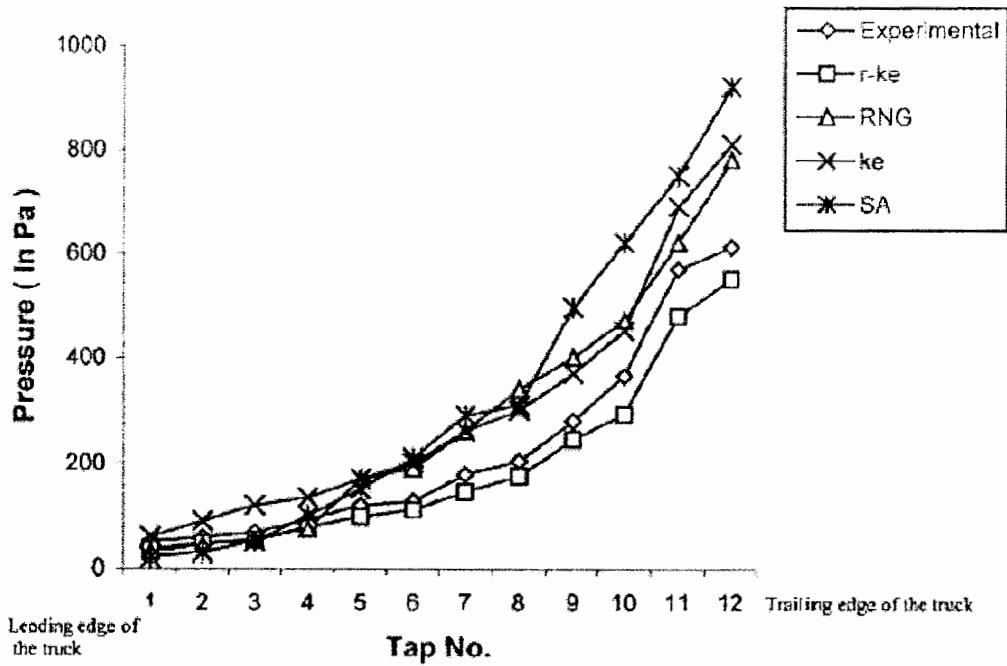
اما روش استفاده از دیواره متحرک برای کنترل جدایش لایه مرزی در مراحل اولیه تحقیق قرار دارد. در شکل ۱-۳۸، (a) جریان حول یک کامیونت در حالت عادی نشان داده شده است. نیروی پسای کامیون دو بخش عمده دارد، پسای اصطکاک پوسته ای و پسای فشاری (در اثر جدایش لایه مرزی). به علت بزرگی گردابه در پشت کامیون پسای فشاری قسمت عمده پسای کل را شامل می شود. با استفاده از یک استوانه چرخان در انتهای قسمت اول بدنه (شکل ۱-۳۸، b) جدایش

لایه مرزی از بدنه به تعویق افتاده و در نتیجه دنباله کوچک می شود. با کاهش اندازه گردابه، پسای فشاری و در نتیجه مصرف سوخت کاهش می یابد. در شکل ۱-۳۹ نحوه استقرار مدل در تونل باد نمایش داده شده است.



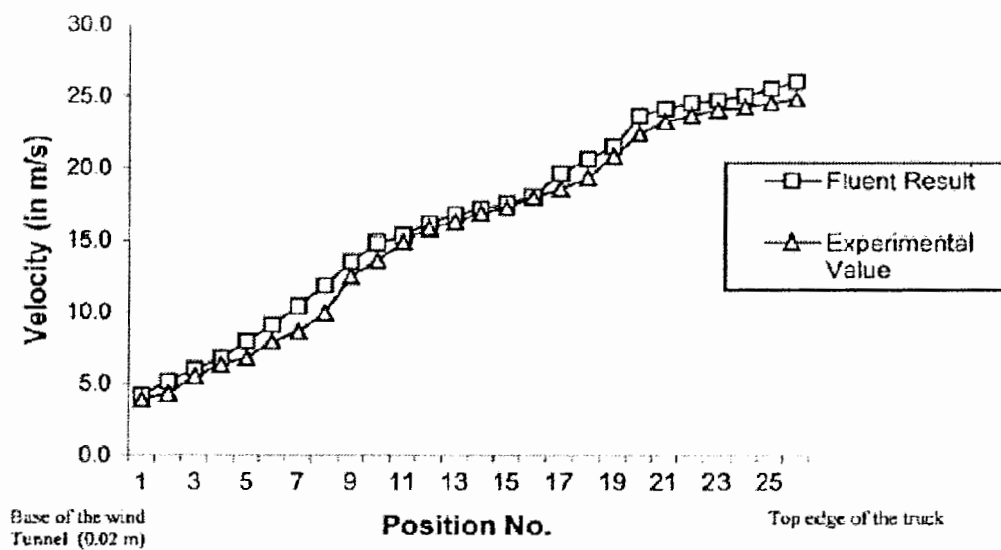
شکل ۱-۳۹: نمونه کامیونت در تونل باد [۱۱]

در شکل ۱-۴۰ مقایسه ای بین نتایج حاصل از نرم افزار Fluent و نتایج تجربی حاصل از اندازه گیری های تونل باد را ملاحظه می کنید. توزیع فشار بر روی تریلر با استفاده از روشهای گوناگون محاسبه شده و در شکل ۱-۴۰ ارائه شده است.



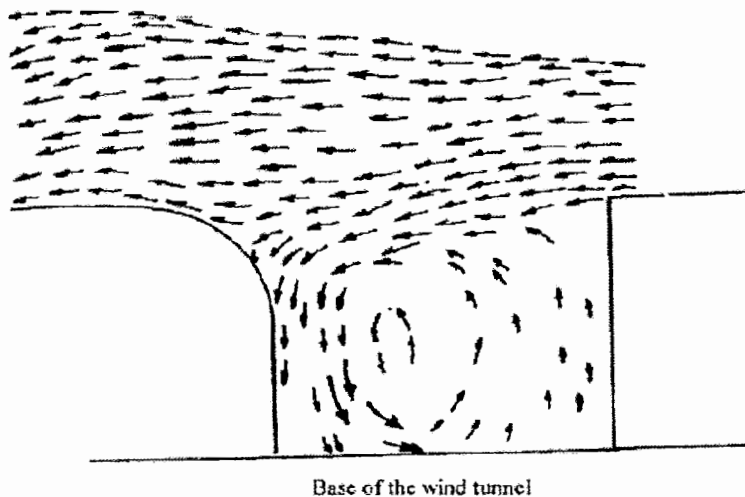
شکل ۴۰-۱: توزیع فشار بر روی تریلر با استفاده از روشهای گوناگون [۱۱]

در شکل زیر مقایسه ای بین توزیع سرعت حاصل از نرم افزار Fluent و نتایج حاصل از تونل باد را مشاهده می کنید.

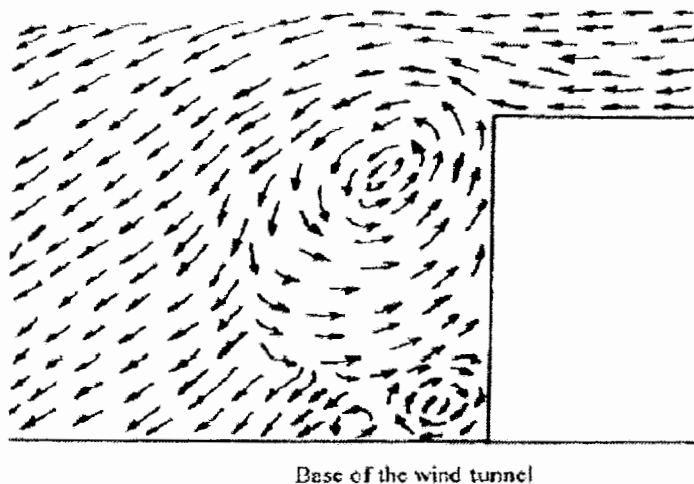


شکل ۴۱-۱: توزیع سرعت حاصل از نرم افزار و تونل باد [۱۱]

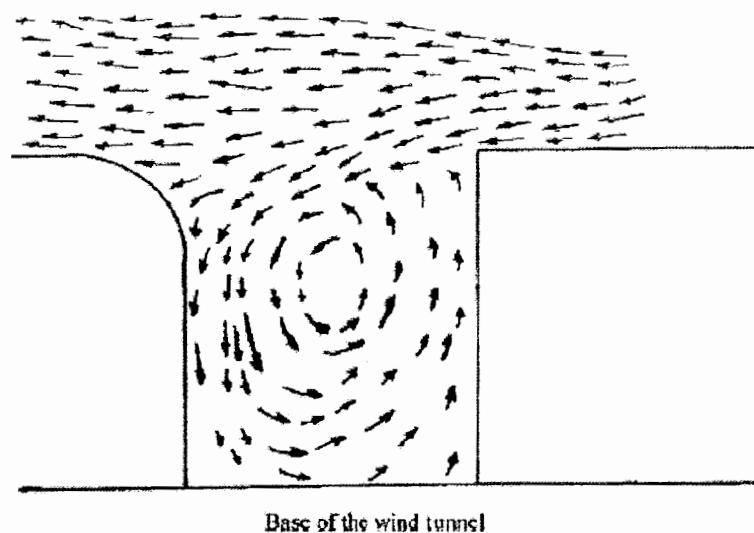
هر دو شکل مویید این نکته هستند که مدل (ϵ -k- τ) بهترین تطابق را با نتایج تجربی دارد. در اشکال زیر نحوه تاثیر استوانه چرخان را بر نواحی گردابه بین دو قسمت و در پشت کامیون مشاهده می کنید.



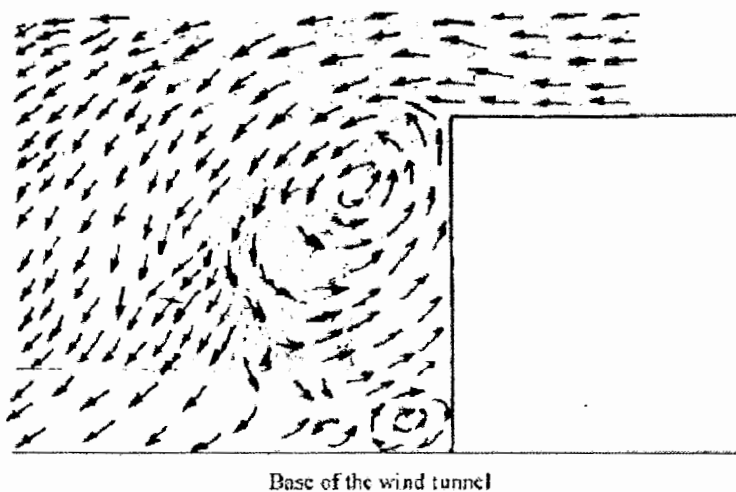
شکل ۱-۴۲: گردابه فاصله در حالتی که سرعت چرخش استوانه در فاصله $\frac{0}{\min}$ باشد [۱۱]



شکل ۱-۴۳: گردابه پشت در حالتی که سرعت چرخش استوانه در فاصله $\frac{0}{\min}$ باشد [۱۱]



شکل ۱-۴۴: گردابه فاصله، سرعت چرخش استوانه یک سانتیمتری در فاصله 2000 /min باشد [۱۱]



شکل ۱-۴۵: گردابه پشت، سرعت چرخش استوانه یک سانتیمتری در فاصله 2000 /min است [۱۱]

۱-۵-۷: کاهش فعال پسای اصطکاک پوسته ای بوسیله کنترل خطوط اثر کم سرعت

در این روش با استفاده از فن آوری حسگر - مکش خطوط اثر کم سرعت شناسایی و از لایه مرزی مغشوش حذف می شوند. بررسی چنین روشی با کمک تونل های آب و باد برای آشکار سازی خطوط اثر و نحوه حذف آنها مقدور می باشد. در این حالت حسگرهای لایه داغ^۱ که بر طبق یک الگوریتم بررسی مورد استفاده قرار گرفته اند، خطوط اثر را شناسایی نموده و با فعال کردن مکنده ها، خطوط اثر را در فاز رشدشان حذف می نمایند. با توجه به مساحت اندک خطوط اثر و فرکانس زیاد تولید آنها از شیرهای کوچک^۲ بر مبنای فن آوری MEMS در دهانه مکنده استفاده می شود. کاهش اصطکاک پوسته ای مغشوش بوسیله مکش هایی با نرخ اندک و با جریان های جرمی کاهش یافته قابل حصول است.

روش مکش جزو روشهای کنترل جریان آرام^۳ به حساب می آید. در این روش با مکش در نقاط مختلف و معین، گذار^۴ را در لایه مرزی به تعویق انداخته و یا به عبارتی لایه مرزی را مجددا آرام^۵ می نمایند در سالهای اخیر کنترل لایه مرزی مغشوش چه فعال و چه غیر فعال با روشهای مکش، تزریق، استفاده از ریبلت ها، جت های مصنوعی و شکستن گردابه های بزرگ^۶ بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

این حقیقت پذیرفته شده که تنش های مماسی رینولدز در یک جریان برشی دیواره، مسبب انتقال انرژی از جریان میانی به مغشوش است. تحقیقات نشان داده که اغلب این تنش های مماسی در جریان مغشوش طی فرآیند تولید، رها شدن و شروع اغتشاش خطوط اثر کم سرعت به وجود می آیند. رها شدن و شروع اغتشاش باعث ۸۰٪ از تنش برشی تولید شده در لایه مرزی است.

^۱ Hot Film Sensor

^۲ Micro valve

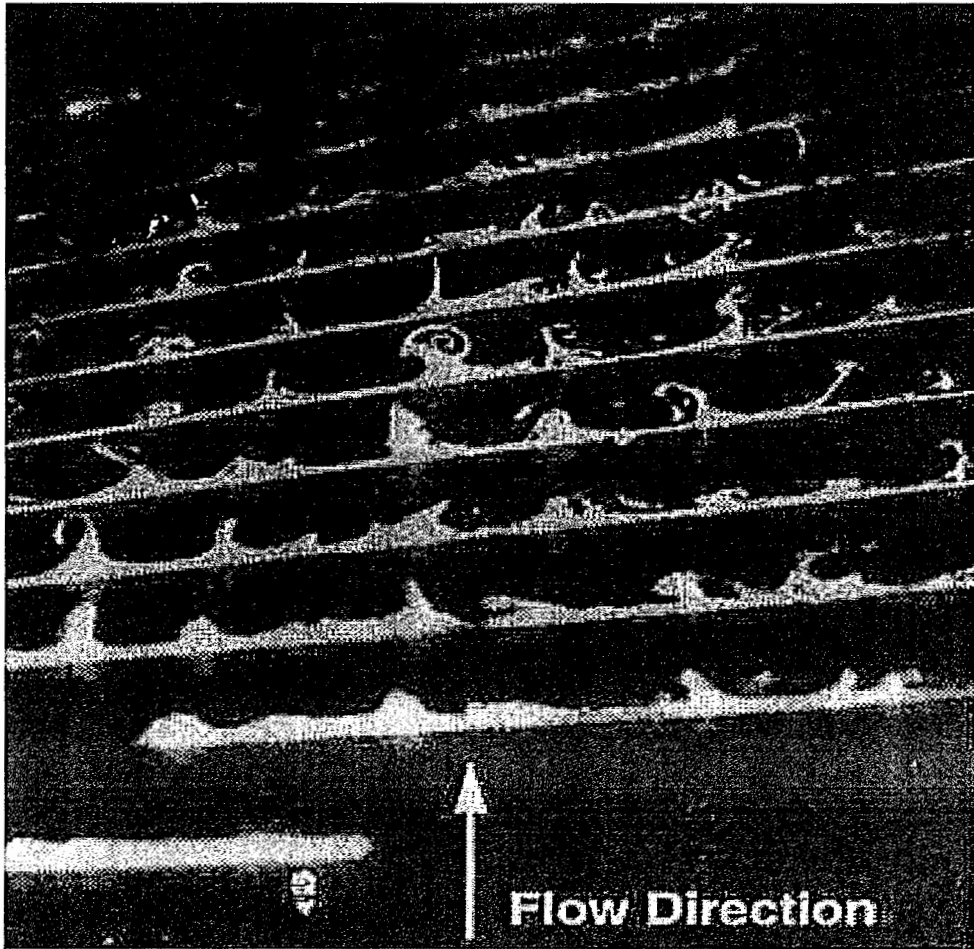
^۳ Laminar Flow Control

^۴ Transition

^۵ Re-laminarisation

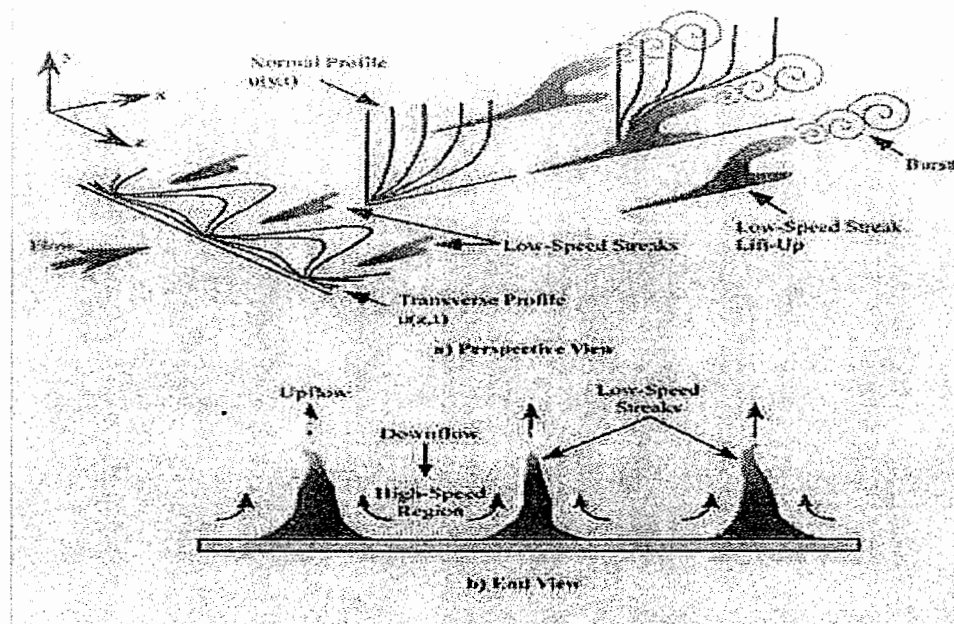
^۶ Large Eddy Break up

در شکل ۱-۳۱ آشکار سازی به کمک دود را مشاهده می نمایید که برای نشان دادن ساختار خطوط اثر کم سرعت در لایه مرزی مغشوش به کار رفته است.



شکل ۱-۴۶: آشکار سازی جریان بوسیله دود

و در شکل ۱-۴۷ یک شماتیک ذهنی از آنچه اتفاق افتاده را می بینید.



شکل ۱-۴۷: شماتیک ذهنی از روش

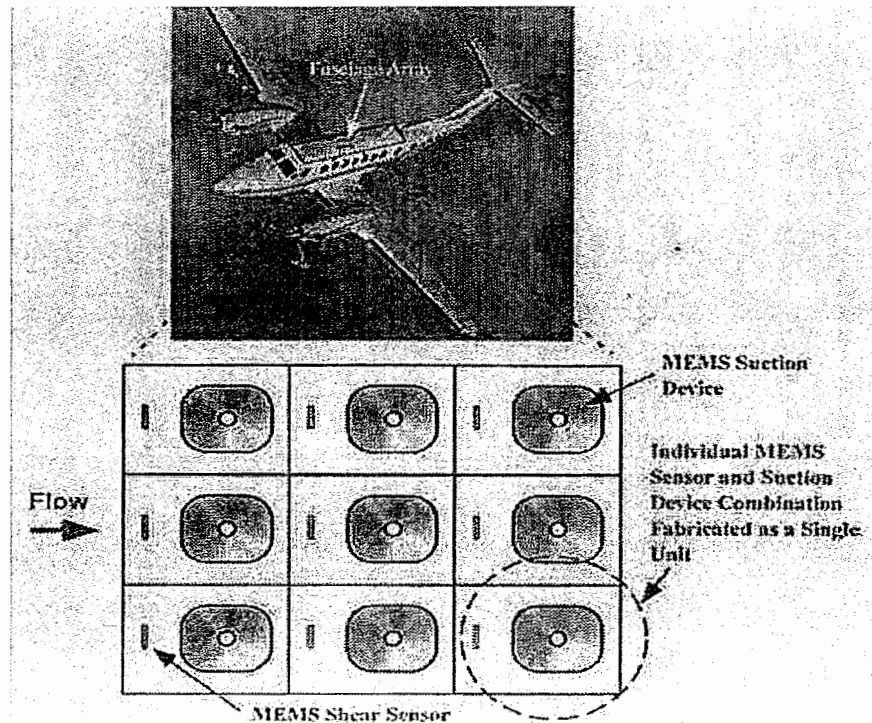
وقتی خط اثر به سمت پایین دست جریان حرکت می کند. به سمت بالا و دورتر از دیواره جابجا می شود که باعث نفوذ سیال با ممنتوم اندک به داخل محدوده دنباله^۱ لایه مرزی می شود و به تدریج باعث بالا آمدن و تولد اختلاط اغتشاشی قابل توجه می شود.

اگر رها شدن و ترکیدن را بتوان چندین مرتبه کاهش داد، امکان کاهش تنش های رینولدزی نیز وجود خواهد داشت که در نهایت منجر به کاهش اصطکاک پوسته ای مغشوش می شود. روشهایی که تا کنون برای کنترل لایه مرزی مغشوش به کار رفته اند مصرف انرژی زیادی دارند که استفاده عملیاتی از آنها را غیر اقتصادی می نماید.

هدف حقیقی در یک سیستم کاهش پسا، کاهش قابل توجه با صرف هزینه اندک است. پیشرفتهای اخیر در ساخت وسایل میکرو الکترو مکانیکال دستیابی به کاهش پسای قابل توجهی را ممکن نموده

^۱wake

است. این سیستم خطوط اثر کم سرعت را قبل از رسیدن به فاز ترکیدن از بین می برد. سیستم کامل شامل جفت های حسگر و مکنده است که به طور مستقل عمل می کنند.



شکل ۱-۴۸: نمونه‌های از ساختار سیستم

حسن مکش انتخابی کاهش در جریان جرمی مورد نیاز به نسبت روشهای مکش پیوسته و یکنواخت است. در مکش پیوسته ضریب مکش به این صورت تعریف می شود:

$$C = V / U$$

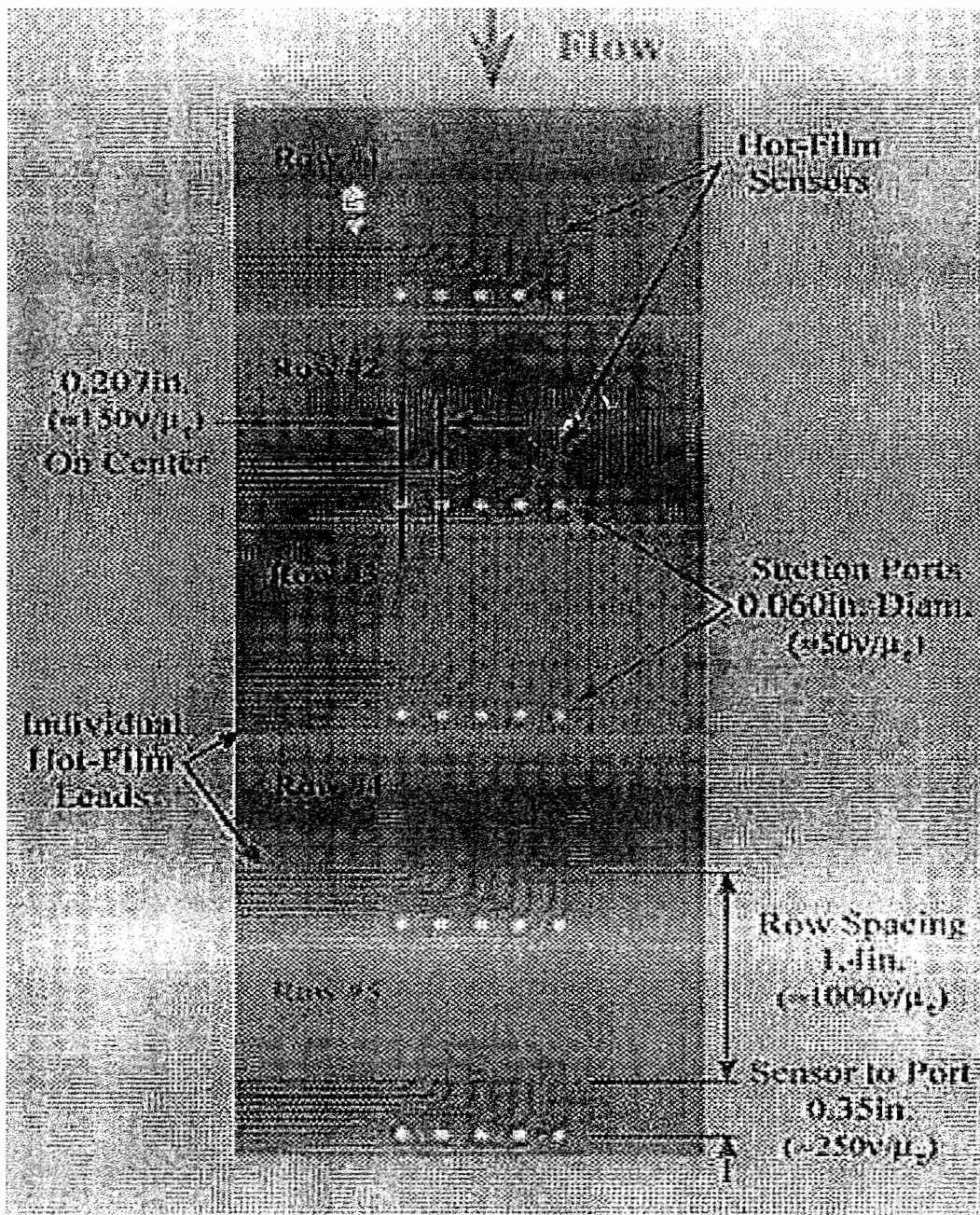
که V سرعت متوسط عمودی در دیواره و U سرعت جریان آزاد است. در مکش یکنواخت $V = Q / A$ است که Q نرخ جریان حجمی و A مساحت تحت مکش است. از آنجائیکه در حالت یکنواخت جریان جرمی به سطح بسیار بزرگی اعمال می شود، سرعت متوسط عمودی روی دیواره بسیار کم است در حالیکه جریان جرمی زیادی لازم است.

در روش مکش انتخابی نقطه ای، سوراخ های مکش بسیار پراکنده اند که میزان جریان جرمی کاهش قابل ملاحظه ای می یابد اما سرعت جریان عبوری از میان سوراخ مکش به علت کوچک بودن قطر سوراخ، زیاد می باشد. ضریب مکش انتخابی به این صورت تعریف می شود:

$$C = Q / (A \cdot U)$$

که در آن Q نرخ جریان عبوری از میان سوراخ و A سطح موثر مکش است که معادل حاصلضرب طول خط اثر در فاصله عرضی آن می باشد. در این روش بین ۲ تا ۵ مرتبه ضریب مکش کوچکتر از روش های پیوسته و یکنواخت مکش است. با این روش تا ۶۰٪ میتوان اصطکاک پیوسته ای را کاهش داد.

در پایان لازم به ذکر است که این روش در یک وسیله با سرعت کم و ارتفاع متوسط جائیکه سطح خطوط اثر بزرگتر هستند و فرکانس ترکیدن ها کم است، قابل استفاده می باشد. سیستم باید به گونه ای عمل کند که فرکانس ترکیدن ها را به کمتر از ۱ کیلو هرتز کاهش دهد.



شکل ۱-۴۹: نمونه سیستم ساخته شده

فصل دوم

کشنده و تریلر^۱ متداول کلاس ۸

^۱ Tractor-Trailer

۱-۲: تفکیک انرژی کامیون

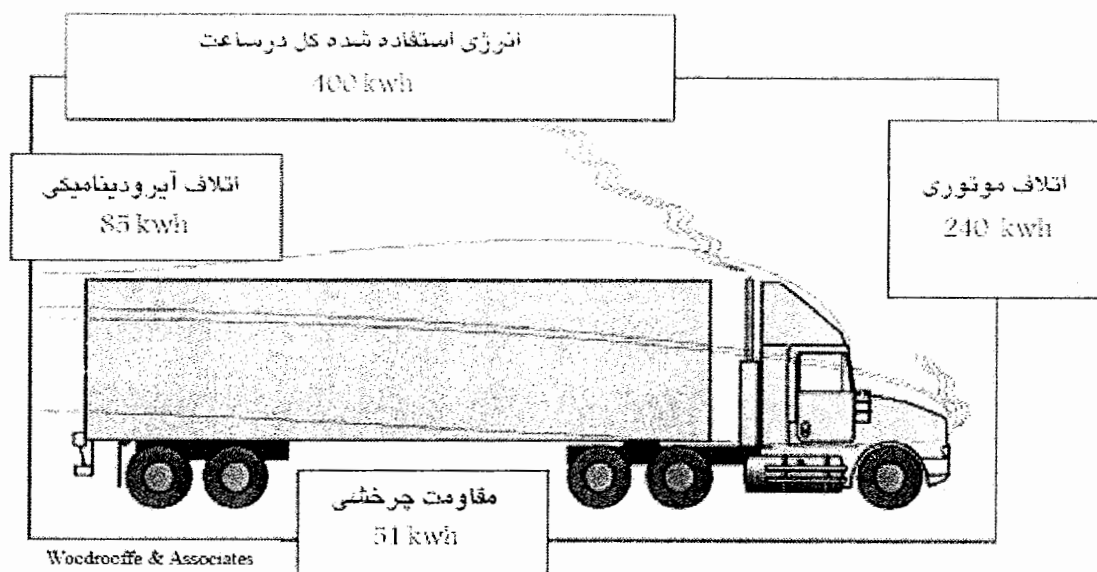
کشنده و تریلر^۱ متداول کلاس ۸، رایج ترین نوع کامیون مورد استفاده در حمل و نقل جاده ای است. به همین علت بیشتر آزمایش های تونل باد و شبیه سازی های نرم افزاری بر روی مدل های آن انجام شده اند.



شکل ۱-۲: کشنده و تریلر متداول کلاس ۸

شکل ۲-۲ نشان دهنده سهم مصرف انرژی اجزاء و سیستم های مختلف یک کامیون کلاس ۸ به وزن ۳۶۲۸۰ کیلوگرم، در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت است. بررسی انرژی مصرفی یک تریلر نشان می دهد که تلفات انرژی شامل اتلاف مکانیکی، تلفات اصطکاکی و اتلاف ناشی از مقاومت آیرودینامیکی است.

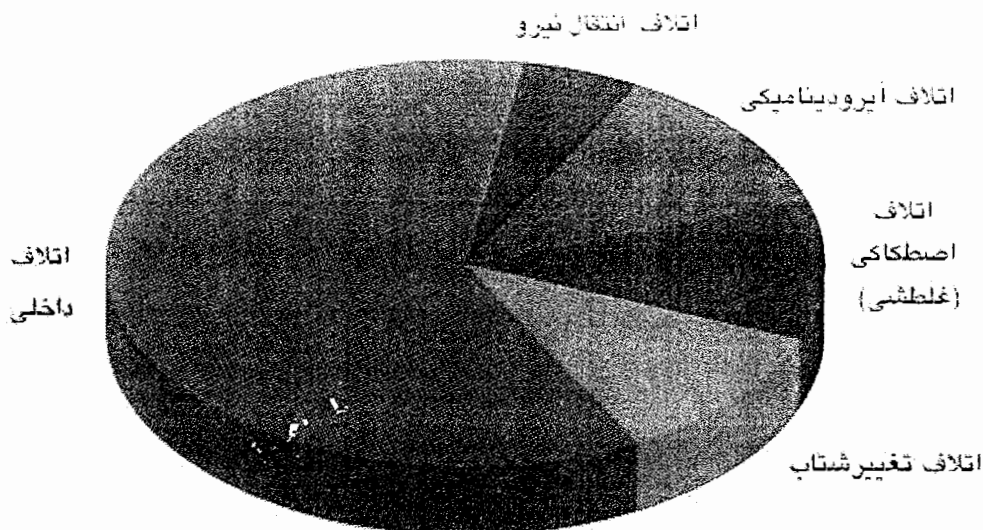
^۱ Tractor-Trailer



شکل ۲-۲: تفکیک انرژی برای کشنده و تریلر [۱۲]

سوخت مصرفی یک کامیون به دو مولفه بستگی کامل دارد، اول خصوصیات کامیون مانند وزن کامیون و سطح جلویی آن و دوم مسیری که کامیون در آن حرکت می کند. هرچند مورد دوم تحت بررسی های زیادی قرار گرفته و مولفه های موثر در کاهش مصرف سوخت که بستگی به چگونگی حرکت کامیون ها و آب و هوای محیط عملیاتی آنها دارد کاملاً بررسی شده اند عدم ثبات شرایط عملیاتی کامیون و تنوع بسیار زیاد جاده ها هیچگاه دستیابی به ارقام قابل اتکا را مقدور نساخته است.

همانطور که در شکل ۲-۲ نشان داده شد می توان انرژی مصرفی کامیون را به چند قسمت اصلی تفکیک نمود. در تحقیقی که توسط سازمان تحقیقات صنعت موتور در انگلستان انجام گرفته [۱۳] مصرف سوخت به گونه ای که در دیاگرام کلوجه ای شکل ۲-۳ ملاحظه می کنید ارائه گردیده است.



شکل ۲-۳: نمودار کلوچه ای تفکیک انرژی مصرفی کامیون [۱۳]

همانطور که می بینیم، تنها $\frac{1}{3}$ از کل سوخت به مفهوم واقعی کلمه " مفید " استفاده می شود (یعنی صرف غلبه بر مقاومت ایرودینامیکی، مقاومت اصطکاکی و شتاب دادن به کامیون می شود). افزایش قیمت سوخت، اهمیت وسایل و تجهیزات ایرودینامیکی که باعث کاهش ضریب پسا و در نتیجه کاهش مصرف سوخت می شوند را بیش از پیش بارز نموده است. کامیونی که سالی ۱۶۰۰۰۰ کیلومتر را با نرخ مصرفی ۳۵ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر می پیماید، در حقیقت هر سال در حدود ۵۶۸۰۰ لیتر سوخت مصرف می کند. واضح است که یک کاهش اندک در نرخ مصرف سوخت کامیون می تواند صرفه جویی اقتصادی قابل توجهی به دنبال داشته باشد. انجام اصلاحات لازم و افزودن وسایل کاهش دهنده پسا می تواند بین ۶ تا ۱۲ درصد در مصرف سوخت کاهش ایجاد کند. از سوی دیگر کاهش مصرف سوخت به طور مستقیم باعث کاهش آلودگی زیست محیطی بوسیله کامیون می شود. بعضی وسایل ایرودینامیکی که به منظور کاهش ضریب پسا به بدنه کامیون افزوده می شوند منافع مضاعفی دارند :

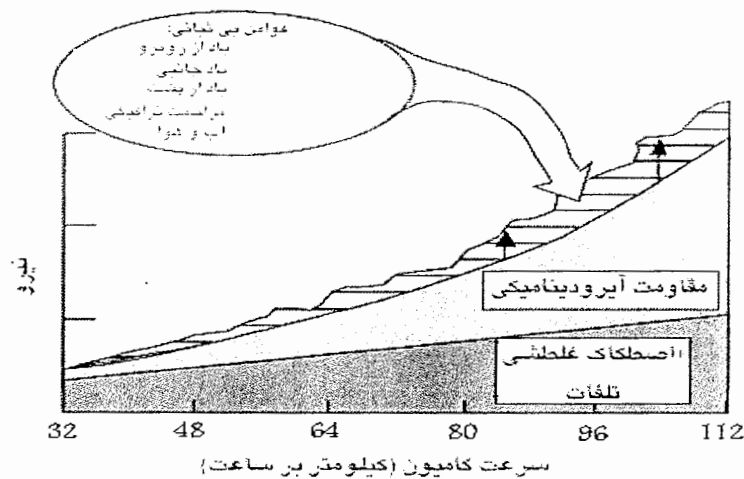
- کاهش گرد و غبار ناشی از حرکت کامیون

- افزایش بازده کامیون در سرعت های زیاد
- کاهش حساسیت کامیون به باد های جانبی
- بهبود شکل ظاهری کامیون

۲-۲: چه زمانی اصلاحات آیرودینامیکی موثرتر هستند

۲-۲-۱: سرعت های زیاد

همانطور که در شکل ۴-۲ مشهود است، با افزایش سرعت، نیروی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت آیرودینامیکی و اصطکاک غلطشی افزایش می یابد. نرخ افزایش اتلاف آیرودینامیکی به نسبت اتلاف اصطکاک بیشتر است به گونه ای که در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت نیروی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت آیرودینامیکی بیشتر از نیروی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت اصطکاک است.



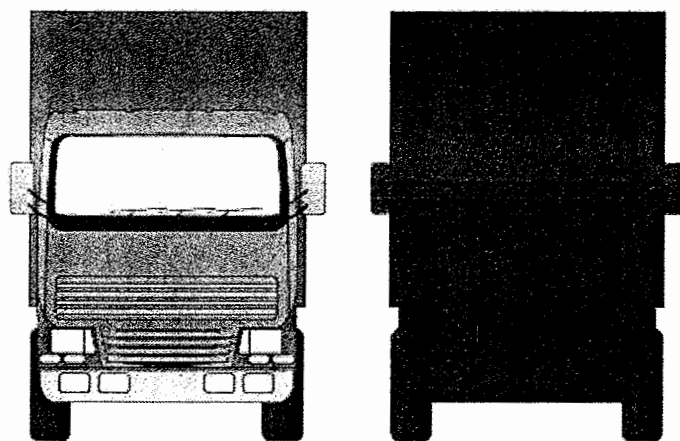
شکل ۴-۲: نیروی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت آیرودینامیکی و اصطکاک [۱۴]

در شکل ۴-۲ مشاهده می کنید وضعیت عملکرد و شرایط محیطی در میزان اتلاف تاثیر گذار هستند. وزش باد های جانبی، اثرات ناشی از اتمسفر، تاثیر حرکت وسایل نقلیه مجاور بعضی از

مهمترین این عوامل هستند. از آنجائیکه این مولفه ها متغیر هستند، مقاومت آیرودینامیکی کامیون^۱ نیز در طول سفر دستخوش تغییر خواهد بود. همانطور که در شکل ۲-۴ تغییرات مقاومت آیرودینامیکی و مقاومت غلطشی یک کامیون ۱۰ تن نسبت به تغییرات سرعت نشان داده شده است در سرعت ثابت $50 \frac{Km}{h}$ تنها حدود ۴۰ درصد از انرژی مفید موتور صرف غلبه بر مقاومت آیرودینامیکی می شود در حالی که در سرعت $95 \frac{Km}{h}$ این رقم به ۶۰ درصد می رسد.

۲-۲-۲: سطح جلویی بزرگ

هرچه سطح جلویی کامیون بزرگتر باشد مقاومت آیرودینامیکی کامیون بیشتر است. به همین نسبت اصلاح سطح جلویی می تواند در کاهش ضریب پسا موثر باشد.

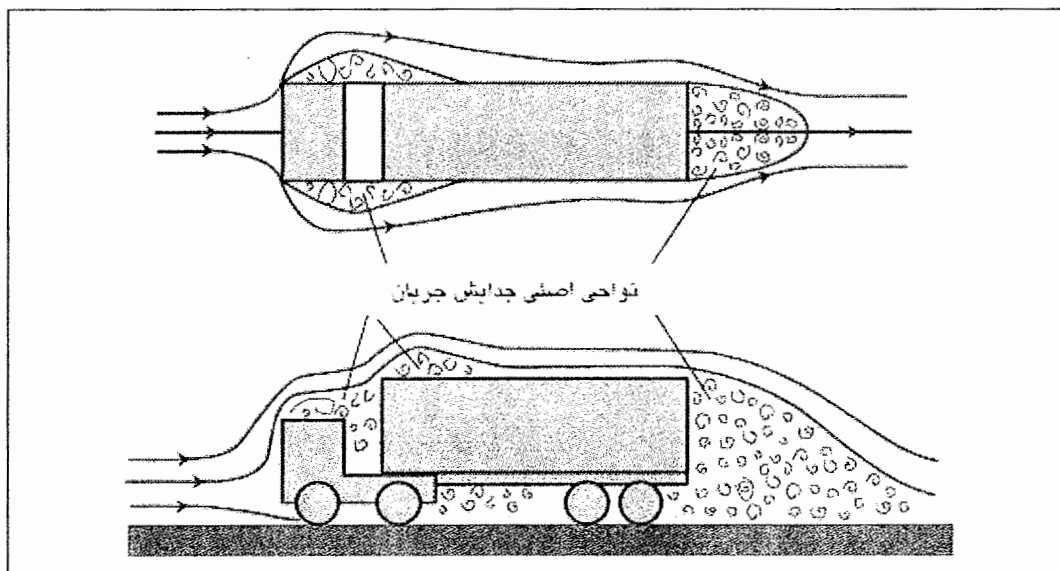


شکل ۲-۵: تصویر سطح جلویی که در میزان پسا موثر است [۳۵]

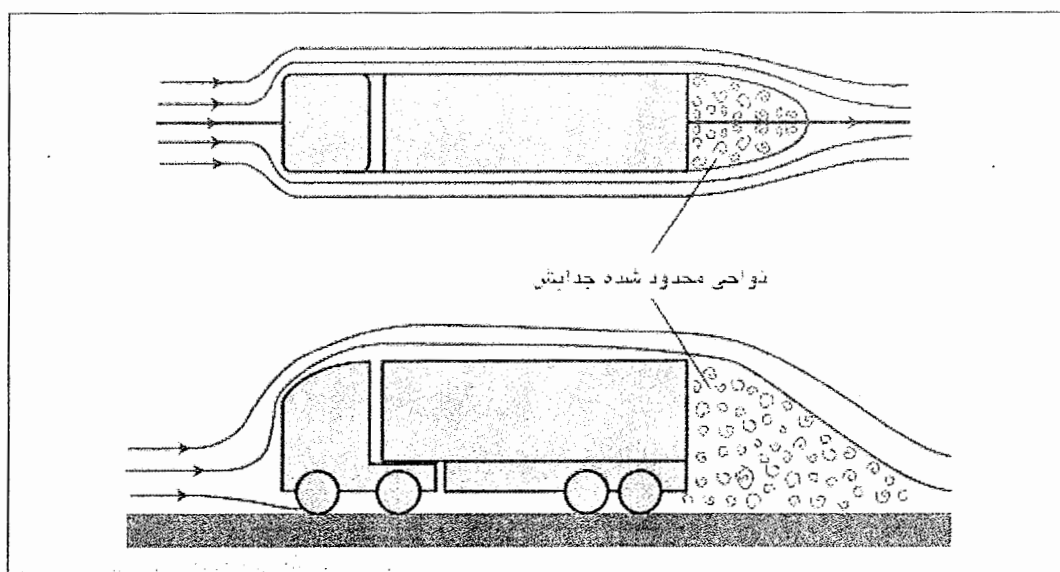
^۱ Truck

۳-۲-۲: طراحی آیرودینامیکی اولیه ضعیف

در کامیون هایی که طراحی اولیه مناسبی ندارند، اصلاح آیرودینامیکی می تواند کاهش قابل توجه در ضریب پسا به همراه داشته باشد. با دقت در اشکال ۶-۲ و ۷-۲ می توان علت این امر را به خوبی دریافت.



شکل ۶-۲: شماتیک جریان حول یک کشنده و تریلر متداول بدون اصلاحات آیرودینامیکی [۳۵]



شکل ۷-۲: شماتیک جریان حول یک کشنده و تریلر متداول با اصلاحات آیرودینامیکی [۳۵]

همانطور که می دانیم جدایش جریان عامل اصلی در ایجاد پسای فشاری است. پس با کاهش دادن نواحی که جریان امکان ورود به مرحله جدایش را دارد می توان پسای فشاری را به طور قابل ملاحظه ای کاهش داد.

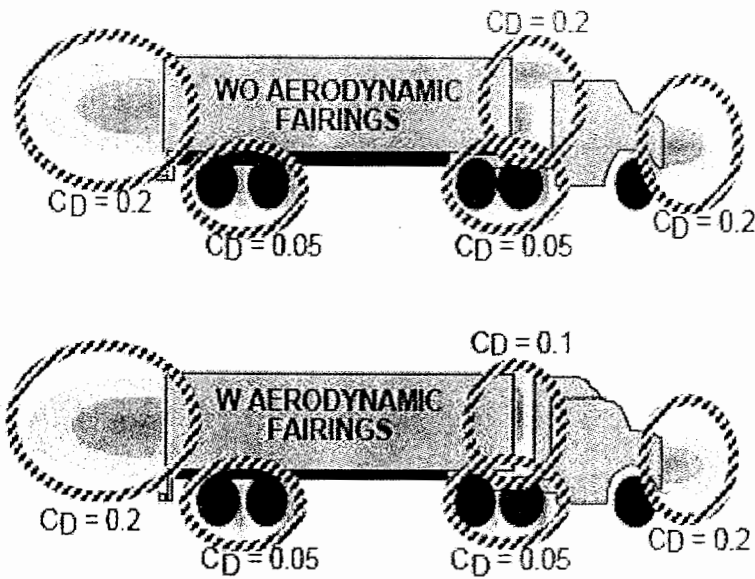
جالب است بدانیم که تاثیر کاهشی روشهای مذکور با کاهش سرعت کم می شود. رابطه بین کاهش مقاومت آیرودینامیکی، مصرف سوخت و سرعت کامیون در جدول ۲-۱ آمده است.

جدول ۲-۱: رابطه کاهش مصرف سوخت با سرعت کامیون [۱۴]

کاهش مقاومت آیرودینامیکی به کاهش مصرف سوخت	سرعت کامیون (کیلومتر بر ساعت)
۲	۹۶
۳	۶۴
۶	۳۲

اطلاعات جدول نشان می دهد که رسیدن به صرفه جویی ۱۰ درصدی در مصرف سوخت برای سرعت های کمتر از ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت چندان کار راحتی نیست. برای مثال هنگامی که کامیون سرعتی معادل ۷۰ کیلومتر بر ساعت دارد، مقاومت آیرودینامیکی باید تا ۳۰ درصد کاهش یابد تا بتوانیم به بهینه سازی ۱۰ درصدی در مصرف سوخت دست یابیم.

برای فهم بهتر مسئله بهتر است توزیع مقاومت آیرودینامیکی بر روی کِشنده و تریلر مشخص شود. شکل ۲-۸ نشان دهنده بزرگی نسبی مقاومت آیرودینامیکی یک کامیون در شرایط ایده آل است. شکل نشان می دهد که مناطق مهم از نظر مقاومت آیرودینامیکی سطح جلویی کِشنده، فاصله بین کِشنده و تریلر و سطوح زیرین و پشتی تریلر می باشند.



شکل ۲-۸: سهم اجزاء کامیون از پسای آیرودینامیکی [۱۴]



شکل ۲-۹: تمهیدات به کار رفته برای کاهش مقاومت آیرودینامیکی کامیون [۱۴]

مروری بر مقاومت کامیون ها نشان می دهد که ۴۰ تا ۵۰ درصد از مقاومت آیرودینامیکی آنها مربوط به کِشنده و ما بقی مربوط به تریلر است. خلاصه ای از تمهیدات به کار رفته برای کاهش مقاومت آیرودینامیکی را در شکل ۲-۹ مشاهده می کنید.

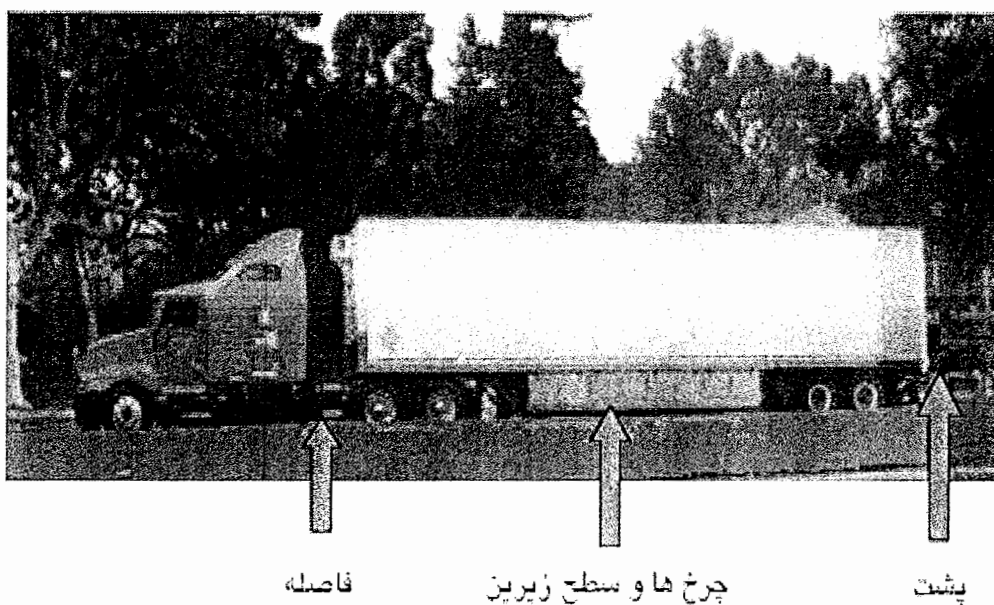
مناطق که بیشتر از نظر طراحی آیرودینامیکی اهمیت دارند به چهار ناحیه تقسیم می شوند :

الف) فاصله^۱ بین کِشنده و تریلر

ب) سطوح جلویی کِشنده و تریلر

ج) سطح زیرین تریلر

د) سطح پشتی تریلر



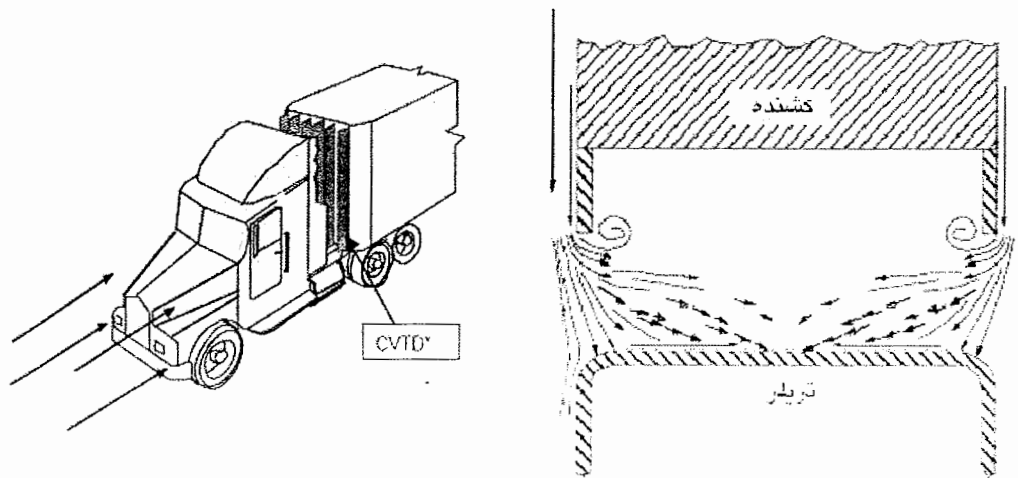
شکل ۲-۱۰: مواضع اصلی ایجاد پسا در کِشنده و تریلر متداول

^۱ Gap

۲-۳: روشهای کاهش مقاومت آیرودینامیکی کامیون

۲-۳-۱: فاصله بین کشنده و تریلر

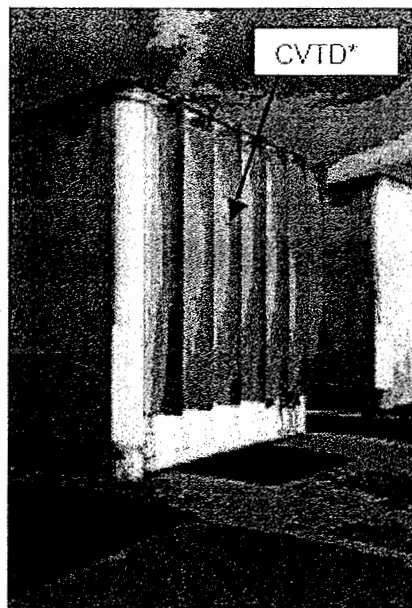
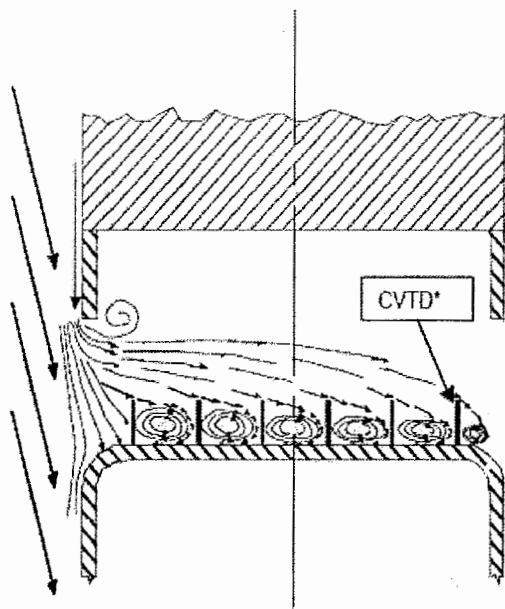
بیشترین تمرکز در طراحی فاصله بین کشنده و تریلر بر کاهش مقاومت آیرودینامیکی در شرایط باد جانبی قرار گرفته است. شکل ۲-۱۱ نشان دهنده جریان در فاصله مذکور در غیاب بادهای جانبی است. جریان پس از جدایش از لبه فرار کشنده به سمت داخل فاصله می چرخد. این جریان چرخنده به سطح جلویی تریلر برخورد می کند و باعث افزایش فشار روی سطح می شود.



شکل ۲-۱۱: نمای جریان در فاصله، بدون باد جانبی شکل ۲-۱۲: شماتیک تله های گردابه [۱۴]

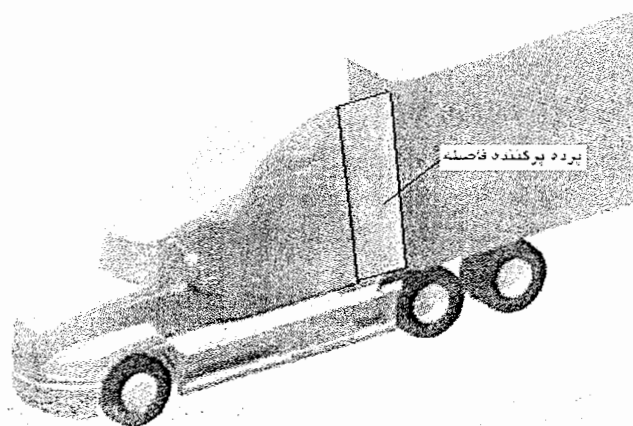
همانطور که در اشکال ۲-۱۲ و ۲-۱۳ مشاهده می کنید، تعدادی تله گردابه^۱ بر روی سطح جلویی تریلر نصب می شوند. به این ترتیب جریان برخوردی به سطح جلویی تریلر در این محفظه ها به تله می افتد و با ایجاد گردابه، محیط های کم فشار در مجاورت سطح مذکور ایجاد می شود. تاثیر این تله ها برای حالتی که باد جانبی وجود دارد چشمگیرتر است.

^۱ Vortex-Trap Device (VTD)



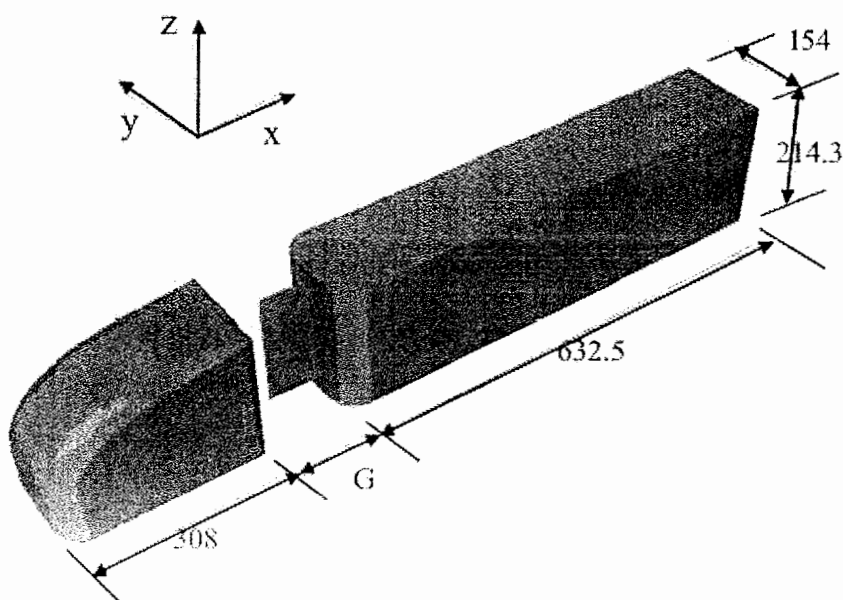
شکل ۲-۱۳: تله های گردابه نصب شده بر سطح تریلر شکل ۲-۱۴: شماتیک عملکرد تله ها [۱۴]

صفحات تشکیل دهنده تله های گردابه با فاصله مساوی، به طور عمودی و در طول سطح جلویی تریلر نصب می شوند. نوع دیگر صفحات پرده ای هستند که قابلیت جمع شدن دارند. این پرده ها از یک سو به جلوی تریلر متصل هستند و از سوی دیگر در حین باز شدن تا کشنده امتداد می یابند. تاثیر اصلی آنها جلوگیری از ایجاد جریان عرضی در فاصله مذکور است.



شکل ۲-۱۵: پرده نصب شده در فاصله کشنده و تریلر [۱۵]

استفاده از صفحات جداکننده^۱ که در فاصله نصب می شوند و به نوعی صفحه جداکننده دو گردابه اصلی داخل فاصله هستند روش نوینی است که هنوز تحت بررسی آزمایشگاهی قرار دارد. شبیه سازی عددی جریان و بررسی تاثیر این تمهید در کاهش ضریب پسا بوسیله دکتر براوند از دانشگاه کالیفرنیا جنوبی^۲ انجام گرفت.

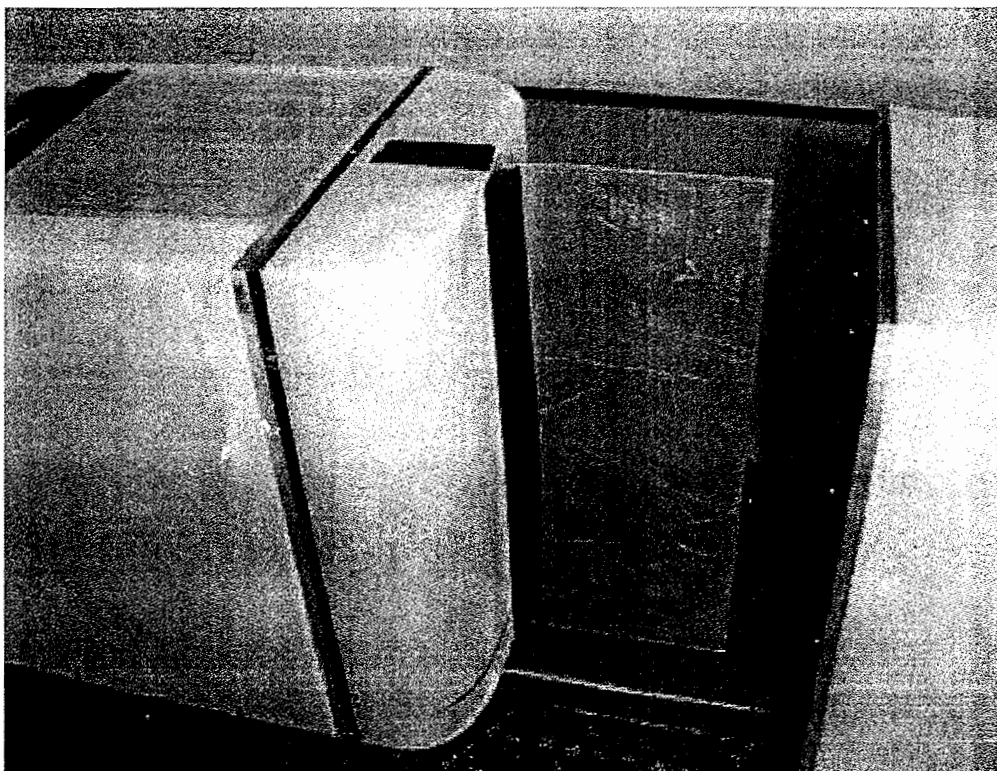


شکل ۲-۱۶: مدل عددی مجهز به صفحه جداکننده (اندازه ها به میلیمتر)، [۱۶]

در شکل ۲-۱۶ مدل عددی و در شکل ۲-۱۷ مدل مورد استفاده در تونل باد نشان داده شده اند. همانطور که مشهود است صفحه جدا کننده در وسط فاصله نصب شده است.

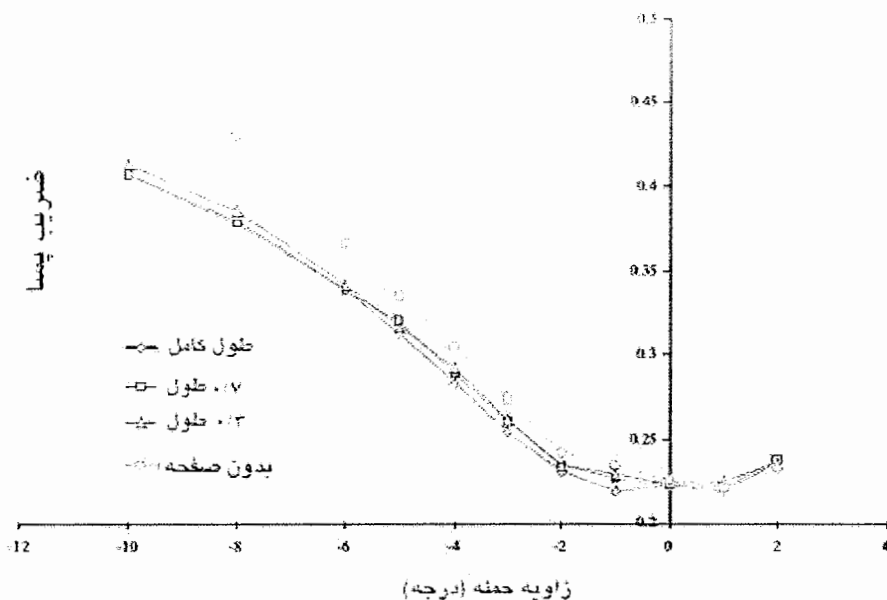
^۱ Splitter Plate

^۲ University of southern California



شکل ۲-۱۷: مدل مورد استفاده در تونل باد مجهز به صفحه جداکننده با ۰/۷ طول، [۱۶]

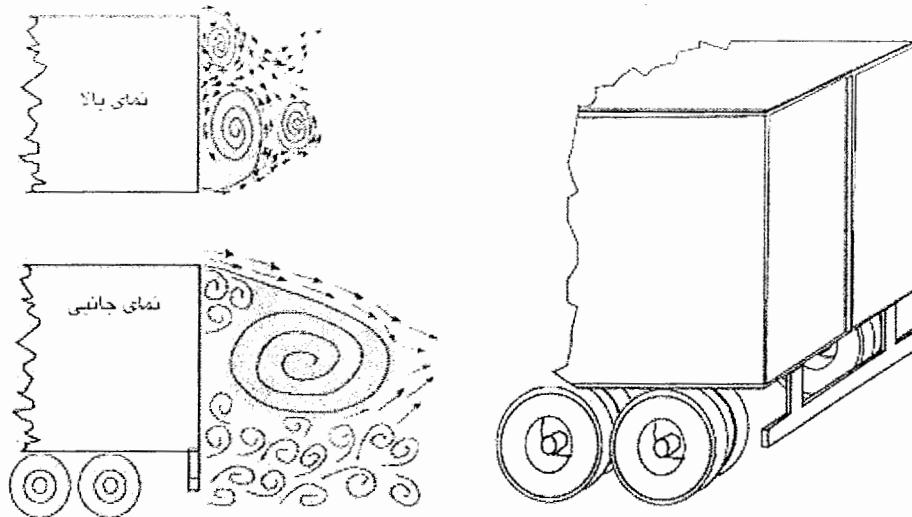
صفحه جداکننده در اندازه های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت تا میزان تاثیر آن در شرایط مختلف باد جانبی نسبت به فاصله مورد بررسی قرار گیرد. نتایج در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. همانطور که می بینیم تاثیر صفحه جداکننده با کاهش زاویه حمله باد جانبی (هنگامی که کامیون در حال دور زدن نیست) کاهش می یابد.



شکل ۲-۱۸: نتایج آزمایش تونل باد برای صفحه جداکننده در زوایای حمله متفاوت، [۱۶]

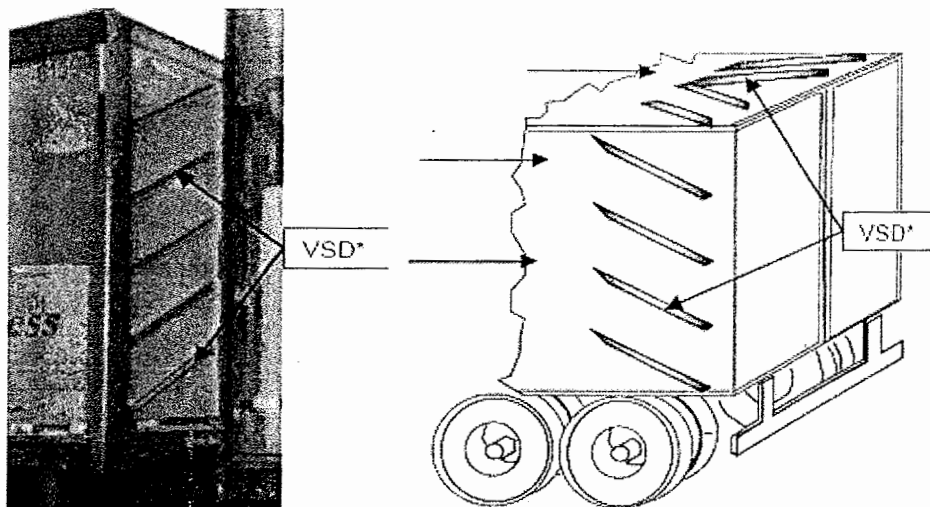
۲-۳-۲: سطوح پشتی و زیرین تریلر

شکل ۲-۱۱ پشت تریلر را به طور شماتیک نشان می دهد. اصلاحات و وسایل جانبی که برای بهینه سازی آیرودینامیکی استفاده می شوند باید قابل اعمال بر روی انواع درب های رایج باشند. (در های کشویی که به سمت بالا باز می شوند و درهایی که به طرفین باز می شوند.) هدف کنترل گردابه بزرگ و نامتعادل است که از پشت تریلر جدا می شود. در شکل ۲-۱۲ موقعیت گردابه های پشتی از دو زاویه دید بالا و جانبی نشان داده شده است. علت ایجاد این گردابه ها عبور جریان کم انرژی از کناره ها و بالای تریلر است که با رسیدن به لبه فرار (در پشت تریلر) از سطح جدا می شوند و به سمت سطح پشتی تریلر می چرخند. تداخل این جریان های کم انرژی با جریانی که از سطح زیرین تریلر وارد محدوده پشتی می شود، باعث ایجاد محیط نامتعادل بزرگتری می شود.



شکل ۲-۱۹: شماتیک پشت تریلر [۱۴] شکل ۲-۲۰: شماتیک جریان در پشت تریلر از دو نما [۱۴]

برای کنترل جریان در پشت تریلر تا کنون چند تمهید آزمایشی شده اند. وسیله اول که به VSD^۱ معروف است و در ۲-۲۱ نشان داده شده است. این صفحات به سطوح جانبی و بالایی تریلر و در نزدیکی دیواره پشتی نصب می شوند. نمونه آزمایشی نصب شده بر روی تریلر در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است.



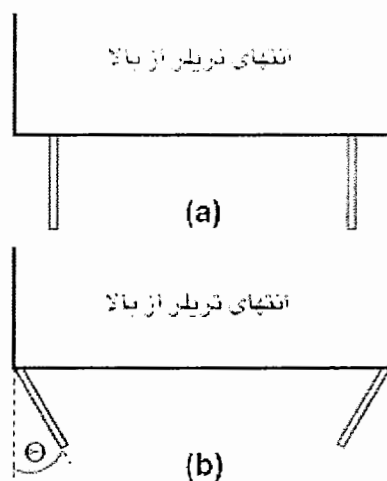
شکل ۲-۲۱: شماتیک نصب صفحات VSD [۱۴]

شکل ۲-۲۲: نحوه نصب صفحات VSD

^۱ Vortex Strake Device

این وسایل دوتایی، با فاصله مساوی و به موازات یکدیگر در دو طرف تریلر نصب می شوند. VSD های نصب شده بر سطح بالایی تریلر موازی نبوده و نسبت به خط مرکزی تریلر به شکلی متقارن یکدیگر را قطع می کنند. (زاویه ۳۰ درجه نسبت به خط طولی می سازند.)

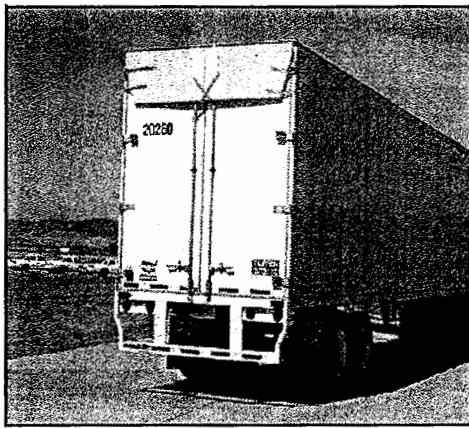
در شکل ۲-۲۸ شماتیک جریان عبوری از VSD ها و تاثیر آنها بر گردابه پشتی به خوبی دیده می شود، VSD ها تعداد محدودی ساختار گردابه ای بزرگ بر روی سطوح جانبی و بالایی تریلر تولید می کنند. بدینوسیله جریان خروجی از لبه فرار تریلر انرژی می گیرد و قابلیت جریان مذکور برای گسترش یافتن در ناحیه پشتی افزایش می یابد. در حقیقت ایجاد یک محدوده متعادل و دارای ثبات است که باعث کاهش مقاومت می شود نه کوچکتر شدن محدوده گردابه پشتی. روش دیگر نصب صفحات در پشت تریلرو در لبه ها است. همانطور که در شکل ۲-۲۳ مشخص است. این صفحات گاهی صفحات دنباله قایقی^۱ یا منحرف کننده های پشتی^۲ نامیده می شوند.



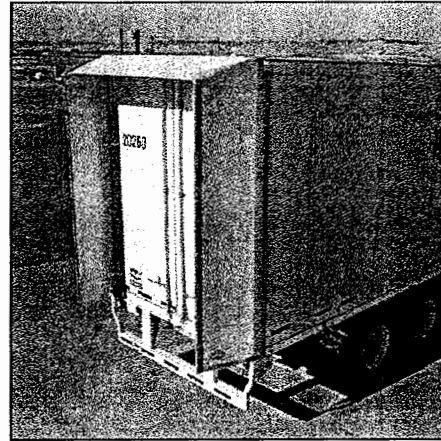
شکل ۲-۲۳: نحوه نصب صفحات پشتی [۱۸]

^۱ Boat-tail Plates
^۲ Rear Deflectors

در شکل ۲-۲۳ دو حالت نصب صفحات به صورت عمودی (a) و زاویه دار (b) را مشاهده می کنید. صفحات گاهی اوقات خمیده هستند.



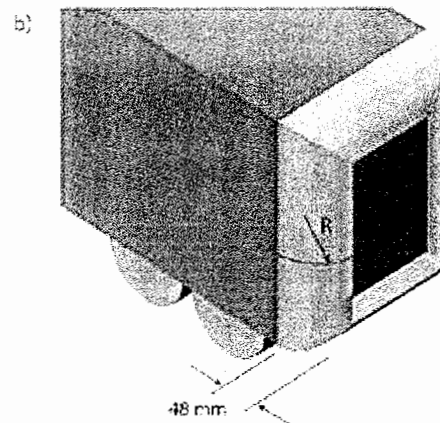
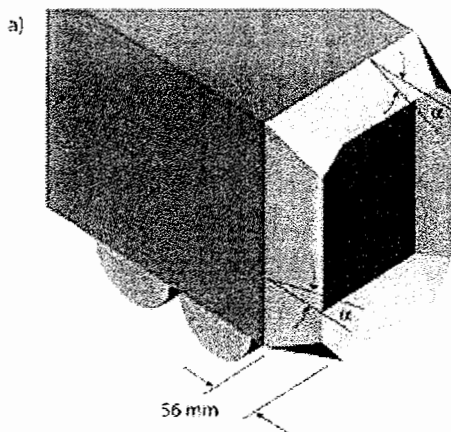
(b)



(a)

شکل ۲-۲۴: صفحات نصب شده در حین استفاده شکل ۲-۲۵: صفحات نصب شده، غیر فعال [۱۸]

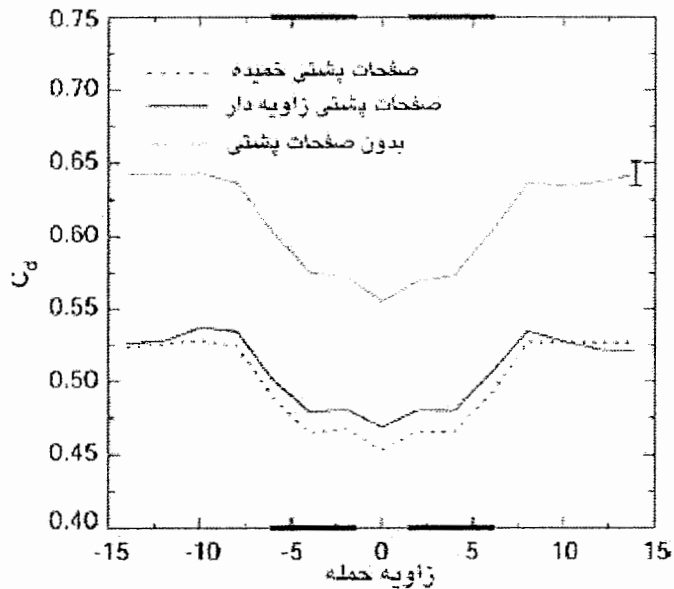
تحلیل عددی جریان اطراف کامیون در حالتی که صفحات پشتی نصب شده اند در آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور^۱ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲-۲۶: (a) صفحات پشتی زاویه دار (b) صفحات پشتی خمیده، [۱۷]

^۱ Lawrence Livermore National Laboratory

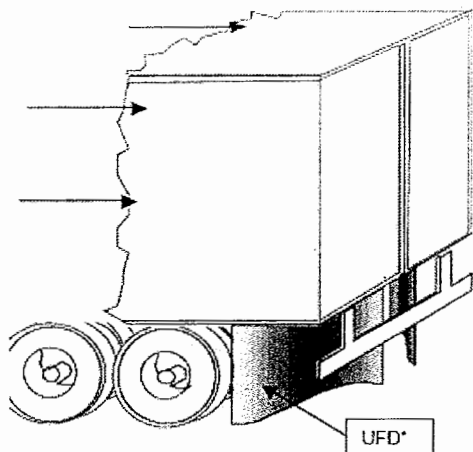
نمودار ضریب پسا ارائه شده از نتایج تحقیقات به خوبی کاهش ضریب پسا با استفاده از صفحات پشتی را نشان می دهد.



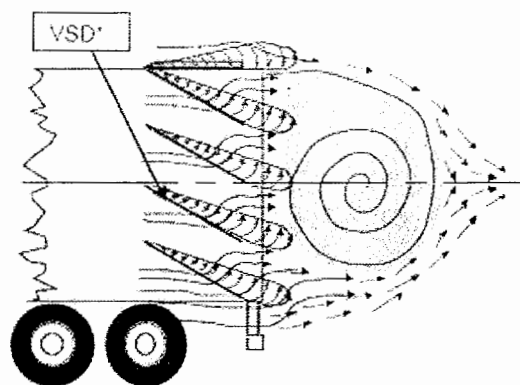
شکل ۲-۲۷: نمودار تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله در کامیون مجهز به صفحات پشتی، [۱۷]

دومین وسیله که برای بهبود جریان پشتی استفاده می شود به UFD^۱ معروف است. همانطور که در شکل ۲-۱۹ مشاهده می کنید، این وسیله در سطح زیرین تریلر و در نزدیکی لبه فرار نصب شده است، UFD به عنوان یک کانال همگرا عمل می کند که دهانه باز آن به سمت جلوی تریلر و دهانه محدود شده به سمت انتهای تریلر است.

^۱ Under Carriage Flow Device

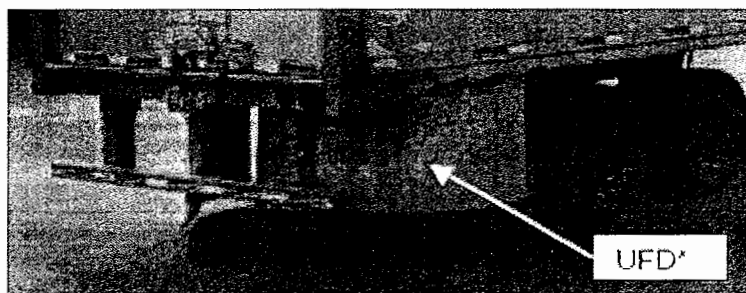


شکل ۲-۲۹: نحوه نصب UFD [۱۴]



شکل ۲-۲۸: نحوه عملکرد VSD [۱۴]

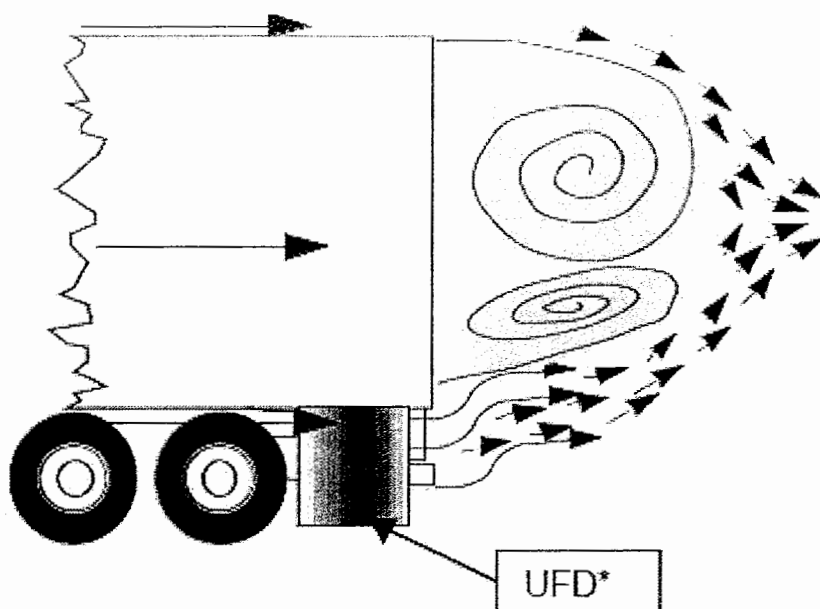
تبدیل جریان ضعیف زیرین تریلر (با اندازه حرکت کم) به جریان قوی (با اندازه حرکت زیاد) وظیفه این وسیله است. شکل ۲-۳۰ نشان دهنده نمونه آزمایشی UFD می باشد.



شکل ۲-۳۰: نحوه نصب UFD [۱۴]

شما تیک جریان حاصل از UFD و تاثیر آن بر جریان پستی را در شکل ۲-۳۱ ملاحظه می کنید. جریان سرعت گرفته که بوسیله UFD ایجاد شده است یک ساختار گردابه ای خلاف گرد ایجاد می نماید که گردابه اولیه را در جهت عمودی جابجا می کند. ترکیب دو گردابه ایجاد شده دنباله قایقی^۱ ایجاد می کند که چرخش جریانهای بالایی و کناری را کاهش می دهد و افزایش فشار در محدوده دنباله را به همراه دارد.

^۱ Boat tail

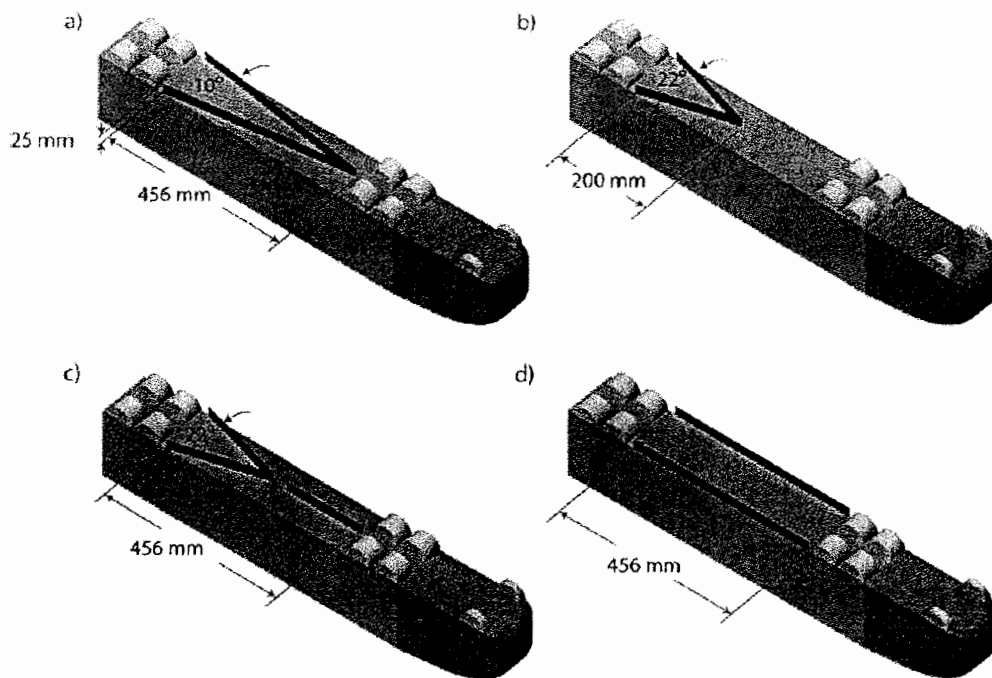


شکل ۲-۳۱: شماتیک جریان حاصل از عملکرد UFD [۱۴]

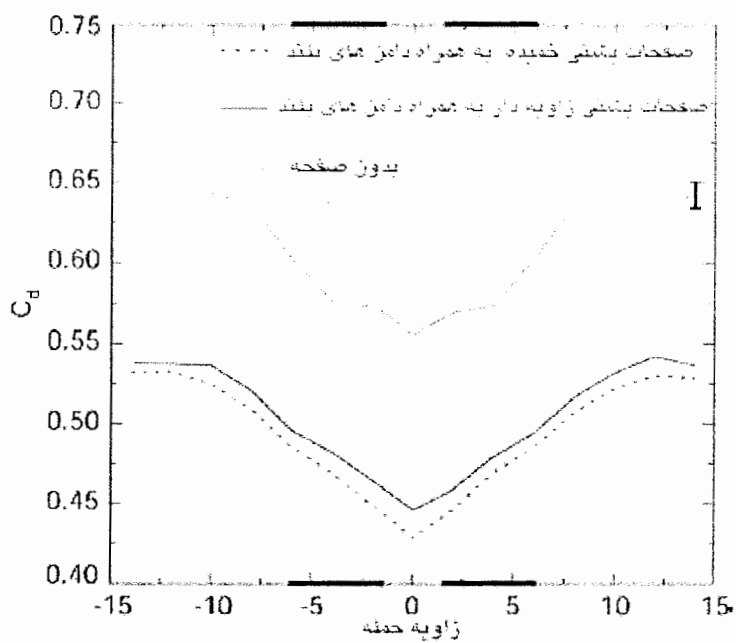
صفحه های جانبی، صفحاتی هستند که در طرفین و زیر تریلر نصب می شوند هرچند این صفحات سطح زیرین تریلر را از جریان اصلی تا حدی جدا می نمایند اما کاهش دسترسی راننده در مواقع لزوم به محور چرخ ها از مشکلات این روش است.

از جمله اصلاحاتی که در سطوح زیرین تریلر اعمال می شود دامن های تریلر^۱ هستند. آنها صفحات تختی هستند که در فاصله بین چرخ های عقب کشنده و چرخ های تریلر امتداد می یابند. عملکرد آنها باعث کاهش اغتشاش جریان در نواحی چرخ ها و محور مرکزی است. برای مطالعه بیشتر می توانید به مرجع [۲۶] مراجعه کنید.

^۱ Trailer Skirt

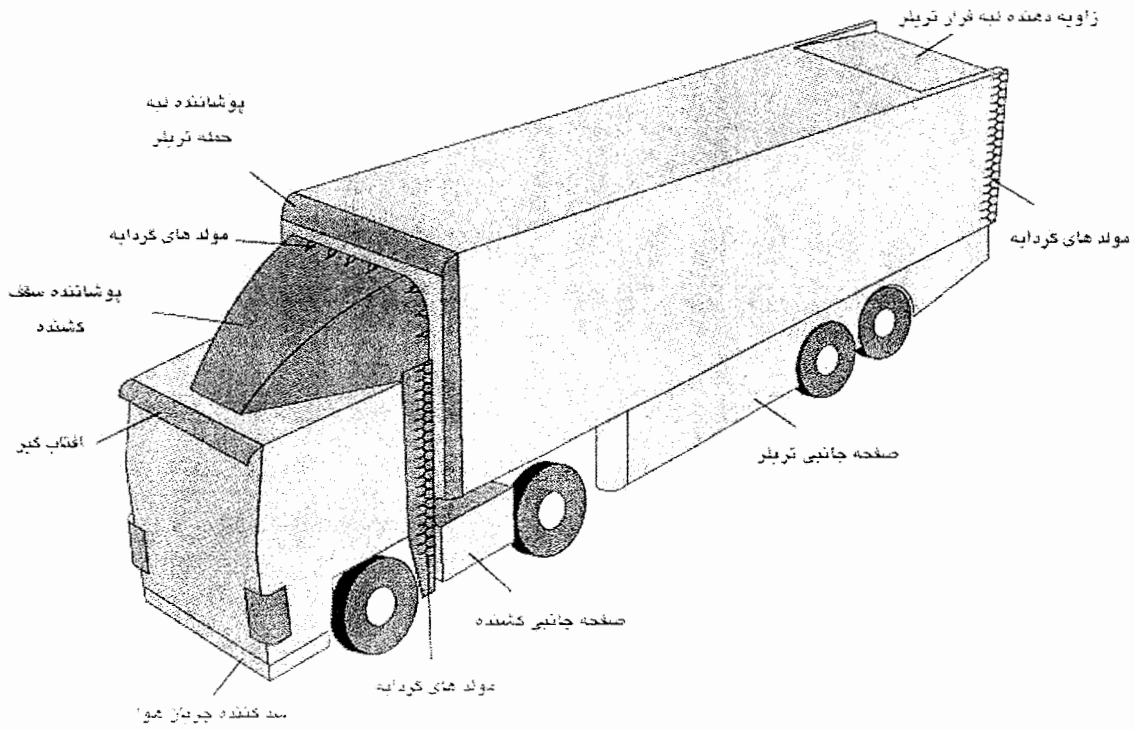


شکل ۲-۳۲: تنظیمات مختلف صفحات زیرین در حل عددی جریان [۱۷]



شکل ۲-۳۳: تاثیر استفاده هم‌زمان از صفحات پشتی و صفحات زیرین در زوایای حمله مختلف، [۱۷]

در شکل ۳۴-۲ چندین تمهید به کار رفته برای کاهش پسا را در کنار هم می بینیم.



شکل ۳۴-۲: تمهیدات قابل اجرا بر روی کشنده و تریلر متداول [۳۵]

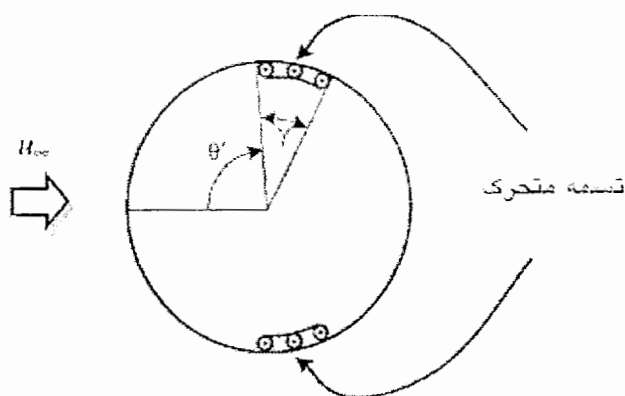
فصل سوم

بررسی تاثیر سطوح متحرک بر پسای کامیون

۳-۱ : پیشینه استفاده از سطوح متحرک در کاهش پسا

نظریه کاهش پسا با استفاده از تسمه متحرک که جایگزین دیواره ثابت در مجاورت لایه مرزی مغشوش شود، اولین بار توسط بچرت^۱ ارائه گردید [۳۲]. ایده اولیه از بین بردن شرط عدم لغزش در مرز دیواره بود با استفاده از دیواره متحرکی که انرژی حرکت خود را از تنش برشی سیال بگیرد. با نصب تسمه سر خورنده در کانال روغن مورد آزمایش اختلاف سرعت جریان اصلی با جریان مجاور دیواره کاهش یافت و کاهش ۹ درصدی در اصطکاک پوسته ای نیز حاصل گردید. سرعت تسمه بین ۶ تا ۱۲ درصد از سرعت جریان اصلی بسته به میزان کشیدگی تسمه متغیر بود.

در تحقیقی که در دانشگاه ملی سئول انجام شد، تسمه های مذکور روی بدنه سیلندر نصب شدند تا تاثیر آنها بر کاهش گرادیان فشار معکوس از طریق افزایش مومنوم سیال در محدوده جدایش بررسی گردد [۳۳]. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از سطح متحرک در کاهش پسای فشاری اجسام مختلف قابل استفاده است.



شکل ۳-۱: نحوه نصب تسمه متحرک بر روی سیلندر [۳۳]

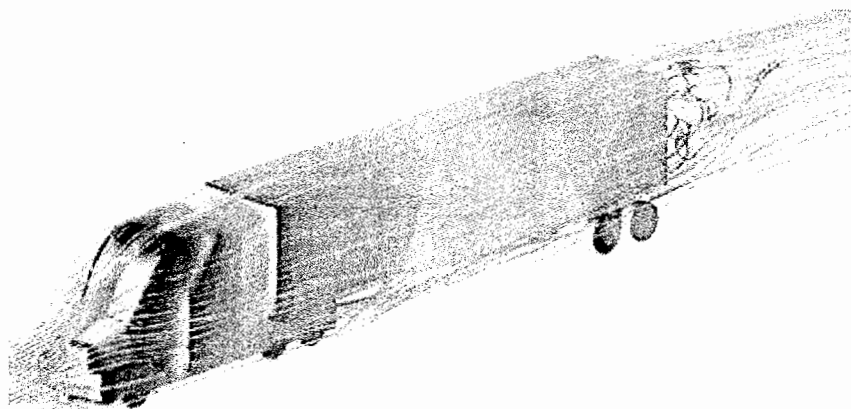
^۱ Bechert

۲-۳: حل عددی جریان اطراف کامیون

ابزارهای محاسبات دینامیک سیال در عرصه های گوناگون مهندسی که با جریان سیال (گاز یا مایع) سر و کار دارند در حال استاندارد شدن هستند. شبیه سازی عددی در هر دو فاز طراحی و تولید، مورد استفاده قرار می گیرد. در فاز طراحی به منظور انتخاب از بین روش های گوناگون و در فاز تولید برای تحلیل عملکرد روش به کار می رود.

استفاده صنعتی از CFD نیازمند انعطاف پذیری زیاد در تولید شبکه محاسباتی^۱ برای مسائل پیچیده و کاربری آسان است. هم اکنون چندین بسته نرم افزاری تجاری برای استفاده صنعتی CFD ارائه گردیده اند. این بسته های نرم افزاری معمولاً شامل یک تولید کننده شبکه، یک حلال سیال و یک آشکار ساز هستند. روش های حل مورد استفاده در حلال های سیال بهترین و قابل اعتمادترین روشهای ارائه شده در مجامع علمی هستند.

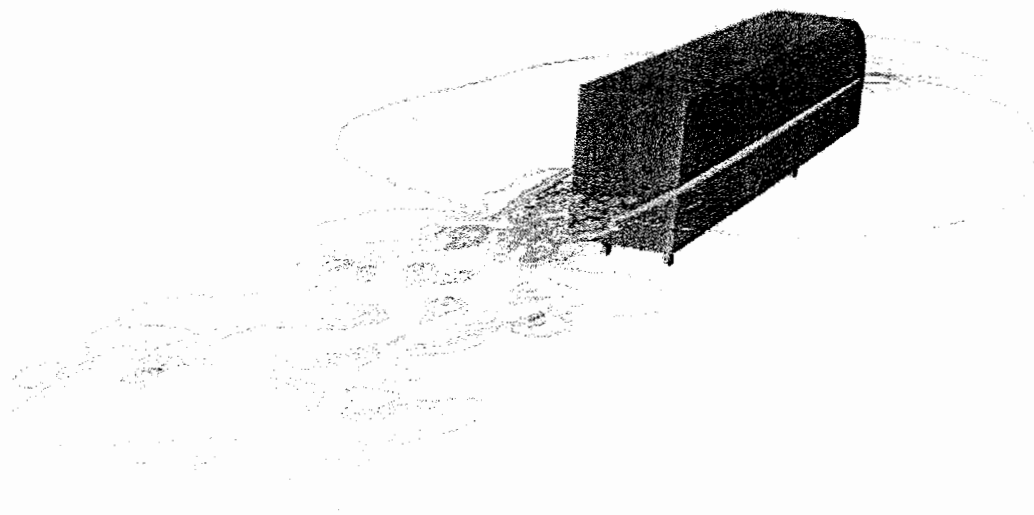
از جمله مقوله های مورد توجه در استفاده صنعتی از شبیه سازی عددی، مدل کردن جریان اطراف وسایل نقلیه به منظور برآورد ضریب پسا و در نهایت آزمودن روش های مختلف کاهش پسا با هزینه ای بسیار کمتر از روش های تجربی است.



شکل ۲-۳: شبیه سازی خطوط جریان اطراف کامیون [۱۹]

^۱ Grid

در بررسی انجام شده توسط آزمایشگاه ملی آرگونه^۱ [۱۹] چندین شبیه سازی انجام شده و با نتایج تجربی حاصل از تونل باد مقایسه شده اند. شرکت فلونت^۲ اخیراً اقدام به شبیه سازی کامیون کلاس ۸ نموده [۲۰] که توانایی این نرم افزار را به خوبی نشان می دهد (شکل ۳-۳).



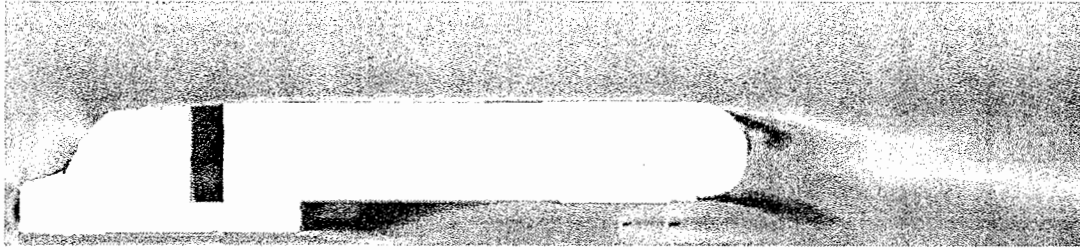
شکل ۳-۳: کانتور سرعت در صفحه میانی عمود بر تریلر [۲۰]

شکل ۳-۴ شبیه سازی جریان به منظور آزمودن تاثیر استفاده از سطح قابل تورم^۳ در انتهای تریلر را نشان می دهد.

^۱ Argonne National Laboratory

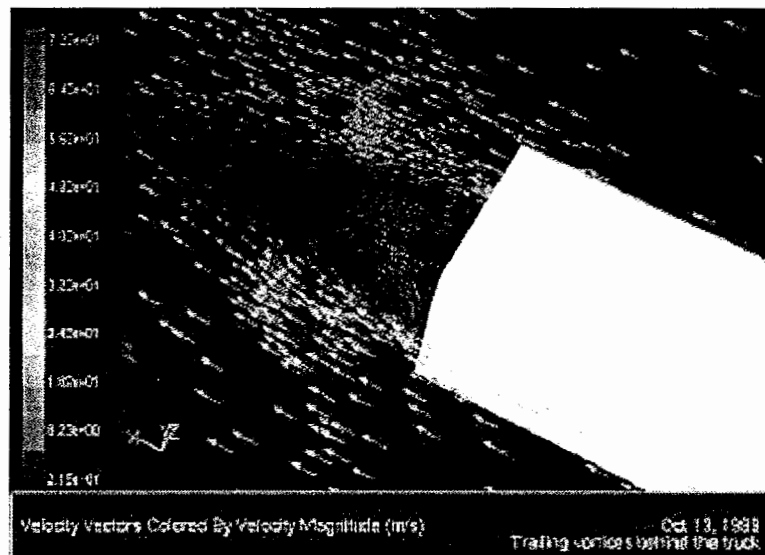
^۲ Fluent Co.

^۳ Inflatable Boat tail



شکل ۳-۴: کانتورهای فشار اطراف کامیون [۱۹]

در کار تحقیقی دیگر که توسط دانشگاه کترینگ^۱ انجام گرفت [۲۱] تاثیر شکل کامیون بر ضریب پسا بررسی شد. در شکل ۳-۵ گردابه پشتی حاصل از شبیه سازی عددی جریان کاملاً مشهود است.



شکل ۳-۵: بردارهای سرعت در گردابه پشتی [۲۱]

برای مطالعه بیشتر می توانید به مراجع [۲۰] تا [۲۵] مراجعه کنید.

^۱ Kettering University

۳-۳: مراحل شبیه سازی در نرم افزار Fluent^۱

برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های مختلف کاربرد دارد. این نرم افزار تحت زبان برنامه نویسی C نوشته شده و قابلیت عملکرد و انعطاف پذیری خوبی دارد.

مراحل حل یک مسئله به کمک نرم افزار Fluent :

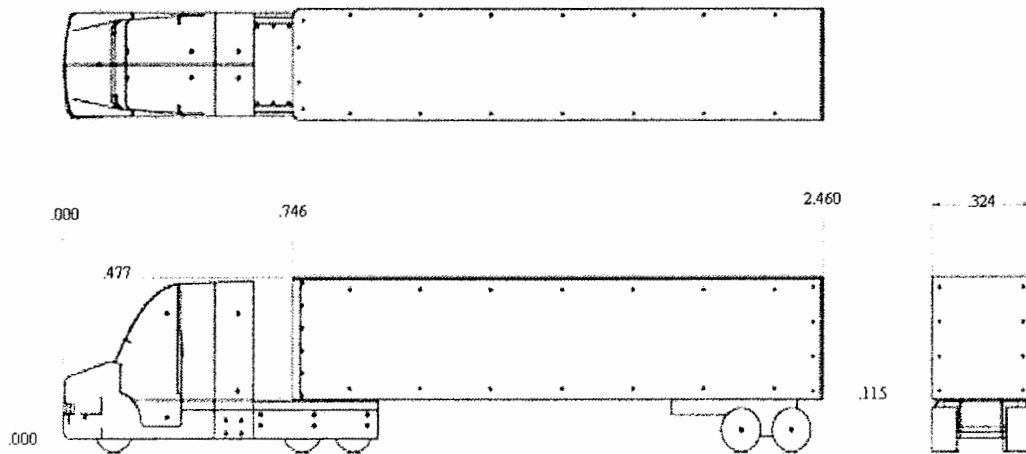
۱. تولید شکل (هندسه مساله)
۲. شبکه بندی در نرم افزارهای پیش پردازنده
۳. اجرای برنامه با توجه به هندسه (دو یا سه بعدی)
۴. انتقال شبکه از پیش پردازنده به نرم افزار محاسبه گر
۵. بررسی شبکه تولید شده
۶. انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل
۷. انتخاب معادلات اساسی که باید حل شوند مثل آرام یا مغشوش، لزج یا غیر لزج، واکنشهای شیمیایی محتمل و...
۸. تعیین خواص محیط های سیال
۹. تعیین شرایط مرزی
۱۰. تنظیم پارامترهای کنترل کننده حل
۱۱. مقدار دهی اولیه به میدان جریان
۱۲. شروع محاسبه

حال تمام مراحل انجام گرفته برای حل مسئله که شبیه سازی جریان حول یک مدل رایج از کامیون است تا رسیدن به نتیجه ذکر می شود.

^۱ در تهیه مطالب این بخش از مطالب مندرج در وب سایت شرکت Fluent استفاده گردیده است.

۳-۳-۱: تولید شکل (هندسه مساله)

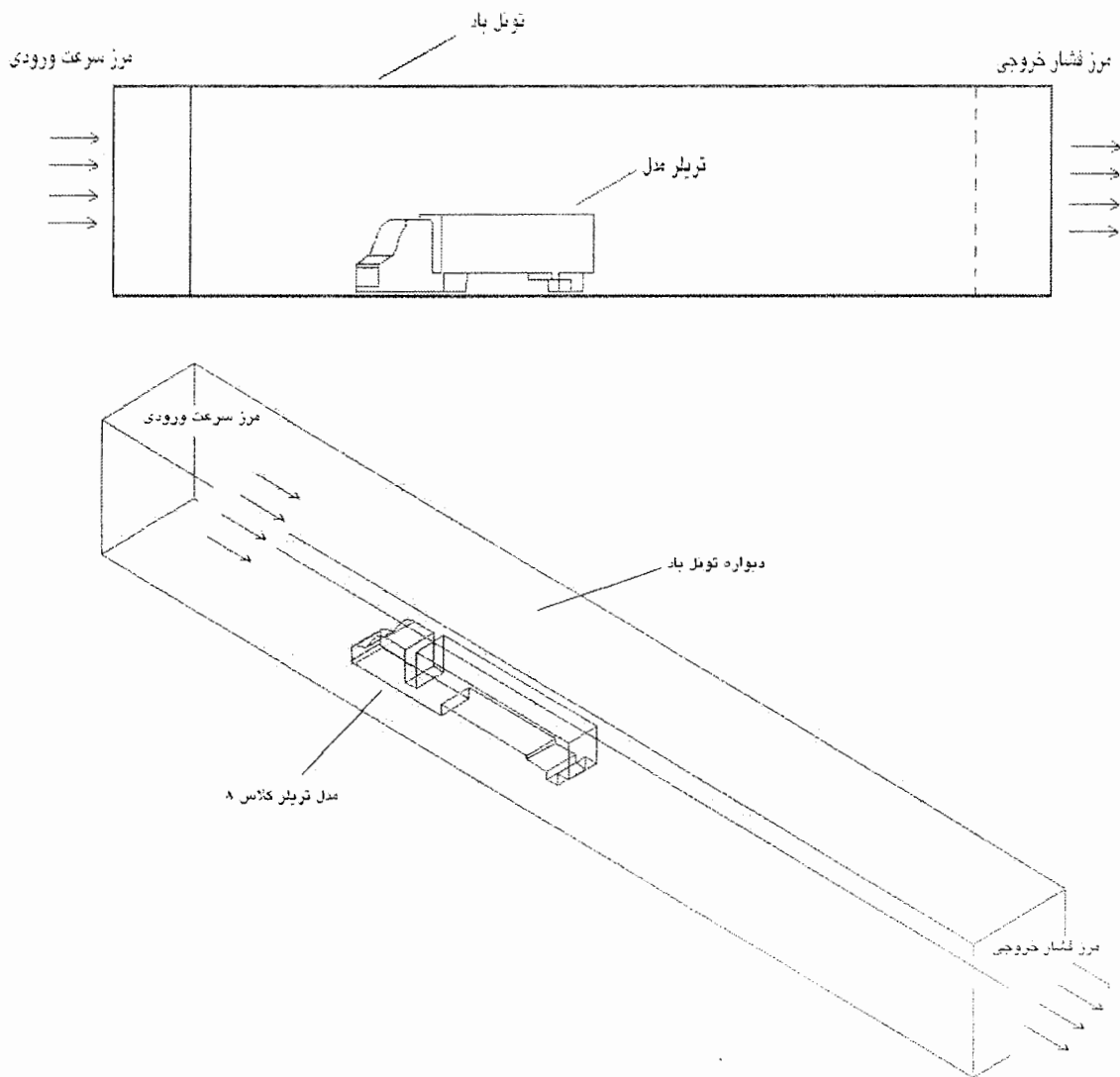
برای تولید هندسه و شبکه از نرم افزار کمکی Gambit که در بسته نرم افزاری Fluent موجود است استفاده شد. مدل مورد استفاده در آزمایشهای تونل باد یک مدل با ابعاد یک هشتم ابعاد واقعی کامیون می باشد. در شکل ۳-۵ ابعاد مدل کامیون مورد استفاده در آزمایشهای تونل باد مرکز تحقیقاتی ناسا^۱ [۲۷] که برای ایجاد هندسه در نرم افزار Gambit مورد استفاده قرار گرفت نمایش داده شده است.



شکل ۳-۶: ابعاد مدل مورد نظر در آزمایشهای تونل باد و در ساخت هندسه مسئله (متریک) [۲۷]

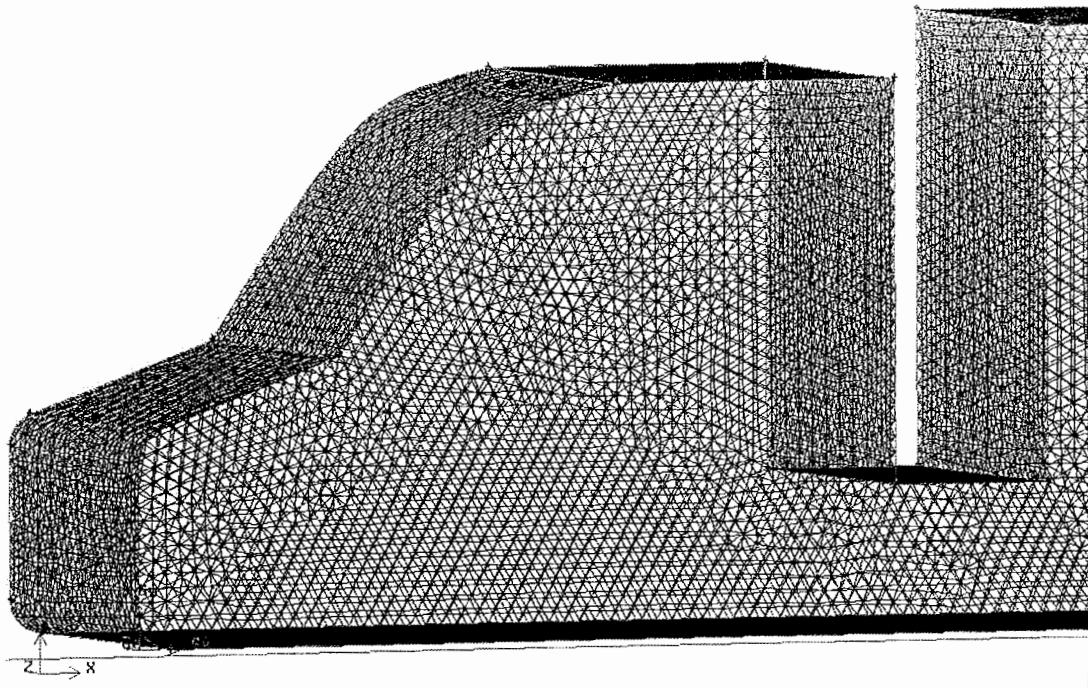
در شکل ۳-۷ موقعیت قرار گرفتن مدل کامیون و تونل باد نسبت به جریان سیال نشان داده شده است. در این شکل مرزهای دارای اهمیت که در تعریف شرایط مرزی باید در نظر گرفته شوند نیز مشخص گردیده اند.

^۱ NASA Ames Research centre



شکل ۳-۷: شماتیک موقعیت مدل و تونل باد

برای شبکه بندی از شبکه نوع Tet/Hybrid استفاده شد. برای این کار ابتدا سطوح کامیون و در نهایت حجم مورد نظر شبکه بندی شدند. در شکل ۳-۸ سطح شبکه بندی شده کِشنده را ملاحظه می کنید.



شکل ۳-۸: نمونه هندسه ایجاد شده، نشان دهنده قسمت کِشنده و فاصله بین تریلر و کِشنده

۳-۳-۲: بررسی شبکه تولید شده

در این مرحله پس از وارد نمودن هندسه ایجاد شده به نرم افزار Fluent شبکه ایجاد شده کنترل می شود تا از عدم وجود سلولهای معیوب و شبکه های گسسته اطمینان حاصل شود. همانطور که در گزارش گرفته شده از نرم افزار (پیوست ۱) مشاهده می نماید، محدوده محاسبات طبق جدول ۳-۱ است.

جدول ۳-۱: محدوده محاسبات

X min (m)	-۲/۵۴	X max (m)	۷/۶۲
Y min (m)	-۰/۰۳۸۱	Y max (m)	۱/۲۷
Z min (m)	-۰/۳۸۱	Z max (m)	۰/۶۹۸۵

کوچکترین حجم کنترلی ایجاد شده در نزدیکی بدنه مدل است که $m^2 \times 10^{-8} \times 6/31251$ و بزرگترین حجم کنترل در نزدیکی دیواره های تونل باد $m^2 \times 10^{-4} \times 1/887407$ می باشد. فاصله مدل از دیواره های تونل باد پس از چندین بار آزمون موقعیت آنها در نهایت به گونه ای انتخاب شد که با در نظر گرفتن اولویت عدم تاثیر گذاری دیواره ها بر جریان حول مدل از بزرگی بیش از اندازه محدوده پرهیز شود که خود می توانست موجب افزایش هزینه و زمان محاسباتی گردد.

۳-۳-۳: انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل

در این مسئله از حل کننده تفکیکی برای انجام محاسبات استفاده شده و همانطور که از فیزیک مسئله برداشت می شود نیاز به حل غیر دائم وجود ندارد. Fluent انتخاب هر یک از دو روش زیر را ممکن می سازد:

الف) حل کننده تفکیکی^۱

ب) حل کننده پیوسته^۲

با استفاده از روشهای fluent معادلات انتگرالی بقای جرم و مومنتوم قابل حل می باشند و (زمانی که لازم باشد) معادلات انرژی و دیگر اسکالرها مانند اغتشاش و معادلات مربوط به فعل و انفعالات شیمیایی نیز قابل حل هستند.

در هر دو مورد از یک تفکیک حجم کنترلی استفاده می شود که شامل فرایند ذیل می باشد:

- (۱) تقسیم دامنه به حجمهای کنترلی جداگانه با استفاده از یک شبکه بندی محاسباتی
- (۲) انتگرال گیری معادلات در هر یک از حجمهای کنترلی برای ایجاد معادلات جبری با متغیرهای وابسته (مجهولات) مانند سرعت، فشار، دما و اسکالرهایی مانند جرم و انرژی

^۱ Segregated
^۲ Coupled

۳) خطی سازی معادلات مستقل و حل این سیستم معادلات خطی برای دستیابی به مقادیر جدید متغیرهای وابسته

در این دو روش عددی از یک فرایند تفکیک استفاده می شود (حجم محدود). اما فرایند مورد استفاده برای خطی سازی و حل معادلات تفکیک یافته متفاوت است.

الف) روش حل تفکیکی

با استفاده از این روش معادلات حاکم به ترتیب حل خواهند شد (یعنی از یکدیگر تفکیک می شوند). از آنجایی که معادلات خطی نیستند و پیوسته اند، چندین تکرار در حلقه فرایند حل قبل از به دست آوردن حل همگرا باید انجام گیرد:

(۱) مقادیر خواص سیال براساس حل مورد نظر جایگزین می شوند (اگر محاسبات در این لحظه شروع شود مقادیر خواص سیال براساس حل اولیه تجدید خواهند شد).

(۲) معادلات مومنت w, v, u هر یک به نوبت با استفاده از مقادیر فشار و جریانهای جرمی حل خواهند شد تا مقادیر سرعت تجدید شوند. از آنجا که سرعتهایی که در مرحله یک به دست آمده اند ممکن است به طور موضعی در معادلات پیوستگی صدق نکنند، یک معادله پواسون^۱ برای اصلاح فشار از معادله پیوستگی و معادلات خطی شده مومنت به دست می آید. این معادله اصلاح فشار حل می شود تا بر روی مقادیر سرعت و فشار و جریانهای جرمی اصلاحات لازم به عمل آیند و معادلات پیوستگی ارضاء شوند.

(۳) در جای مناسب، معادلات اسکالرهایی نظیر اغتشاش، انرژی، اجزاء شیمیایی و تشعشع با استفاده از مقادیر تجدید یافته قبلی که از متغیرهای دیگر به دست آمده اند، حل می شوند.

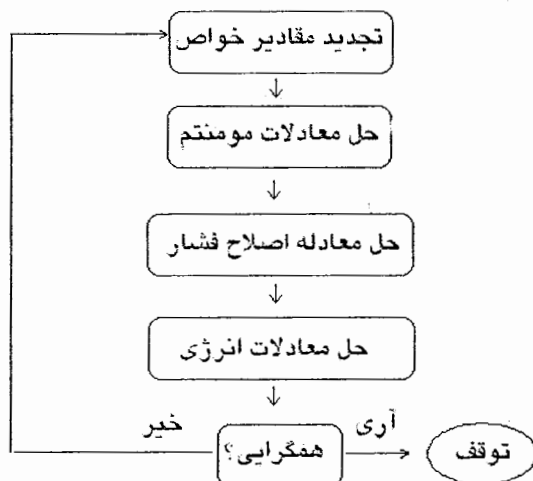
^۱ Poisson-type

۴) زمانی که بایستی وابستگی بین فازی در نظر گرفته شود، ترمهای منبع در معادلات فاز

پیوسته ممکن است با یک محاسبه در مسیر فاز مجزا تجدید گردند.

۵) ایجاد یک تست همگرایی برای معادله.

این مراحل ادامه می یابد تا همگرایی حاصل شود.

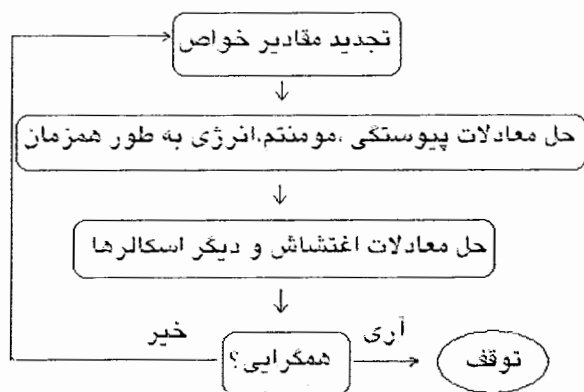


شکل ۳-۹: مراحل حل تفکیکی

ب) روش حل پیوسته

با استفاده از این روش معادلات حاکم بر جریان شامل پیوستگی، مومنتم و (در جای مناسب) انرژی و

اجزاء شیمیایی به طور هم زمان حل می شوند (یعنی به یکدیگر پیوسته اند).



شکل ۳-۱۰: مراحل حل پیوسته

معادلات حاکم بر اسکالره‌های اضافه در ادامه با استفاده از روشی که برای حل کننده تفکیکی توضیح داده شد، حل خواهند شد (یعنی به صورت جدا از یکدیگر و جدا از مجموعه پیوسته).

از آنجا که معادلات غیر خطی اند (و پیوسته اند) چندین تکرار در حلقه فرایند حل، قبل از به دست آوردن حل همگرا، باید انجام گیرد. هر تکرار شامل مراحل است که در زیر توضیح داده شده اند:

۱. مقادیر جدید خواص سیال بر اساس حل مورد نظر جایگزین می شود (اگر محاسبات در

این لحظه شروع شود، مقادیر خواص سیال بر اساس حل اولیه تجدید خواهد شد).

۲. معادلات پیوسته و مومنتم و (در جای مناسب) انرژی و اجزاء شیمیایی به طور هم زمان حل می شوند.

۳. در جای مناسب معادلات اسکالرهایی نظیر اغتشاش و تشعشع با استفاده از مقادیر تجدید یافته قبلی که از متغیرهای دیگر به دست آمده اند، حل می شوند.

۴. زمانی که بایستی وابستگی بین فازی در نظر گرفته شود، ترمهای منبع در معادلات فاز پیوسته ممکن است با یک محاسبه در مسیر فاز مجزا تجدید گردند.

۵. ایجاد یک تست همگرایی برای معادله.

این مراحل ادامه می یابد تا همگرایی حاصل شود.

در هر دو روش حل تفکیکی و پیوسته معادلات غیر خطی، وابسته خطی می شوند تا سیستمی از معادلات برای متغیرهای مستقل در هر سلول محاسباتی ایجاد کنند، سپس سیستم خطی ایجاد شده حل می شود تا مقادیر جدید جریان ایجاد شود. روشی که در آن معادلات حاکم خطی می گردد، ممکن است بر اساس متغیر وابسته (با یک گروه متغیر) مورد نظر، فرم ضمنی یا صریح داشته باشد. این دو روش در زیر شرح داده شده اند:

(۱) روش ضمنی: برای یک متغیر مورد نظر مقدار مجهول در هر سلول با استفاده از یک رابطه که شامل مقادیر مجهول و معلوم سلولهای مجاور است محاسبه می گردد. پس هر مجهول در بیش از یک معادله در سیستم به چشم می خورد و این معادلات باید به طور هم زمان حل شوند تا مقادیر مجهول به دست آیند.

(۲) روش صریح: برای یک متغیر مورد نظر مقدار مجهول در هر سلول با استفاده از یک رابطه که تنها شامل مقادیر معلوم است محاسبه می گردد. بنابر این هر مجهول تنها در یک معادله از سیستم ظاهر می گردد و معادلات برای مقدار مجهول در هر سلول در زمان مشخص قابل حل است تا مقادیر مجهول به دست آید. در روش حل تفکیکی، هر یک از معادلات حاکم، به روش ضمنی براساس متغیر وابسته معادله، خطی می گردد. در نتیجه سیستمی از معادلات خطی (برای هر سلول یک معادله) در دامنه حاصل می شود. از آنجائیکه تنها یک معادله برای هر سلول وجود دارد، این سیستم را سیستم معادلات اسکالر می نامند.

۳-۳-۴: انتخاب معادلات اساسی

معادلات اساسی مورد استناد همان معادلات ناویر استوکس برای جریان سیال می باشند. به علت اینکه محدوده سرعت سیال از ماخ تجاوز نمی کند شکل تراکم ناپذیر معادلات مورد استفاده قرار می گیرد که ساده سازی قابل ملاحظه ای در روند حل ایجاد می نماید ($\rho = cte$). همانطور که پیشتر ذکر شد ماهیت مسئله دائم است (هرچند در یک وضعیت (شرایط دیواره های ساکن) حل غیر دائم نیز انجام می شود) و به این ترتیب مشتقات زمانی کمیتها نیز اهمیت خود را از دست می دهند. و در نهایت معادلات مذکور به شکل زیر در می آیند :

$$۱. \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = ۰$$

معادله پیوستگی

$$۲. u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_i) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_j}$$

معادلات مومنوم

از آنجائیکه محدوده عدد رینولدز جریان در مسئله مورد نظر عملاً به اندازه ای بالا است که ورود جریان به وضعیت اغتشاشی اجتناب ناپذیر است و نمی توان تاثیرات مهم اغتشاش در رفتارهای سیال را نادیده گرفت باید مدل اغتشاشی مناسبی برای حل جریان منظور گردد.

متأسفانه هیچ مدل اغتشاشی جهان شمولی که تمامی مسائل را پوشش دهد وجود ندارد. انتخاب مدل اغتشاشی به مواردی نظیر فیزیک جریان، دقت مورد نیاز مسئله، منابع محاسباتی موجود و هزینه زمانی ممکن برای شبیه سازی بستگی دارد. برای انجام بهترین انتخاب از بین مدل های رایج ابتدا باید امتیازات و معایب هر مدل به خوبی بررسی شود. حل کامل معادلات دقیق ناویر استوکس برای جریان های مغشوش، اعداد رینولدز بالا و هندسه های پیچیده به زودی میسر نخواهد بود. دو روش جایگزین برای تبدیل معادلات ناویر استوکس به گونه ای که لزوم محاسبه مستقیم نوسانات کوچک اغتشاشی از بین برود، مورد استفاده قرار می گیرند.

روش رینولدز متوسط و روش فیلتر کردن. در هر دو روش ترم های اضافی وارد معادلات اساسی می شوند که به منظور دستیابی به همگرایی^۱ باید مدل شوند. منظور از رسیدن به همگرایی وجود معادلات کافی به ازای تمام مجهولات است. معادلات رینولدز متوسط ناویر استوکس بیانگر معادلات جابجایی برای مقادیر جریان اصلی^۲ به همراه تمامی معیارهای اغتشاشی مدل شده می باشد.

اگر جریان اصلی دائمی^۳ باشد، معادلات حاکم ترم های زمانی را شامل نمی شوند، در این حالت یک حل دائم و بسیار اقتصادی حاصل می شود. روش متوسط رینولدز عموماً برای محاسبات کاربردی

^۱ Closure

^۲ Mean Flow

^۳ Steady

مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد و شامل مدل هایی مانند Spalart-Allmaras، انواع $k - \epsilon$ و RSM می باشد. روش دیگر موسوم به LES است که در این روش گردابه های^۱ بزرگ در یک شبیه سازی وابسته به زمان محاسبه می شوند. مجموعه ای از معادلات به کار گرفته شده عملاً فیلتر کردن گردابه ها را انجام می دهند. به عبارتی عمل فیلتر کردن، شکل دهی معادلات دقیق ناویر استوکس است به منظور حذف گردابه های کوچکتر از فیلتر که اندازه شبکه انتخاب شده است.

مانند روش متوسط رینولدز در این روش نیز ترم های مجهول جدید تولید می شوند که باید برای رسیدن به همگرایی مدل شوند. اطلاعات آماری جریان اصلی که غالباً بخش مورد توجه مهندسیین است در جریان شبیه سازی وابسته به زمان قابل استحصال می باشند. جذابیت این روش (LES) در این است که با کاهش مدل کردن اغتشاش (حل بیشتر) خطای پنهان در مدل اغتشاشی کاهش می یابد. باید این واقیت را پذیرفت که کاربرد روش LES در گام های نخستین خود می باشد و تا استفاده صنعتی راه زیادی پیش رو دارد. شاید نیاز به استفاده از پردازشگر های قوی برای تشخیص گردابه های بزرگ حامل انرژی و همچنین توابع دیواره مورد استفاده در LES که نیاز به معتبر سازی بیشتری دارند، دلایل کندی پیشرفت این روش باشند.

در مسئله مورد نظر، روش $k - \epsilon$ با کمک توابع استاندارد دیواره^۲ برای تصحیح خطای محاسبات در نزدیکی دیواره مورد استفاده قرار گرفت. معادله (۳) مربوط به انرژی جنبشی اغتشاشی^۳ (k) و معادله (۴) مربوط به نرخ اتلاف اغتشاشی^۴ (ϵ) می باشد :

^۱ Eddy

^۲ Standard Wall Functions

^۳ Turbulent kinetic Energy

^۴ Turbulent Dissipation Rate

$$(\gamma) u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - D$$

$$(\varepsilon) u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{f_\nu C_\varepsilon P - f_\nu C_\varepsilon \varepsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + E$$

لزجت گردابه ای از رابطه زیر به دست می آید:

$$\nu_t = C_\mu f_\mu k T$$

توابع خنثی کننده^۱ f_ν ، f_μ ، f_ε و معیار زمانی^۲ T و ترم های اضافی D و E از روابط زیر تبعیت می کنند:

$$f_\nu = 1 \quad D = \gamma \nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_n} \right)^2$$

$$f_\mu = 1 - 0.4 \exp(-\text{Re}_t^\gamma)$$

$$f_\varepsilon = \exp\left(-\frac{\gamma}{1 + 0.4 \text{Re}_t^\gamma}\right) \quad E = \gamma \nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2$$

$$T = k / \varepsilon$$

در حالی که $\text{Re}_t = k^2 / \nu \varepsilon$ عدد رینولدز اغتشاشی است و x_n جهت عمود به دیواره ها است. شدت اغتشاش^۳ برای تونل بادی مانند آنچه در این مسئله مد نظر قرار دارد حدود ۷ درصد فرض می شود.

^۱ Damping functions

^۲ Time scale

^۳ Turbulent intensity

۳-۳-۵: تعیین خواص سیال عامل

سیال عامل، هوا در نظر گرفته شد و خواص آن بر طبق جدول ۳-۲ تنظیم گردید.

جدول ۳-۲: خواص سیال عامل

Name	Air
Density ($\frac{kg}{m^3}$)	۱/۲۲۵
Viscosity ($\frac{kg}{m.s}$)	۱۷۸۹۴۰
Cp ($\frac{j}{kg.k}$)	۱۰۰۶/۴۳
Thermal conductivity ($\frac{w}{m.k}$)	۰/۰۲۴۲

۳-۳-۶: تعیین شرایط مرزی

مرزهای تعیین کننده در تحلیل جریان به شرح زیر می باشند:

الف) مرز دیواره: مرزهای جامد شامل دیواره های جانبی تونل باد و بدنه تریلر

دیواره های جانبی و بدنه تریلر سطوح جامد و غیر قابل نفوذ هستند که باید شرایط عدم لغزش را ارضاء کنند. برای این منظور شرط مرزی دیواره تبیین شده که قابلیت تعریف مرز حرارتی برای محاسبات انتقال حرارت، مرز برشی برای دیواره های لغزنده، مرز سرعتی برای دیواره های متحرک، مرز زبر برای جریان های مغشوش، مرز واکنش دهنده برای دیواره های دارای واکنش شیمیایی، مرز تشعشعی و غیره را دارد. چون ماهیت جریان مسئله، ورود به محدوده اغتشاشی را گریز ناپذیر می نماید ($Re > 10^5$) و در محاسبه پسای پوسته ای زبری سطح مد نظر است لذا

ارتفاع زبری سطح (K_s) در هر دو حالت دیواره ثابت و متحرک منظور گردید. لازم به ذکر است که زبری یکنواخت و دانه ماسه ای^۱ فرض می شود که K_s همان ارتفاع برجستگی ها است.

ب) مرز ورودی سرعت^۲: مرز ورودی جریان سیال به تونل باد

چون سرعت سیال به ماخ واحد نمی رسد، سیال غیر قابل تراکم فرض می شود. برای تعیین سرعت و مشخصات اغتشاشی سیال در ورودی جریان غیر قابل تراکم بهترین شرط مرزی قابل استفاده، مرز ورودی سرعت است.

باید دقت داشت که مرز ورودی سرعت نباید خیلی نزدیک به یک دیواره جامد تعریف شود زیرا باعث غیر یکنواختی شدید سیال در ورود می شود. در تعریف این شرط مرزی خصوصیات کلی جریان ثابت نمی شوند لذا میدان جریان آنقدرافزایش می یابد تا توزیع سرعت مشخص شده حاصل گردد. استفاده از این شرط مرزی برای جریان تراکم پذیر به جواب های غیر فیزیکی منتهی می شود.

ج) مرز خروجی فشار^۳: مرز خروجی جریان از تونل باد

در شرایط جریان مادون صوت مشخص نمودن فشار ایستایی^۴ در مرز خروجی لازم است. در جریان مافوق صوت فشار و سایر مشخصه های جریان از برون یابی جریان داخلی به دست می آیند.

^۱ Sand Grain
^۲ Velocity Inlet
^۳ Pressure Outlet
^۴ Static Pressure

۷-۳-۳: تعیین مقادیر اولیه

قطر هیدرولیکی مدل کامیون از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$D_H = \frac{\sum V}{A} = \frac{4 \times 0.47 \times 2 / 46 \times 0.32}{2 \times (0.32 \times 0.47 + 2 / 46 \times 0.32 + 2 / 46 \times 0.47)} \approx 0.35 \text{ m}$$

برای طول مشخصه (l) داریم:

$$l = I \times D_H$$

شدت اغتشاش (I) برای تونل باد بین ۵ تا ۱۰ درصد منظور می شود که در این مسئله ۷ درصد فرض گردید. در نتیجه:

$$l = 0.07 \times 0.35 \approx 0.025 \text{ m}$$

عدد رینولز جریان از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Re_{D_H} = \frac{\rho \cdot u_{Ave} \cdot D_H}{\mu} = \frac{1.225 \times 30 \times 0.35}{1.789 \times 10^{-4}} = 7.1 \times 10^6$$

انرژی جنبشی اغتشاشی (K)، لزجت اغتشاشی (\bar{v}) و نرخ اتلاف اغتشاشی (ε) از روابط زیر به دست می آیند:

$$K = \frac{3}{2} \cdot (u_{Ave} \cdot I)^2 = \frac{3}{2} \cdot (30 \times 0.07)^2 = 6.615$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot u_{Ave} \cdot I \cdot l = \sqrt{\frac{3}{2}} \times 30 \times 0.07 \times 0.025 = 0.65$$

$$\varepsilon = C_{\mu}^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{K^{\frac{2}{3}}}{l} = (0.09)^{\frac{2}{3}} \times \frac{(6.615)^{\frac{2}{3}}}{0.025} = 93$$

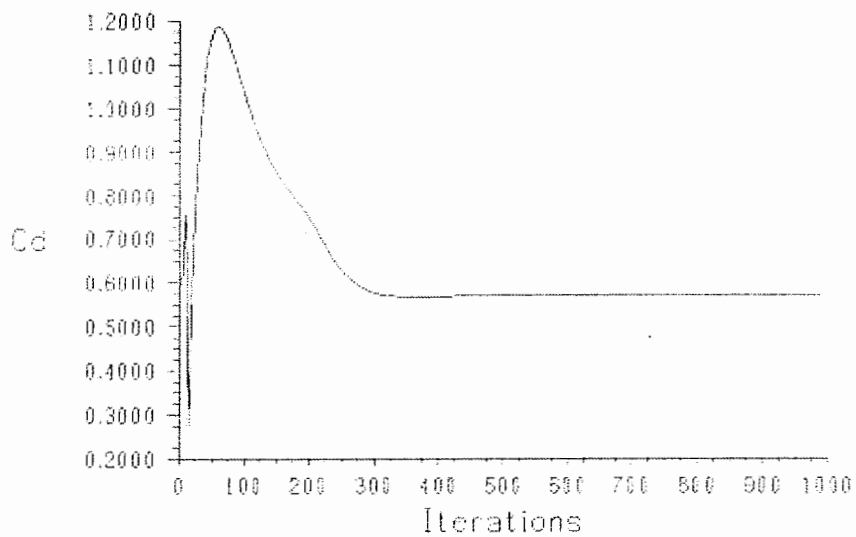
¹ Turbulence intensity

بدین ترتیب مقادیر اولیه طبق جدول ۳-۳ تنظیم گردیدند.

جدول ۳-۳: مقادیر اولیه متغیرها

Gauge Pressure	۰	Pascal
X, Y, Z Velocity	۰	m/s
Turbulence Kinetic Energy	۶/۶۱۵	$\frac{m^2}{s^2}$
Turbulence Dissipation Rate	۹۳	$\frac{m^2}{s^3}$

همانطور که در شکل ۱۱-۳ مشهود است همگرایی ضریب پسا پس از ۴۰۰ تکرار حاصل گردیده است.



Drag Convergence History

Jun 14, 2006
FLUENT 6.0 (3d, segregated, rke)

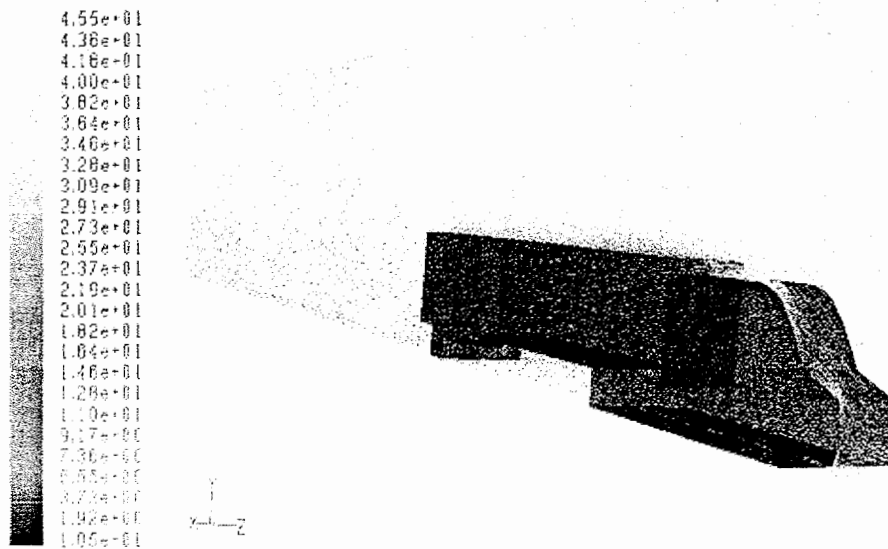
شکل ۱۱-۳: نمودار همگرایی ضریب پسا پس از ۱۰۰۰ مرتبه تکرار

فصل چهارم

نتایج تحقیق

۱-۴: تنظیمات سرعت صفحات متحرک

پس از انجام تنظیمات لازم و مقدار دهی اولیه نوبت به حل معادلات با تکرار های بسیار تا رسیدن به همگرایی (باقیمانده های) مورد نظر می رسد. پسای آیرودینامیکی در چهار وضعیت مختلف از تسمه های متحرک اندازه گیری شده اند. در تمام حالات سرعت سیال نسبت به تریلر به $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ ثابت نگه داشته می شود.



شکل ۱-۴: بردارهای سرعت در اطراف کامیون

۱-۱-۴: سقف و سطح پشتی تریلر ثابت

وضعیت اول به گونه ای در نظر گرفته می شود که تسمه های سقف و پشت تریلر ثابت باشند

($V_b = 0 \frac{m}{s}$, $V_r = 0 \frac{m}{s}$). پسای آیرودینامیکی^۱ اندازه گیری شده در این وضعیت به مقادیر حاصل

از آزمایش های مرکز تحقیقات ناسا^۲ [۲۸] بسیار نزدیک است. همانطور که در مرجع [۲۸] صفحه یک

^۱ Aerodynamic Drag

^۲ NASA Ames Research Centre

مشهود است، پسای آیرودینامیکی اندازه گیری شده برای یک کامیونت و تریلر کلاس ۸ در حدود $C_d = 0.16$ می باشد. نتایج حاصل را در جدول ۴-۱ ملاحظه می کنید.

جدول ۴-۱: مقادیر پسا برای حالتی که $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_b = 0 \frac{m}{s}$

ضریب پسای فشاری	۰/۵۲۵۵۰۲۷۸
ضریب پسای لزجی	۰/۰۴۵۱۶۹۵۱۸
ضریب پسای کلی	۰/۵۷۰۶۷۲۳

۴-۱-۲: سقف متحرک و سطح پشتی ثابت

در این حالت تسمه سقف را به حرکت در می آوریم تا به سرعت ثابت $V_r = 30 \frac{m}{s}$ برسد (در جهت

جریان) و تسمه پشتی را بدون حرکت نگه می داریم ($V_b = 0 \frac{m}{s}$). پسای کلی در این حالت کاهش

۱/۵ درصدی نشان می دهد. جدول ۴-۲ بیانگر نتایج این تنظیم است.

جدول ۴-۲: مقادیر پسا برای حالتی که $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$ و $V_r = 30 \frac{m}{s}$ و $V_b = 0 \frac{m}{s}$

ضریب پسای فشاری	۰/۵۲۶۳۲۵۴۹
ضریب پسای لزجی	۰/۰۳۵۰۷۱۲۷
ضریب پسای کلی	۰/۵۶۱۳۹۶۷۶

۳-۱-۴: سقف ثابت و سطح پشتی متحرک

در گام بعدی تسمه پشتی را حرکت می دهیم تا به سرعت ثابت $V_b = 20 \frac{m}{s}$ در جهت عمود بر جریان و به سمت بالا برسد در حالی که تسمه سقف بی حرکت است. در این حالت ضریب پسا هیچ کاهشی نشان نمی دهد. جدول ۳-۴ بیانگر این حالت است.

جدول ۳-۴: مقادیر پسا برای حالتی که $V_b = 20 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$

ضریب پسای فشاری	۰/۵۲۵۵۰۲۷۸
ضریب پسای لزجی	۰/۰۴۵۱۶۹۵۱۸
ضریب پسای کلی	۰/۵۷۰۶۷۲۳

با حرکت دادن تسمه پشتی در جهت عمود بر جریان اصلی و به سمت پایین تا به سرعت $V_b = -20 \frac{m}{s}$ برسد در حالی که تسمه سقف ثابت است، پسای کلی کمتر از ۰/۵ درصد کاهش می یابد. جدول ۴-۴ نشان دهنده این وضعیت است.

جدول ۴-۴: مقادیر پسا برای حالتی که $V_b = -20 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$

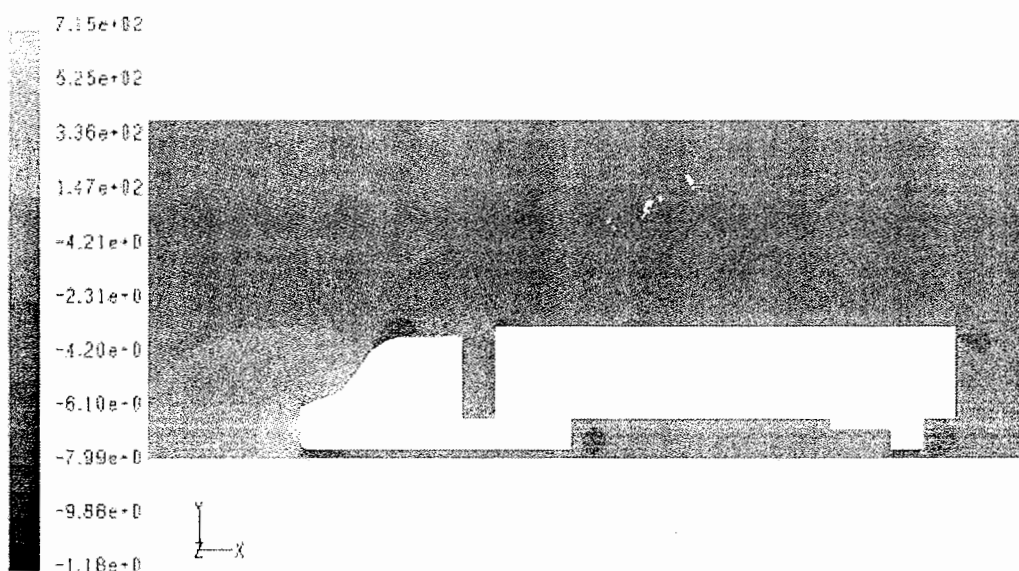
ضریب پسای فشاری	۰/۵۲۴۳۷۰۷۱
ضریب پسای لزجی	۰/۰۴۵۲۵۵۱۱
ضریب پسای کلی	۰/۵۶۹۵۲۵۸۲

۴-۱-۴: نتیجه

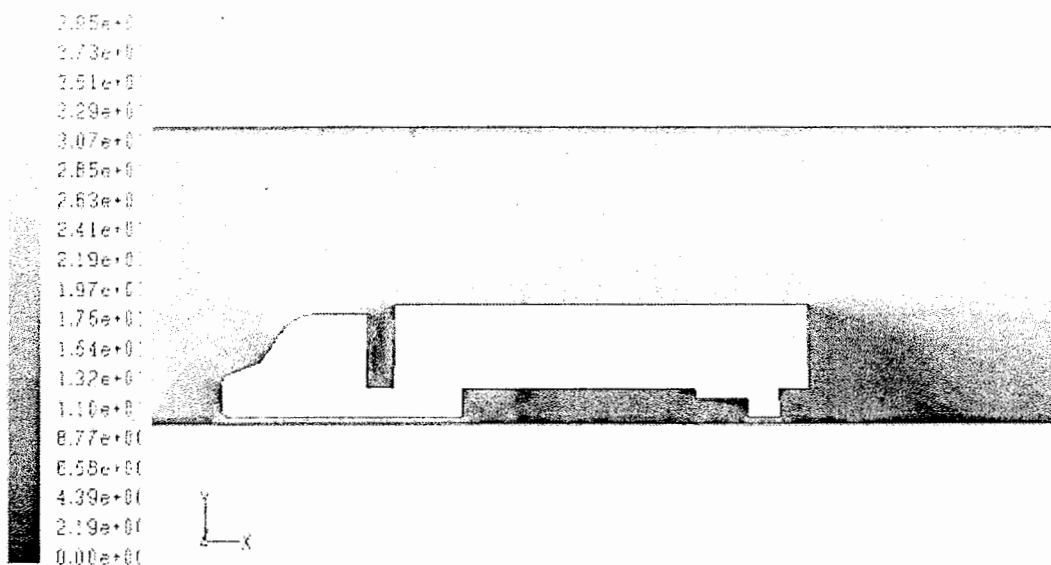
هدف از انجام این تحقیق بررسی تاثیر متحرک سازی سطح در کاهش پسای آیرودینامیکی بود. انتخاب کامیون کلاس ۸ به دو دلیل انجام گرفت. اول اینکه دارای سطوح صاف و بزرگ بود و دوم گردابه بزرگ که در پشت آن ایجاد می شد. حرکت سطوح می توانست با کاهش در مقاومت لزجی سطح و تغییر در اندازه گردابه پشتی بر پسای آیرودینامیکی تاثیر گذارد. اما نتایج تحلیل عددی نشان داد که استفاده از سطوح متحرک به شکلی که در تحقیق ارائه گردید کاهش چشمگیری در پسای آیرودینامیکی ایجاد نمی کند.

۲-۴: تصاویر میدان جریان حاصل از تحلیل عددی حالت دائم

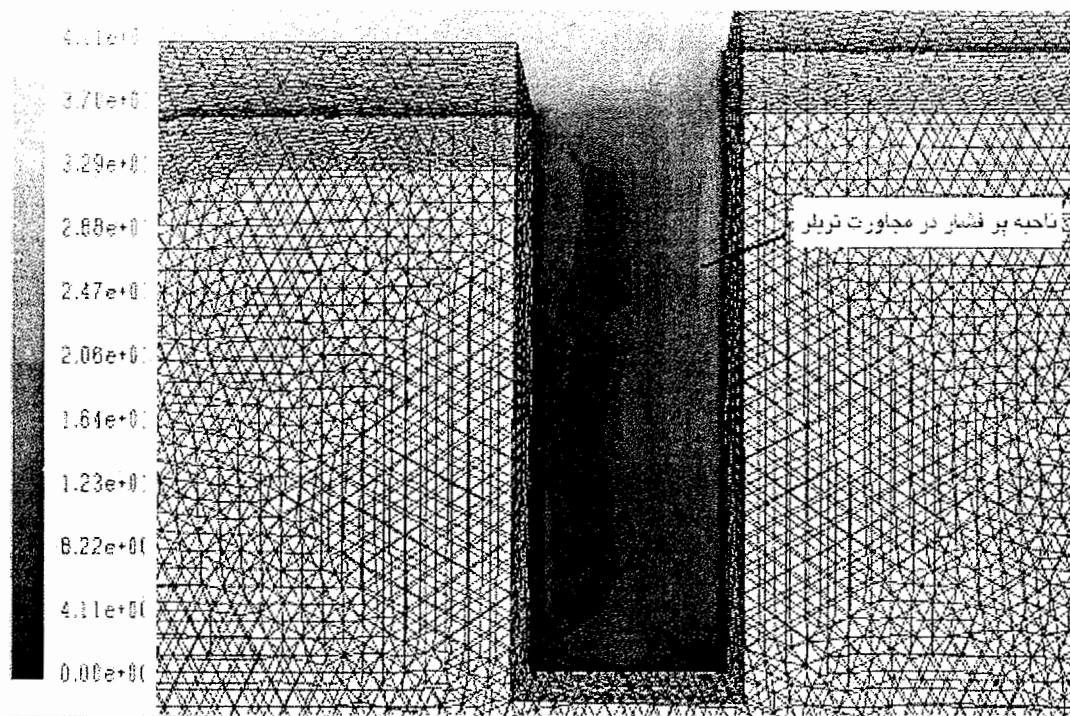
به دلیل تفاوت اندک میدانهای جریان در چهار حالت متفاوت سرعت تسمه ها تنها تصاویر مربوط به حالتی که تسمه ها ثابت می باشند ارائه گردیده است.



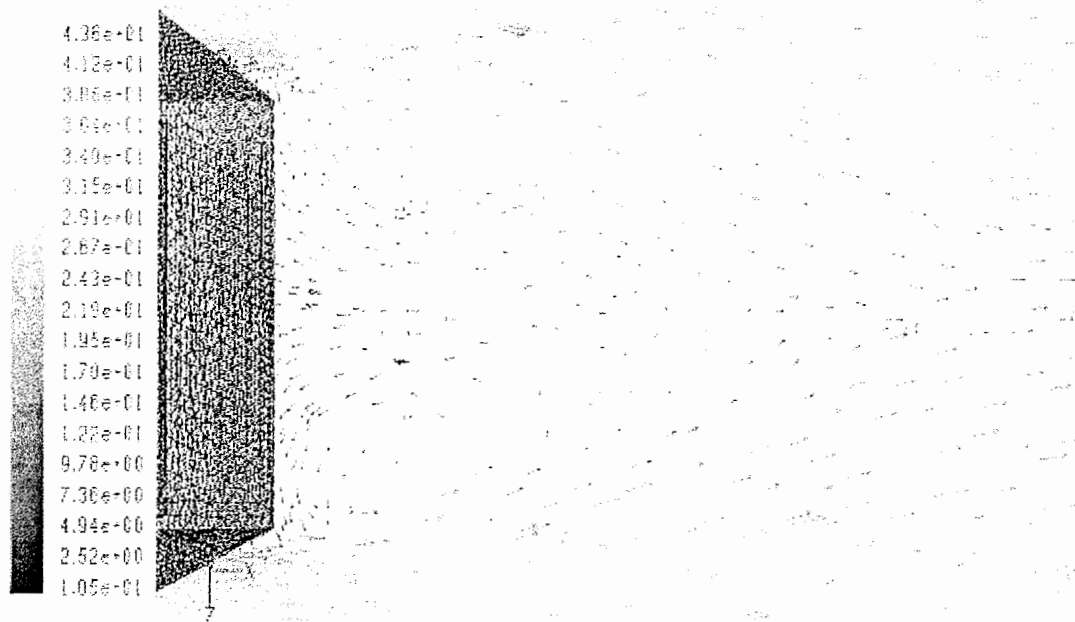
شکل ۲-۴: کانتورهای فشار ایستایی در حالتی که $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$, $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_b = 0 \frac{m}{s}$



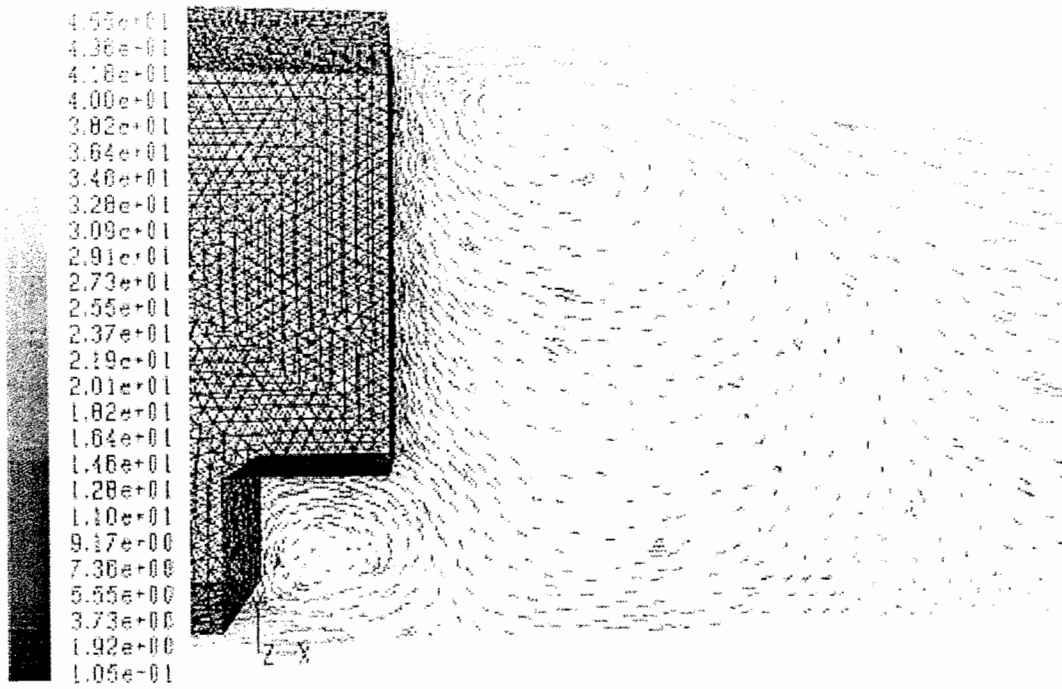
شکل ۳-۴: کانتورهای سرعت در حالتی که $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$, $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_b = 0 \frac{m}{s}$ باشد



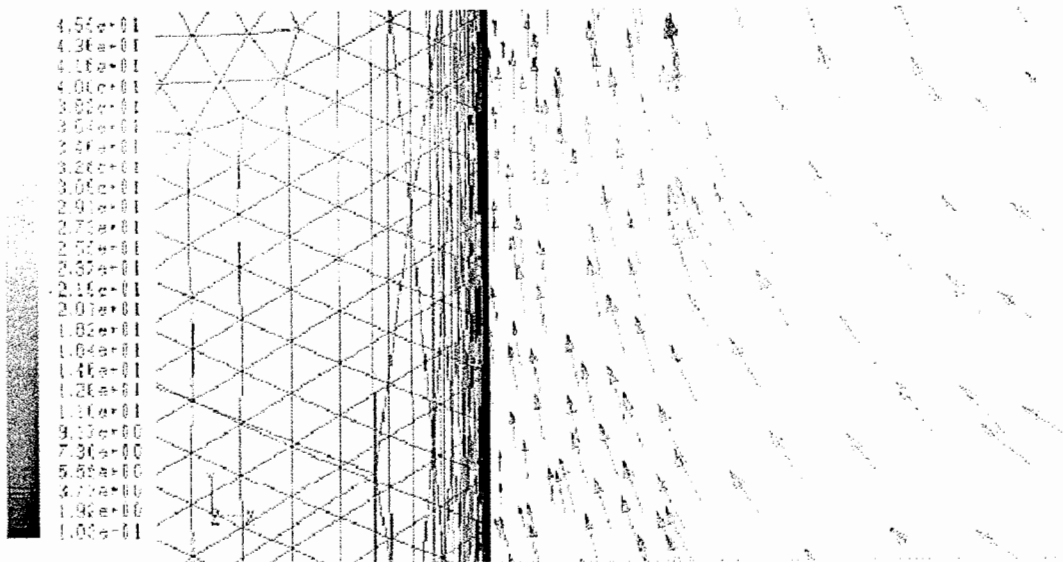
شکل ۴-۴: کانتورهای فشار در فاصله تریلر و کِشنده در حالی که $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$



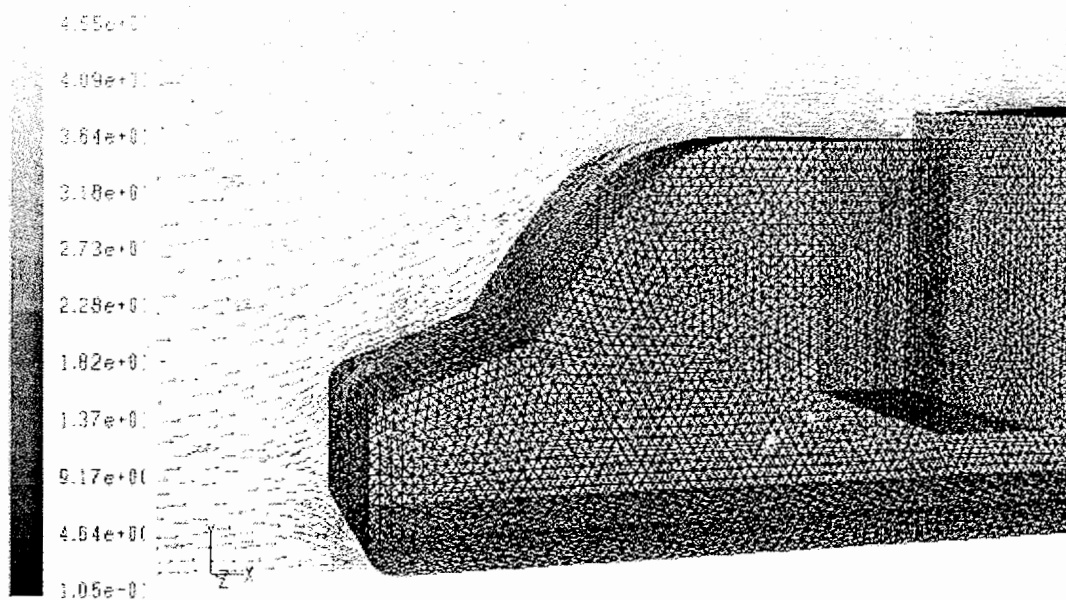
شکل ۴-۵: گردابه پشت تریلر از نمای بالا در حالی که $V_b = 0 \frac{m}{s}$ و $V_r = 0 \frac{m}{s}$ ، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$



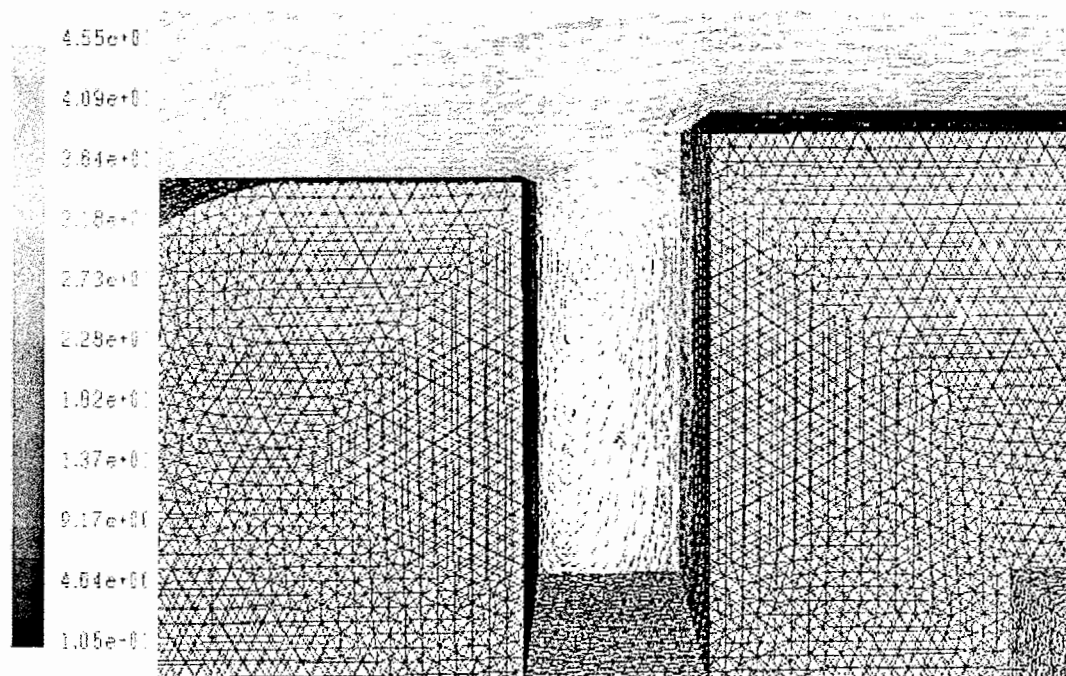
شکل ۴-۶: گردابه پشت تریلر از نمای جانبی $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$, $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_b = 0 \frac{m}{s}$



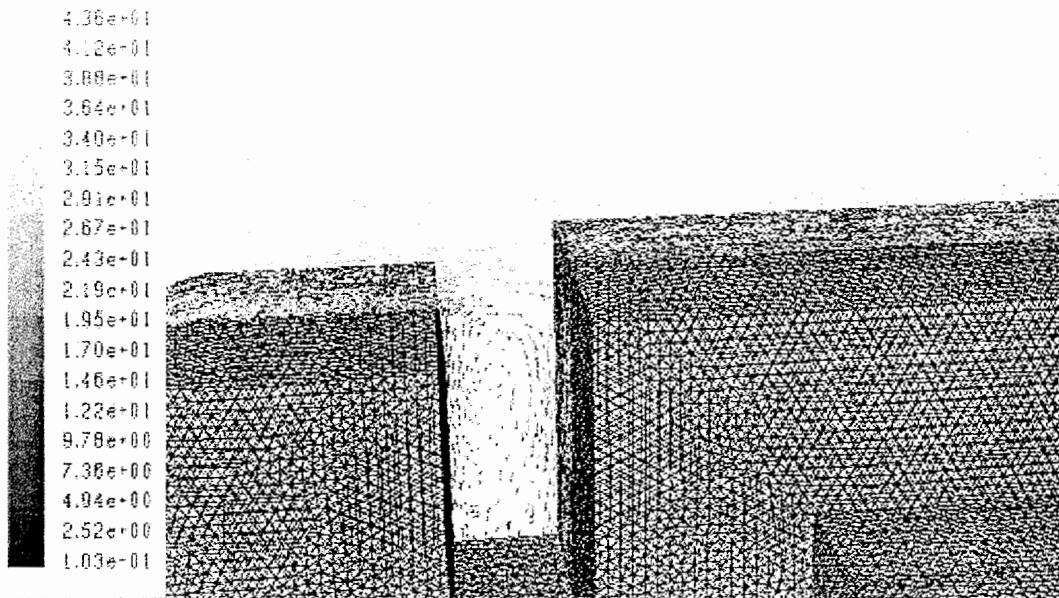
شکل ۴-۷: بردارهای سرعت در نزدیکی دیواره پشتی تریلر، $V_{in} = 30 \frac{m}{s}$, $V_r = 0 \frac{m}{s}$ و $V_b = 0 \frac{m}{s}$



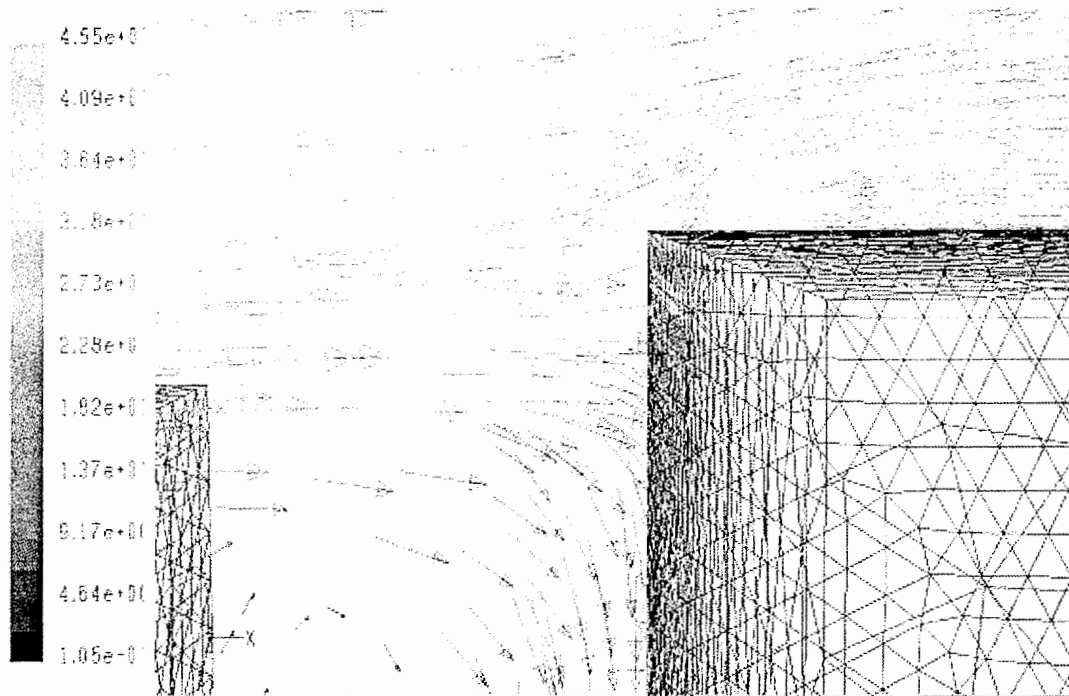
شکل ۴-۸: نمایی از جریان برخوردی با کِشنده



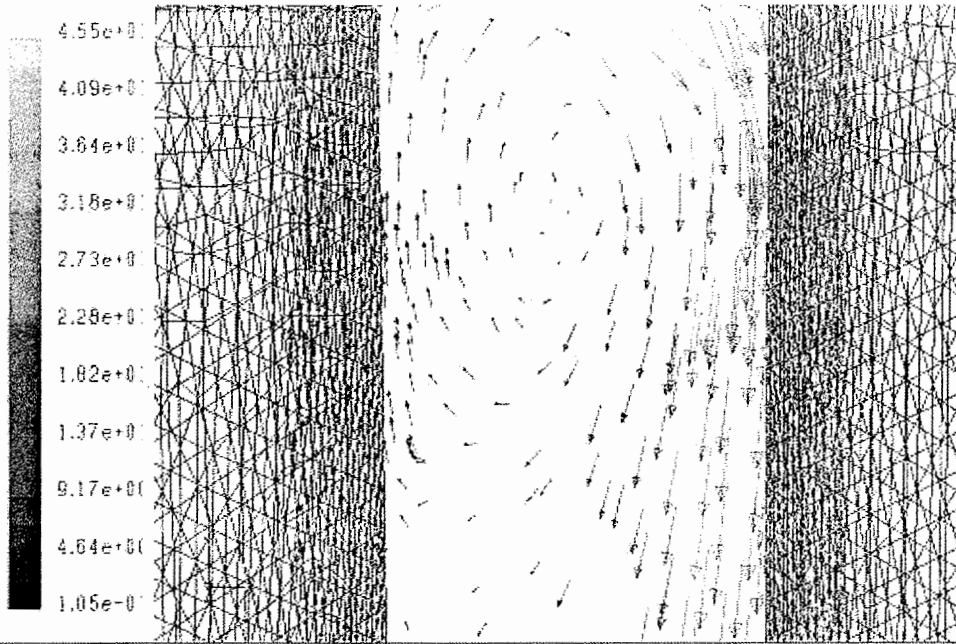
شکل ۴-۹: بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده



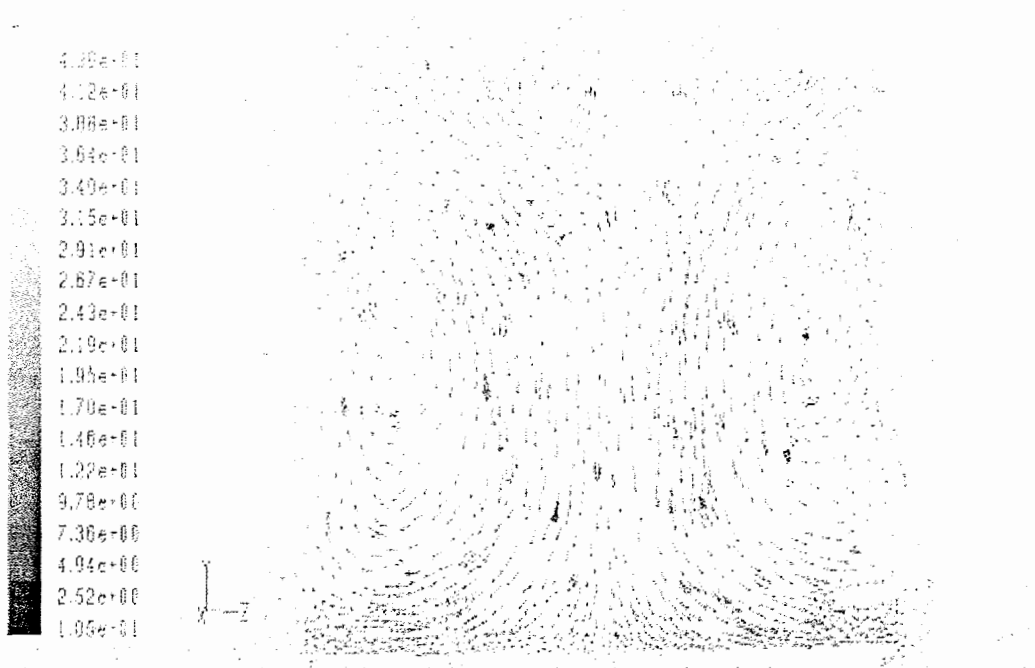
شکل ۴-۱۰: بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده



شکل ۴-۱۱: بردارهای سرعت در محل برخورد با لبه حمله تریلر



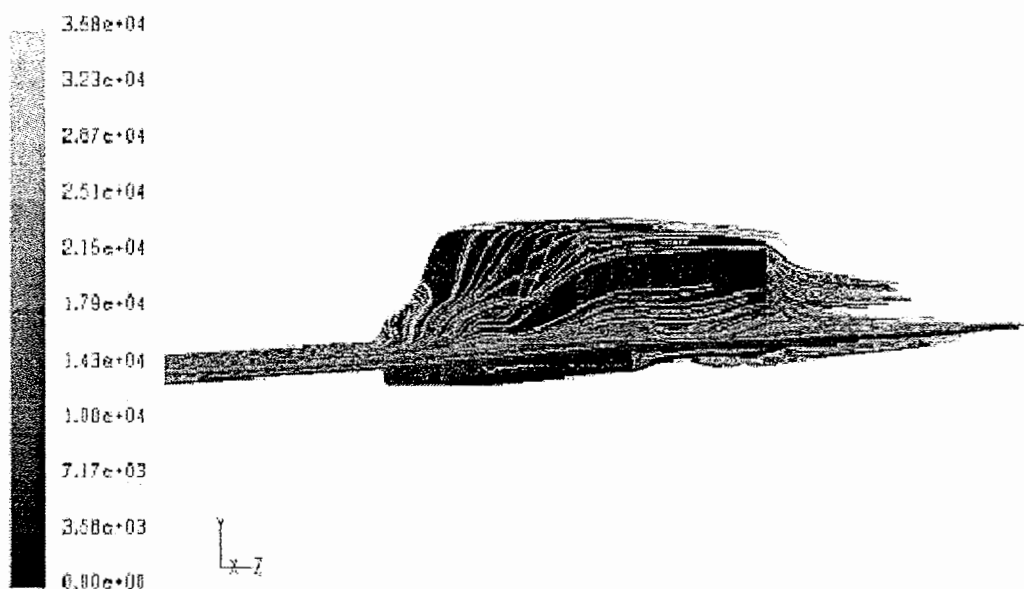
شکل ۴-۱۲: بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده از نمای بالا و نزدیک



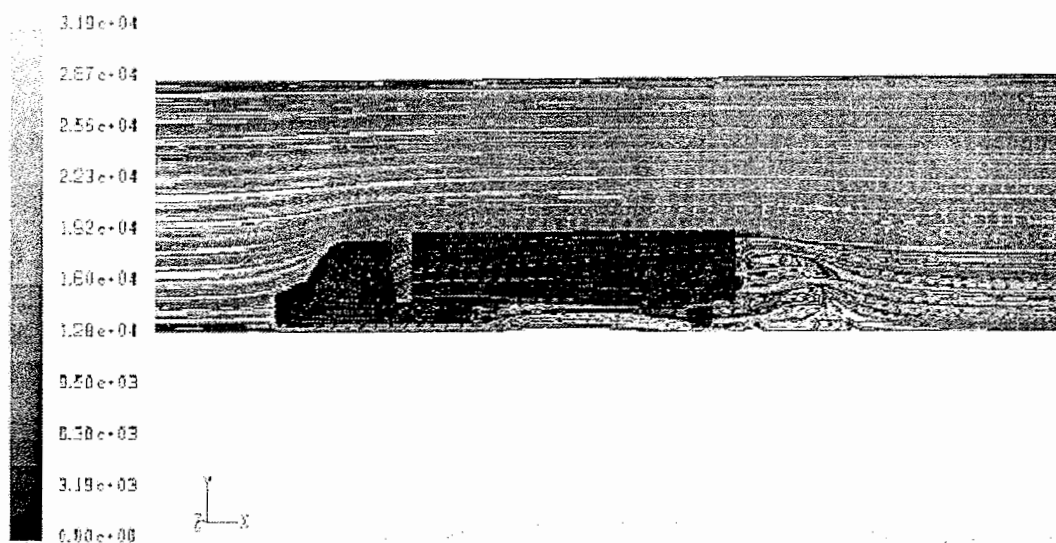
شکل ۴-۱۳: بردارهای سرعت در فاصله تریلر و کِشنده در صفحه Y-Z

۳-۴: تصاویر میدان جریان حاصل از تحلیل عددی حالت غیردائم

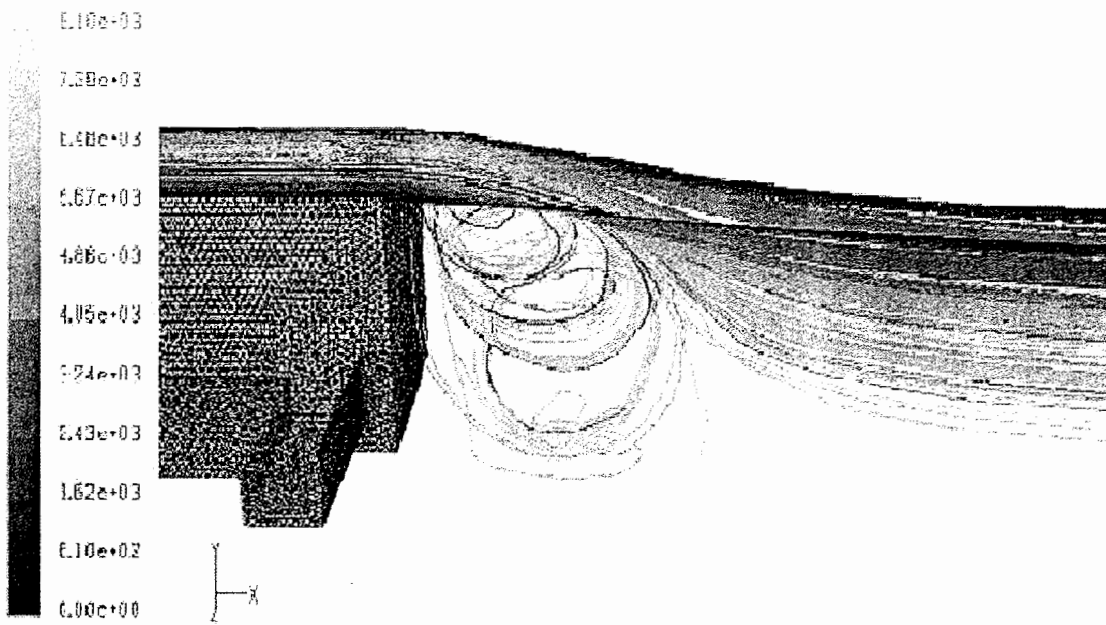
چون ماهیت مسئله دائم است، حل غیر دائم نیز برای پسا، پاسخ های مشابه حل دائم می دهد. با این حال برای نشان دادن خطوط جریان از حل غیر دائم بهره جسته ایم.



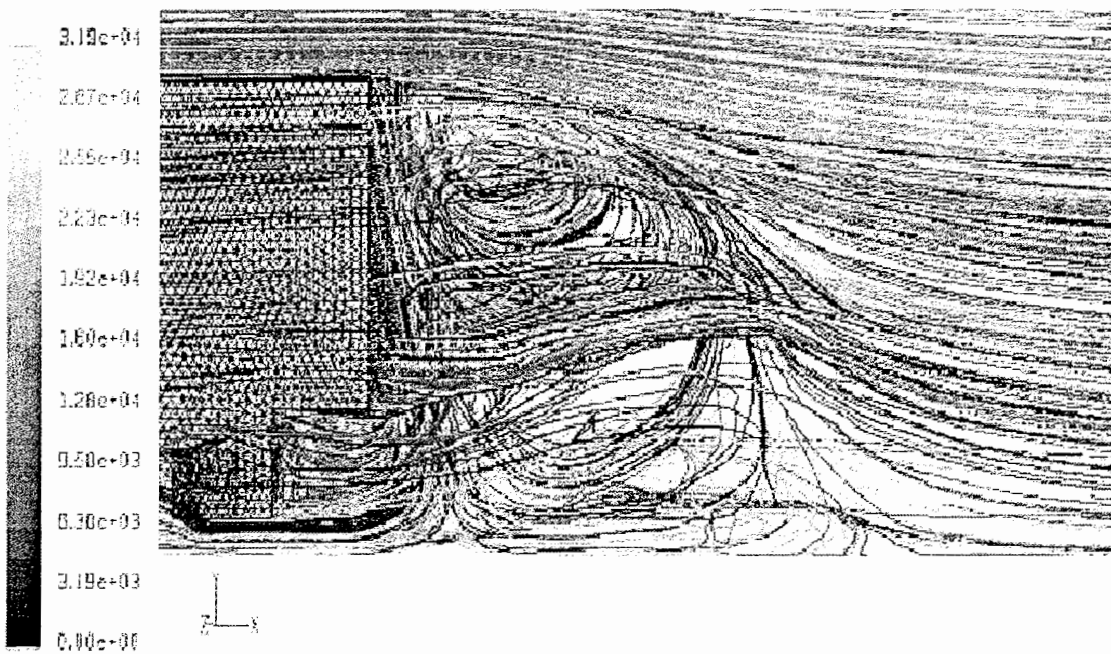
شکل ۴-۱۴: خطوط جریان اطراف کامیون پس از ۱۲ ثانیه از شروع



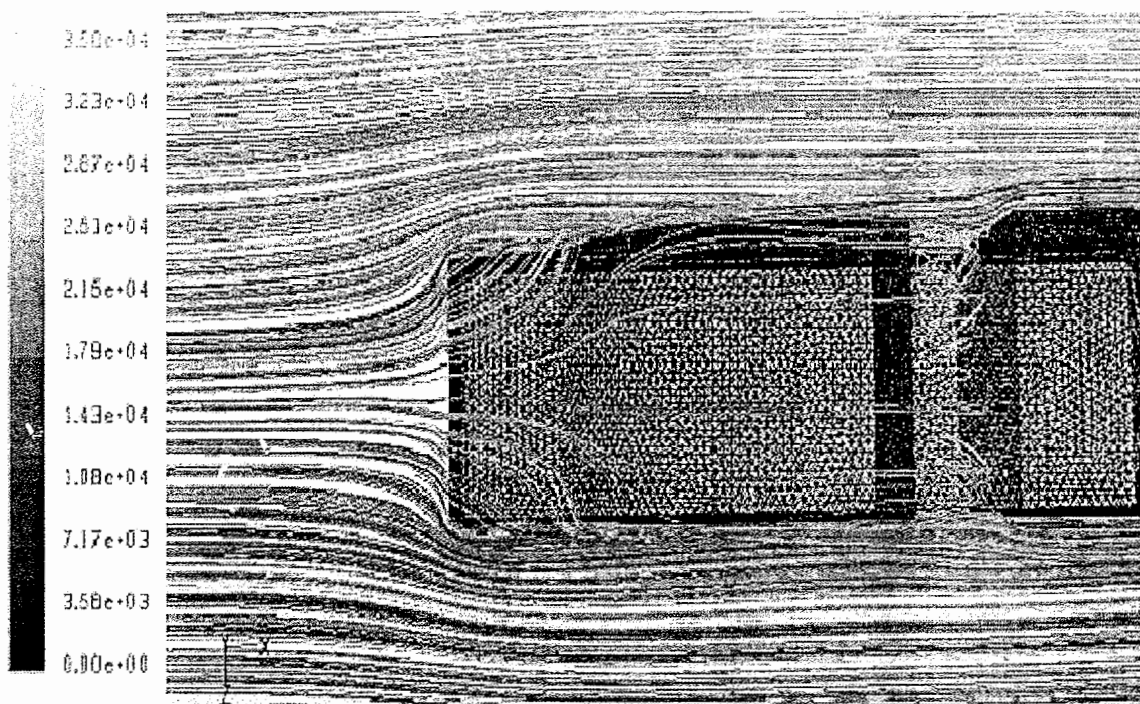
شکل ۴-۱۵: خطوط جریان اطراف کامیون پس از ۱۲ ثانیه از شروع



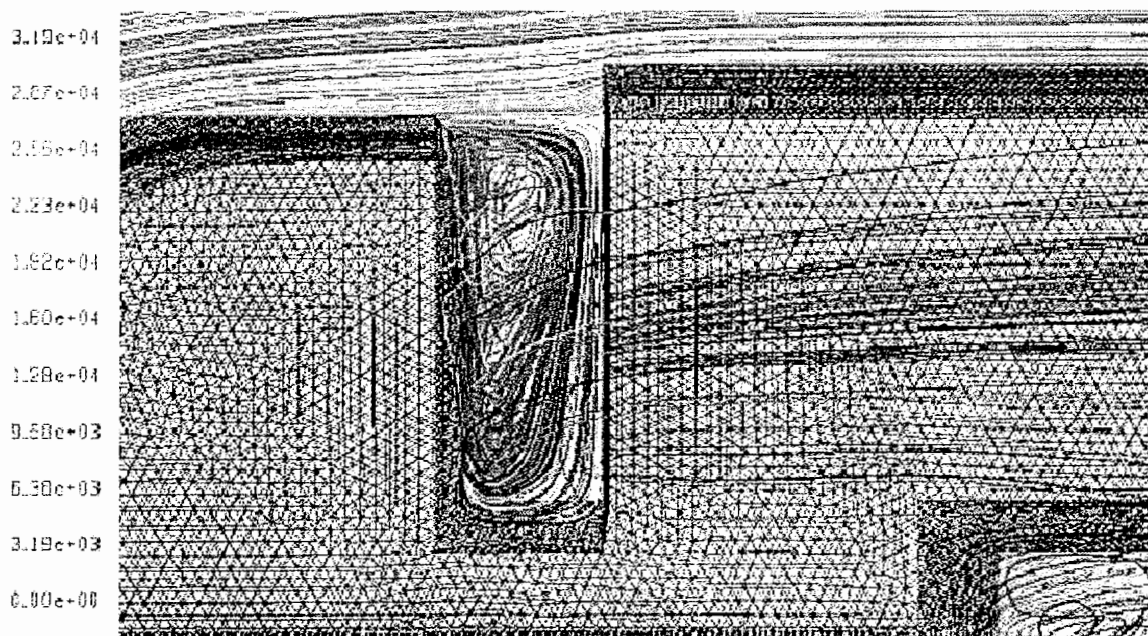
شکل ۴-۱۶: گردابه پشتی مشخص شده با خطوط جریان ناشی از سقف



شکل ۴-۱۷: گردابه پشتی مشخص شده با خطوط جریان ناشی از صفحه X-Y گذرنده از وسط کامیون



شکل ۴-۱۸: جریان برخوردی با کُشنده، خطوط جریان در صفحه X-Z گذرنده از وسط کامیون



شکل ۴-۱۹: جریان در فاصله، خطوط جریان در صفحه X-Y گذرنده از وسط کامیون

پیشنهاد :

استفاده از سطوح متحرک در کاهش پسای آیرودینامیکی کامیون چندان موثر نبود. آنچه من را به بررسی کاهش پسا با استفاده از سطوح متحرک سوق داد، فکر افزایش برآ به خصوص در برآزا^۱ها از طریق حرکت دادن سطح بالایی آنها بود. به دلیل موجود نبودن منابع تجربی کافی، تحقیق بر روی برآزاها، انجام آزمایشات تونل باد را می طلبد که امکانات آن در اختیار نبود.

می توان کار با سطوح متحرک را در دو زمینه دنبال کرد :

الف) بررسی تاثیر استفاده از استوانه متحرک در فاصله کشنده و تریلر بر پسای آیرودینامیکی.

ب) بررسی تاثیر متحرک سازی سطح بالایی برآزا بر ضریب برآی آن.

^۱ Airfoil

Grid Check

Domain Extents:

x-coordinate: min (m) = $-۲.۰۴۰۰۰۰e+۰۰$, max (m) = $۷.۶۲۰۰۰۰e+۰۰$

y-coordinate: min (m) = $-۳.۸۱۰۰۰۰e-۰۲$, max (m) = $۱.۲۷۰۰۰۰e+۰۰$

z-coordinate: min (m) = $-۳.۸۱۰۰۰۰e-۰۱$, max (m) = $۶.۹۸۰۰۰۰e-۰۱$

Volume statistics:

minimum volume (m^۳): $۶.۳۱۲۵۱۰e-۰۸$

maximum volume (m^۳): $۱.۸۸۷۴۰۷e-۰۴$

total volume (m^۳): $۱.۴۰۴۷۹۲e+۰۱$

Face area statistics:

minimum face area (m^۲): $۲.۴۰۱۱۹۰e-۰۵$

maximum face area (m^۲): $۷.۳۴۵۰۳۸e-۰۳$

Checking number of nodes per cell.

Checking number of faces per cell.

Checking thread pointers.

Checking number of cells per face.

Checking face cells.

Checking bridge faces.

Checking right-handed cells.

Checking face handedness.

Checking element type consistency.

Checking boundary types:

Checking face pairs.

Checking periodic boundaries.

Checking node count.

Checking nosolve cell count.

Checking nosolve face count.

Checking face children.

Checking cell children.

Checking storage.

Done.

Abstract:

Growing importance of environmental issues and energy sources has made scientists to do researches for finding more efficient ways of fuel usage. Correct use of aerodynamic devices can reduce aerodynamic drag about 20 percent which means about 7 to 12 percent reduction in fuel consumption. Passive methods have been employed previously to reduce drag of heavy vehicles however in this research moving surfaces' influence on aerodynamic drag of a truck model is investigated.

For this goal, two sliding belts are installed on the roof and on the back of a trailer (part of a conventional tractor-trailer truck). Four different set ups of belts' velocities are studied by CFD method to see their influence on aerodynamic drag of truck. Results showed not really considerable drag reductions for all set ups and in the best condition, a 3 percent reduction was achieved.

References:

Books:

[1] **Fluid Dynamic Drag** by Sighard F. Hoerner 1960

[2] **Fundamental of Aerodynamics** by John D. Anderson

Articles:

[3] Joe college, "**Determination of the Drag Coefficient of a Sphere**", Louisiana Tech. university, report ENGR 201, march 2002

[4] J. -P. Marec, "**Drag reduction: a Major Task for Research**", European drag reduction conference 2000, Germany, June 2000

[5] J. Reneaux, "**Overview on Drag Reduction Technologies for Civil Transport Aircraft**", European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2004, July 2004

[6] P. R. Viswanath, "**Aircraft Viscous Drag Reduction Using Riblets**", Elsevier 2002

[7] Danny P. Hwang, "**A Proof of Concept Experiment for Reducing Skin Friction by Using a Micro-Blowing Technique**", NASA, Jan 1997

[8] Y. A. Hassan & J. Ortiz, "**Experimental Study of Micro-Bubble Drag Reduction Using Particle Image Velocimetry**", Elsevier 2002

[9] Edwin J. Saltzman & Robert R. Meyer, Jr. , "**A Reassessment of Heavy-Duty Truck Aerodynamic Design Features and Priorities**" - NASA/TP-1999-206074

[10] Masaru Koike & Tsunehisa Nagayoshi, Mitsubishi co. , "**Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators** ", 2004

[11] S N Singh & L Rai & P Puri, "**Effect of Moving Surface on the Aerodynamic drag of road vehicles**", Proc. IMechE. Vol. 219, p127-134, August 2004

- [12] U. S. Governmental Report, " **Technology Roadmap for the 21st Century Truck Program**", 21 CT-001, December 2000
- [13] Motor industry research association, Warwickshire, "**truck aerodynamic styling** ", GPG Fuel Management guide, June 2001
- [14] Richard M. Wood, "**Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks**", SAE International, 2002-01-2377
- [15] Robert M. Clarke, "**Truck Manufacturers Program to reduce aerodynamic drag**", DOE Heavy Vehicle Systems Optimization, April 2006
- [16] Fred Browand, University of Southern California, "**Experimental Measurement of the Flow-field of Heavy Trucks** ", *National Energy Technology Laboratory*, FY 2004 Annual Report
- [17] Lawrence Livermore National Laboratory, "**An Experimental Study of Drag Reduction Devices for a Trailer Underbody and Base**", AIAA
- [18] SAE International, Fred Browand, "**Fuel Savings by Means of Flaps Attached to the Base of a Trailer**", 2005-01-1066
- [19] David pointer, Argonne National Laboratory, "**Heavy Vehicle Drag Estimation using Commercial CFD Tools**", April 2006
- [20] Sandeep Sovani, "**Making Trucking Less of a Drag**", Fluent News, spring 2000
- [21] Subrata Roy, Kettering University, "**External Flow Analysis of a Truck for Drag Reduction** ", Society of Automotive Engineers, 2000-01-2000
- [22] Lawrence Livermore National Laboratory, "**Computational Flow Modeling of a Simplified Integrated Tractor-Trailer Geometry**", UCRL-ID-204877, 2002
- [23] Fred. Browand, "**Flow Structure in the Gap between Two Bluff Bodies** ", AIAA
- [24] "**Progress in Reducing Aerodynamic Drag for Higher Efficiency of Heavy Duty Trucks (Class 7-8)** ", NASA Ames from Aerospace Computing Inc.

- [20] The Ohio State University, S. Nakamura, E. M. Hively, "LES Simulation of Aerodynamic Drag for Heavy Duty Trailer Trucks", FEDSM2002-21427
- [21] Robert J. Englar, "Advanced Aerodynamic Devices to Improve the Performance, Economics, Handling and Safety of Heavy Vehicles", SAE Technical papers, 2001-01-2072
- [22] AIAA Fluid Dynamics Conference, Bruce L. Storms, "A Study of Reynolds Number Effects and Drag-Reduction Concepts on a Generic Tractor-Trailer", AIAA-2004-2201
- [23] NASA Ames Research Center, "DOE project on heavy vehicle aerodynamic drag", UCRL-TR-20022, 2004
- [24] Gianluca Laccarino, Stanford University "Prediction of a Turbulent Separated Flow Using Commercial CFD Codes ", journal of fluid mechanics, vol. 112, Dec 2001
- [25] Lawrence Livermore National Laboratory, "Working Group Meeting on Heavy Vehicle Aerodynamic Drag", UCRL-TR-214683, May 2000
- [26] Sandia National Laboratories, Kambiz Salari "Aerodynamic Drag of Heavy Vehicles", UCRL-JC-23810, June 2000
- [27] Bechert, D. W. , Hage, W. , and Brusek, M. , "Drag Reduction with the Slip Wall" *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 9, 1996, pp. 1072-1074.
- [28] Byungwi Choi and Haecheon Choi, " Drag Reduction with a Sliding Wall in Flow over a Circular Cylinder", AIAA JOURNAL, VOL. 38, NO. 4

Related web links:

- [29] <http://grus.berkeley.edu/~jrg/ay2002/node21.html>
- [30] <http://www.est.org.uk/fleet/searchresultscfm>
- [31] <http://www.trucks.doe.gov/>