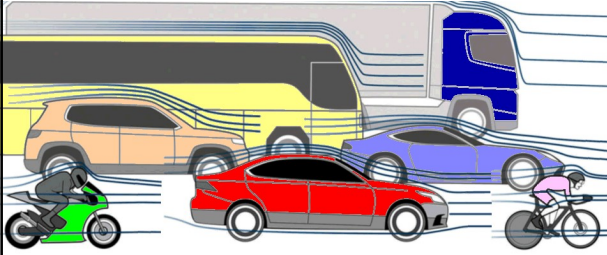


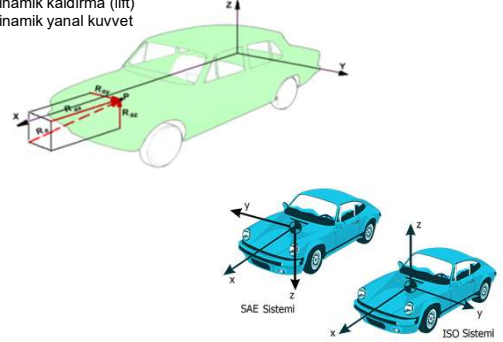
## Taşıt Aerodinamiği



Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA

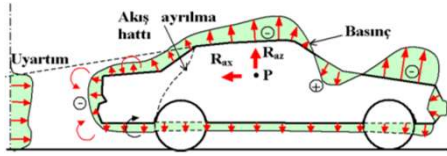
## Aerodinamik

- **Aerodinamik:** Objelerin çevresinden olan hava akışını inceleyen bilim
- **Aerodinamik kuvvetler:**
  - Aerodinamik direnç
  - Aerodinamik kaldırma (lift)
  - Aerodinamik yanal kuvvet



## Aerodinamik direnç

Seyir halindeki bir otomobilde basınç dağılımı

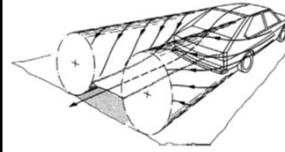


## Aerodinamik direnç...

Aerodinamik direncin ana belirleyicisi uyartımın kesit alanıdır. Eğer hava taşıtın arkasındaki hacmi dolduramazsa, orada bir düşük basınç bölgesi oluşur ve bu düşük basıncın taşıtı çekmesi direnci oluşturur. **Aerodinamik direnç özellikle yüksek hızlarda taşıt performansını önemli derecede etkiler.**

### Aerodinamik direncin belli başlı kaynakları:

- Taşıtın, arka kısmında boşalttığı bölgede meydana gelen girdaplar (~%80)
- Taşıtın dış yüzeylerinden akan havanın neden olduğu yüzey sürtünmesi (~%10)
- Soğutma ve havalandırma amacıyla, radyatör sisteminden ve iç kısımlardan geçen hava (~%10)



## Aerodinamik direnç...

Bernouilli Teoremi

$$P_s + P_d = P_t$$

$$P_d = \frac{\rho V^2}{2}$$

$$R = 0,5 \rho A v^2$$

$$R = 0,5 \rho C_x A v^2$$

$P_s$ : Statik basınç, Pa

$P_d$ : Dinamik basınç, Pa

$P_t$ : Toplam basınç, Pa

$\rho$  (ro): Hava yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

$C_x$ : Aerodinamik direnç katsayısı (-)

A: Taşıtın ön izdüşüm alanı (m<sup>2</sup>)

v: Taşıt hızı (m/s)

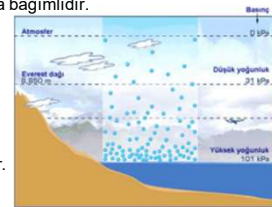


## Aerodinamik direnç...

Havanın yoğunluğu yükseklik ve sıcaklığa bağlıdır.

Yükseklik ↑ yoğunluk ↓

Sıcaklık ↑ yoğunluk ↓



Termodinamik hatırlatma:

- Basınç arttıkça havanın yoğunluğu artar.  
 $\rho \sim P$  (Boyle Kanunu)
- Sıcaklık arttıkça havanın yoğunluğu azalır.  
 $\rho \sim 1/T$  (Charle Kanunu)
- Havanın sıcaklığı arttıkça basıncı artar.  
 $P \sim T$  (Gay-Lussac Kanunu)
- Üçü birlikte değerlendirilirse;  
 $P \sim \rho \times T$

## Aerodinamik direnç...

Bazı biçimlerin ölçülmüş aerodinamik direnç katsayıları

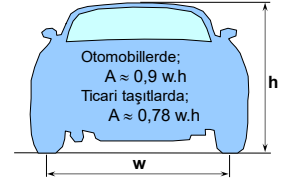
Biçim	Direnç katsayısı
Küre	0.47
Yarımküre	0.42
Koni	0.50
Küb	1.05
Açık küb	0.80
Uzun silindir	0.82
Kısa silindir	1.15
Aerodinamik gövde	0.04
Yan aerodinamik gövde	0.09

## Aerodinamik direnç...

Aerodinamik direnç:

$$R_{ax} = 0,5 \rho C_x A (v \pm v_0)^2$$

$$R_{ax} = 0,0386 \rho C_x A (V \pm V_0)^2$$

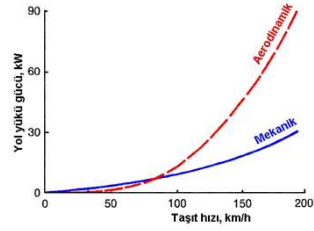


## Aerodinamik direnç...

- Aerodinamik direnç, taşıt hızının karesiyle değişmektedir. Bu nedenle taşıt hızı arttıkça direnç hızla artar.
- Aerodinamik direnci karşılamak için gerekli güç ise hızın küpü ile artmaktadır:

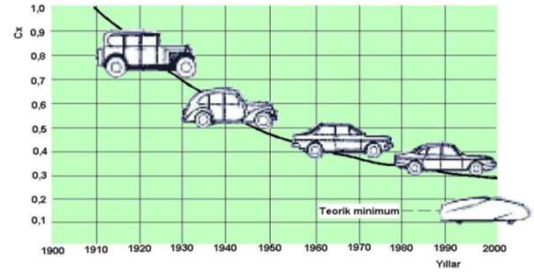
$$P_{ax} = 0,5 \rho C_x A (v \pm v_0)^2 v$$

$$P_{ax} = 0,0107 \rho C_x A (V \pm V_0)^2 V$$

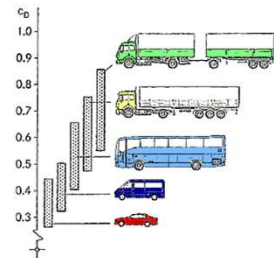


## Aerodinamik direnç...

Aerodinamik direnç katsayısının yıllara göre değişimi



## Aerodinamik direnç...



Otomobil modeli	Cd
WOLKSWAGEN XL1	0,19
Mercedes-Benz CLA	0,22
Tesla Model S	0,24
Mercedes-Benz S-Class	0,24
Toyota Prius	0,25
Hyundai Sonata Hybrid	0,25
Peugeot 508	0,25

## Aerodinamik direnç...

Bazı taşıtların aerodinamik katsayıları

T A Ş I T	C <sub>x</sub> katsayısı
Açık spor	0,5-0,7
Pikap	0,5-0,6
Arkası uzun	0,4-0,55
Fariar, arka tekerlekler, yedek lastik gövde içinde, kama biçimli gövde	0,3-0,4
En avantajlı aerodinamik biçim	0,15-0,20
Otobüs	0,6-0,7
Kamyon, treyler	0,8-1,5
Motosiklet	0,6-0,7

## Aerodinamik direnç...

Yol deneyi ile aerodinamik katsayı ve yuvarlanma direnci

	1. Deneme (yüksek hız)	2. Deneme (düşük hız)
İlk hız (km/h)	$V_{a1} = 60$	$V_{a2} = 15$
Son hız (km/h)	$V_{b1} = 55$	$V_{b2} = 10$
İki hız arası süre (s)	$t_1 = 4$	$t_2 = 7,5$
Ortalama hız (km/h)	$V_1 = 57,5$	$V_2 = 12,5$
Ortalama yavaşlama ivmesi (km/h.s)	$a_1 = \frac{V_{a1} - V_{b1}}{t_1} = 1,25$	$a_2 = \frac{V_{a2} - V_{b2}}{t_2} = 0,67$
Aerodinamik katsayı	$C_x = \frac{6m(a_1 - a_2)}{A(V_1^2 - V_2^2)} = 0,58$	
Yuvarlanma direnci	$f_{ro} = \frac{28,2(a_2 V_1^2 - a_1 V_2^2)}{10(V_1^2 - V_2^2)} = 0,018$	

## Aerodinamik direnç...

Tasarım değişikliklerinin aerodinamik katsayıya etkisi

Etki	$C_x$ (%)
Taşıtın yüksekliğini 30 mm azaltmak	yaklaşık -5
Çamurlukları düzleştirme	-1 ... -3
Geniş lastikler	+2 ... +4
Gövde ile uyumlu pencereler	yaklaşık -1
Gövde boşluklarının yalıtımı	-2 ... -5
Gövde altı panelleri	-1 ... -7
Gizlenmiş farlar	+1 ... +10
Dış arka dikiz aynaları	+2 ... +5
Radyatör ve motor kompartmanından geçen hava	+4 ... +14
Fren soğutma düzenleri	+2 ... +5
İç havalandırma	yaklaşık +1
Açık pencereler	yaklaşık +5
Açık güneşlik	yaklaşık +2
Üste monte edilmiş sörf çerçevesi	yaklaşık +40

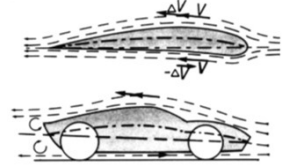
## Aerodinamik direnç...

Bazı otomobillerin  $C_x$  katsayıları ve ön izdüşüm alanları

Taşıt	$C_x$	A (m <sup>2</sup> )	$C_x A$
Audi 100	0,30	2,05	0,615
Porsche 944	0,35	1,82	0,637
Mercedes 190 E/23-16	0,32	1,92	0,614
Renault 25 TS	0,35	1,75	0,613
Ford Sierra 1,6	0,36	1,96	0,706
Fiat 126	0,47	1,51	0,710
Peugeot 205 GT	0,39	1,75	0,683

## Aerodinamik kaldırma kuvveti

$$R_{az} = 0,5 \rho C_z A (v \pm v_0)^2$$



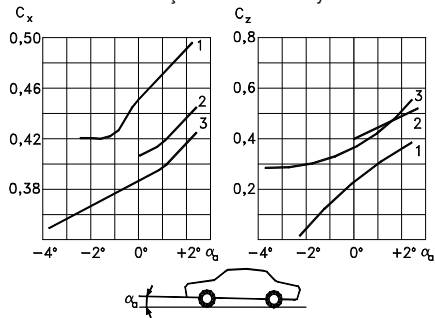
$C_z$ , taşıtın ön izdüşüm alanı kullanıldığında ve sıfır rüzgar açısında otomobiller için 0,3 ... 0,5 arasındadır.

Çapraz rüzgarda bu değer 1,0 i geçebilir.

Aerodinamik kaldırma kuvveti tipik bir otomobilde ve 160 km/h hızda 1100 N'a ulaşmıştır (ön dingil yükünün ~ %20-25'i).

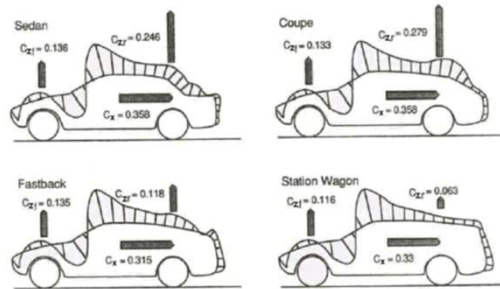
## Aerodinamik kaldırma kuvveti...

Atak açısının aerodinamik direnç ve kaldırma katsayılarına etkisi



## Aerodinamik kaldırma kuvveti...

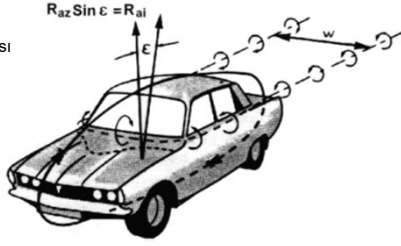
$C_{z1}$ ,  $C_{z2}$  ön ve arka aerodinamik kaldırma direnç katsayıları



### Aerodinamik kaldırma kuvveti...

$$R_{al} = R_{az} \sin \epsilon = r A C_{zi}$$
$$C_{zi} \approx 0,36 C_z^2$$

$C_{zi}$  : ilave direnç katsayısı



### Aerodinamik yanal kuvvet

$$R_{ay} = 0,5 \rho C_y A v_0^2$$

$C_y$ : Boyutsuz yanal kuvvet katsayısı

A: Ön izdüşüm alanı  $m^2$

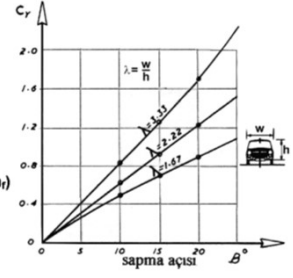
$v_0$ : Taşıta göre bağıl rüzgar hızı, m/s

Yanal kuvvet katsayısı için yaklaşık bir eşitlik:

$$C_y = \frac{\text{Yanal alan}}{\text{Ön izd. alan}} \beta (0,005 + 0,0019 n_f)$$

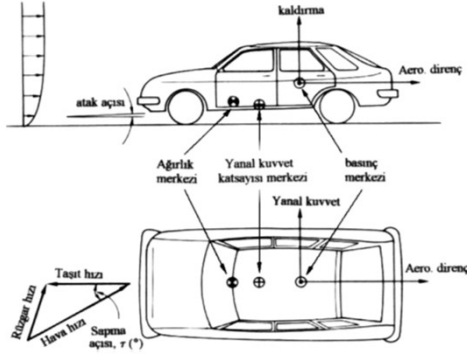
$\beta$ : Sapma açısı, °

$n_f$ : Yanal kuvvet oranlama katsayısı



Yanal kuvvet, tipik bir otomobilde ve 110 km/h hızda 1100 N'a, bir yarış otomobilinde 290 km/h hızda 4400 N'a kadar ulaşabilmektedir.

### Aerodinamik yanal kuvvet...



### Aerodinamik yanal kuvvet...

**Yanal kuvvet katsayısı merkezi**, ön ve arka lastiklerin yanal kuvvet katsayılarının etki merkezidir.

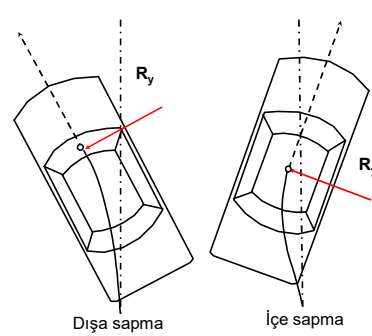
Tüm hızlardaki kararlı seyir için, yanal kuvvet katsayısı merkezi **ağırlık merkezinin** arkasında olmalıdır.

**Basınç merkezinin** yanal kuvvet katsayısı merkezinin arkasında kalması durumunda, taşıt daha kararlıdır.

### Aerodinamik yanal kuvvet...

- Basınç merkezi, ağırlık merkezinin önünde kalırsa "**dışa sapma**" (sürüş rotasından uzaklaşma) eğilimi oluşur.
- Basınç merkezi arkada kaldığında ise "**içe sapma**"(rotaya dönüş) eğilimi oluşur.
- Yanal kuvvet etkidiğinde dışa sapan bir taşıt, rüzgar kesildiğinde orijinal yörüngesinden daha da uzaklaşırken; içe sapan taşıt, geriye düzelenerek kendi orijinal yörüngesini geçer.

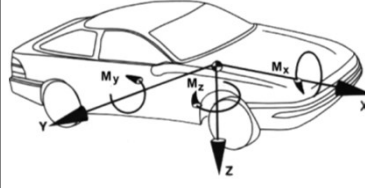
### Aerodinamik yanal kuvvet...



### Aerodinamik yanal kuvvet...

- Aerodinamik yanal kuvvete karşı doğrultu kararlılığını geliştirmek için, basınç merkezi taşıtın ağırlık merkezinin yakınında olmalıdır.
- Basınç merkezi daha önde bulunan arka tarafı kısa taşıtlar dışa sapma eğimlidir ve kontrolleri daha zordur.
- Basınç merkezi, arkaya monte edilen kararlılık kanatçıklarıyla (spoiler) arkaya, ağırlık merkezi yakınlarına kaydırılabilir. Ancak, yarış otoları ve özel tasarımlar dışında pek uygulanmamaktadır.

### Aerodinamik momentler



- $M_x$ : X eksenine göre moment, devrilme momenti
- $M_y$ : Y eksenine göre moment, şahlanma momenti
- $M_z$ : Z eksenine göre moment, sapma momenti

### Aerodinamik devrilme momenti

Aerodinamik devrilme momenti, taşıt rüzgarsız havada dönüş yaparken veya yanal rüzgarın estiği ortamda seyrederken ortaya çıkar, taşıtın kararlılığını ve tutunma karakteristiklerini etkiler. Santrifüj kuvvete ek bir kuvvet olduğundan, özellikle dönüşlerde önemlidir.

Devrilme momenti;

$$M_x = R_{ay} \cdot z$$

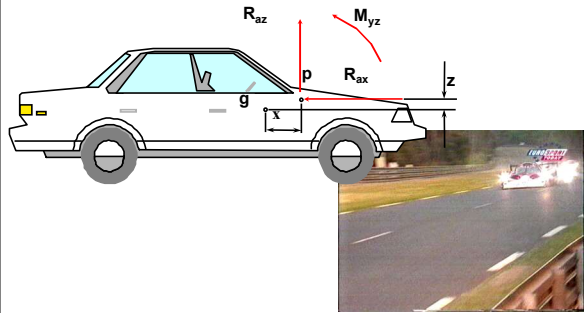
z: ağırlık merkezi ile basınç merkezi arasındaki düşey mesafe, m

### Aerodinamik şahlanma momenti

$$M_y = R_{ax} \cdot z + R_{az} \cdot x$$

$C_{my}$ : şahlanma momenti katsayısı  
( $C_{my} \approx 0,05 - 0,20$ )

$$M_y = 0,5 \rho C_{my} A L v^2$$



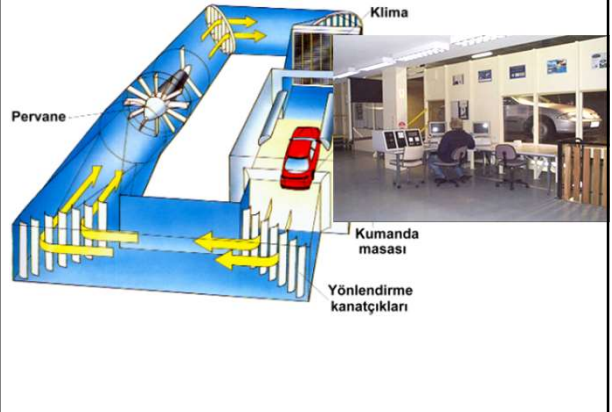
### Aerodinamik sapma momenti

Aerodinamik sapma momenti, aerodinamik yanal kuvvet tarafından oluşturulan bir momenttir. Sapma momenti, taşıt kararlılığı ve tutunma açısından önemlidir.

Sapma momenti;

$$M_z = R_{ay} \cdot x$$

### Rüzgar tüneli





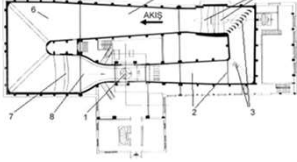
## Rüzgar tüneli...



## Ankara Rüzgar Tüneli

- 1946-1950 yılları arasında kurulan ve 1993-1998 yılları arasında TÜBİTAK-SAGE tarafından bakım, onarım ve yetenek artırımı yapılan Ankara Rüzgar Tüneli (ART), 1998 tarihinden itibaren Türk Silahlı Kuvvetlerine, Türk savunma ve sivil sanayisine hizmet vermektedir.

## Ankara Rüzgar Tüneli...



- 1 Deney odası
- 2 Çıkış dağıtıcısı (birinci difüzör) ve metal elek
- 3 Birinci sıra dönme kanatçıkları
- 4 Pervane ve öndöngü ile düzeltici kanatçıklar
- 5 İkinci dağıtıcı
- 6 İkinci sıra dönme kanatçıkları
- 7 Akım düzenleyici perdeler
- 8 Dinlenme odası ve toplayıcı (daralma konisi)

### ANKARA RÜZGAR TÜNELİ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

TİPİ	YATAY KAPALI DEVRE
ŞARTLANDIRMA	ATMOSFERİK
TEST ODASI BOYUTLARI	3.05 m (GENİŞLİK) x 2.44 m (YÜKSEKLİK) x 6.1 m (UZUNLUK)
EN YÜKSEK HIZ	90 m/s
MOTOR GÜCÜ	750 kW (1000 hp)

## Rüzgar tüneli...



Volvo'nun rüzgar tüneli



## Rüzgar tüneli testleri



## Duman testi



## Duman testi...



## Duman testi...



## Duman testi...



Rüzgar tüneli testleri genellikle  $0^\circ$  yaklaşım açısıyla yapılır (Hava tam aracın önünden gelmektedir. Yanal rüzgar bileşeni yoktur).  
En alt duman hattı (zor görülen) taşıtın altından geçmekte, onun üzerindeki alt soğutma açıklığında kaybolmaktadır. Onun üzerindeki parlak hat motor kaputu ve ön camı yalayarak tavana ulaşmaktadır.  
Duman, biraz yanalıcı olarak tavanın sonunda ayrılıyor gibi görünüyor. Ancak, yün iplik testi, akışın bagaj kapağının sonuna kadar ayrıldığını gösteriyor.

## Duman testi...



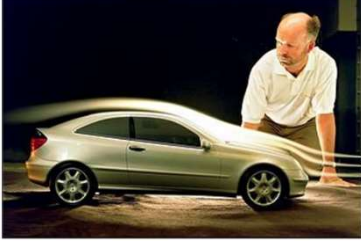
Otomobilin önündeki **durgunluk noktası** ile (gövdenin üstünden ve altından geçen hava hatlarının arası) birlikte, benzer bir durum burada da açıkça görülüyor.

## Duman testi...



- Fastback biçimli bir taşıtta akıştaki kontrastlık açıkça görülmektedir. Akış, arabanın kuyruk kısmında gövdeden farklı bir biçim oluşuyor.
- Hava, kuyruk kısmı biraz daha yükselmiş gibi davranıyor, sonra da bir miktar uyarım bölgesine doğru aşağıya çekiliyor.

### Duman testi...



Gerçek boyutlarda taşıt imal edilmeden önce, birçok biçimlendirme modeli ile rüzgar tünelleri testleri uygulanır. Modelin duman izlerinin gerçek taşıtinkine benzemesi ilginçtir.

### Duman testi...



Station wagonların uyarımları daha fazladır.

Akış arka spoilerde taşıtı kesin olarak terk ediyor. Akış taşıtı terk etmeden önce arka camın üzerinde taşıta sarılsaydı, bir emiş piki oluşturacak ve bu biraz daha az uyarım olmasına rağmen direnci artıracaktı.

Bu aracın arkasında türbülent uyarım olacağı tahmin edilebilir (tam genişlikte ve arka spoilerin alt kenarına kadar) gerçekten de öyledir.

### Duman testi...



Spoilerin altına bir miktar duman enjekte ediliyor. Duman uyarım bölgesini tam olarak doldurmasa da düşük basıncın dumanı aracın arkasında tuttuğu açıkça görülüyor.

Dumanın üst kısmının kesin ayrılması spoilerin görevini yaptığını gösteriyor.

Arkadaki bombeli cam sadece biçimlendirme içindir – daha az uyarıma sebep olmaz ve aerodinamiği fazla değiştirmeden düşey de yapılabilir.

### Duman testi...



Aerodinamik bakımdan açık taşıtlar daha problemlidir. İzleyeceği tavan olmayınca akış türbülent hale gelir, kabine kıvrılır ve uyarımı anormal derecede yükselir. Ancak dumanın kabin içine öne doğru ilerlemesine dikkat edilmelidir. Yolcular korunmaktadır.

### Duman testi...



Bu fotoğrafta duman hatları gayet düzgün görünüyor. Ancak, kabini dumanla doldurmak yerine sürücünün saçlarına bakmak daha doğrudur. Yan camların yükseltilmiş olduğuna da dikkat ediniz.

### Duman testi...



Yan aynaların arkasındaki türbülans.

Ne kadar hoş görünümü olursa olsun her çıkıntının arkasında kesinlikle uyarım oluşur.

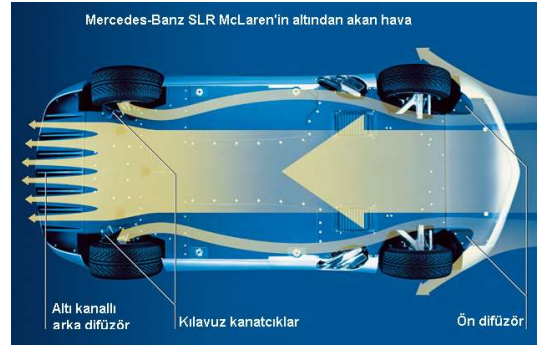


### Duman testi...



Direnç ve lift karakteristiklerini belirlemek için taşıtın altındaki akış önemlidir. Ancak, bu akış hatlarına bakmak zordur. Bazı tünellerde şeffaf döşeme panelleri bulunmakta ve araştırmacılar aşağıdan yün ipliklere ve duman akışına bakmaktadır. Bu testin fazla kullanım değeri yok. Tekerlekler sabit olmakla kalmıyor (normalde oldukça fazla hava akımı yaratırlar) sabit yol da taşıtın bir metre aşağısında! Taşıtın sürüş yüksekliği aerodinamik karakteristiklerini oldukça etkiler. Burada ancak ön tekerleklerin önündeki küçük deflektörler ve geniş düz taban görülebilir.

### Duman testi...



### Yağmur testi



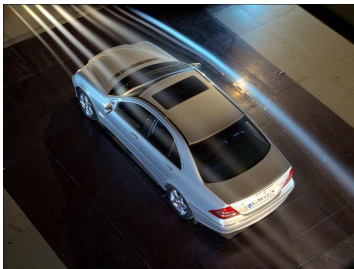
Araçlarının aerodinamiği ile ilgilenen sürücüler yağmur damlalarının araç yüzeyinde oluşturduğu izleri takip ederler. Ancak su damlasının davranışı kütlesi, yüzey gerilmesi vb. fazlalığı nedeniyle havadan oldukça farklıdır. Rüzgar tünellerinde yapılan 'yağmur' testinin amacı, cam silceklerinin verimliliği, farları kapatarak aydınlatmayı ve yan camları kaplayarak görüşü engelleyebilecek olan kir birikmesidir.

### Duman testi...

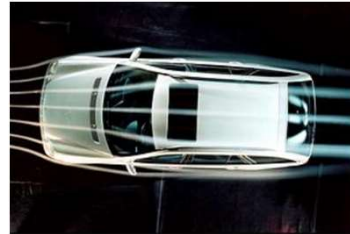


Duman testlerinin çoğu yanal rüzgarsız koşullarda yapılır. Ancak buradaki test çapraz açılı rüzgar ve taşıt hareketinden kaynaklanan hava hareketlerini incelemek üzere düzenlenmiştir. Burada taşıt uyarımının ve sağ ve sol yan kısımlarda farklı açılardaki hava sarımını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.

### Duman testi...



### Duman testi...



Kayık biçimi (taşıtın arkaya doğru daralması). Uyarımı azaltmak amacıyla otomobillerin çoğunda arkaya doğru koniklik vardır. Burada bu karakteristik açıkça görülmektedir. İki yan duman akışının içeriye doğru yönelmesi etkileyici

## Püskül testi



Ön camın alt kısmında ve yan camların üst kısımlarındaki türbülansa dikkat!  
Daha az cazip olmasına rağmen, püsküller birçok konuda duman testinden daha iyi sonuçlar vermektedir.

## Püskül testi...



## Spoiler

- Ortalama bir otomobil spoileri Bunlar esas olarak görüntü içindir ve taşıtın performansında değişiklik yapacak kadar baskı kuvveti oluşturmaz.
- Aşağıdaki kanatlar yüksek hızlarda taşıtın performans kararlılığını sürdürmeye yetecek kadar baskı kuvveti oluşturur.



## Aerodinamik biçim



Akış hatları

SON