

# KARARLI KULLANIM KARAKTERİSTİKLERİ



Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA

## Kararlı kullanım karakteristikleri

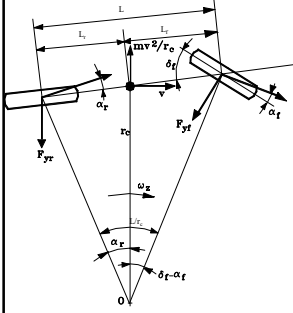
- Kararlı kullanım performansı, taşıtın zamana göre değişmeyen koşullardaki dönüşü sırasındaki doğrultu davranışı ile ilgilidir.



Temas yüzeyindeki kuvvet ve moment

## Taşıt davranışı

- Taşıtın kullanım karakteristikleri, büyük ölçüde, ön ve arka tekerleklerin kayma açıları  $\alpha_f$  ve  $\alpha_r$  arasındaki ilişkiye bağlıdır.

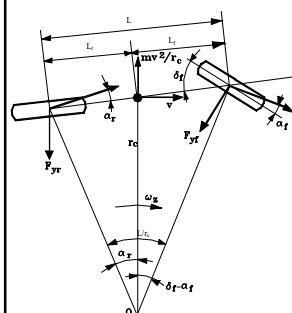


Taşıtın herhangi bir virajı dönmesi için gerekli olan  $\delta_f$  açısı, sadece viraj yarıçapının değil, aynı zamanda kayma açıları  $\alpha_f$  ve  $\alpha_r$ 'nin de fonksiyonudur.

$\alpha_f, \alpha_r$ : kayma açıları  
 $\delta_f$ : yönlendirme açısı

## Kayma açıları

- Ön ve arka tekerleklerdeki yanal kuvvetler, yanal doğrultudaki kuvvetlerin dengesinden belirlenebilir:



$$F_{yf} = m \frac{v^2}{r_c} \frac{L_f}{L} \quad F_{yr} = m \frac{v^2}{r_c} \frac{L_r}{L}$$

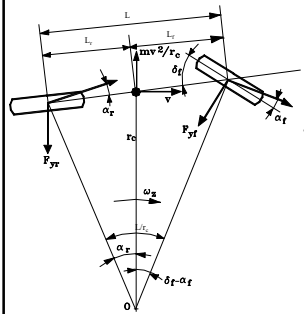
Ön dingildeki tekerleklerin her birine etkiyen normal kuvvetlere  $W_f$ , arka dingildeki her bir tekerleğe etkiyen normal kuvvete de  $W_r$  denirse, statik koşullarda;

$$W_f = G \frac{L_r}{2L} \quad W_r = G \frac{L_f}{2L}$$

$$\delta_f = \frac{L}{r_c} + \alpha_f - \alpha_r$$

$$F_{yf} = 2W_f \frac{v^2}{g r_c} \quad F_{yr} = 2W_r \frac{v^2}{g r_c}$$

## Kayma açıları...



$$\alpha_f = \frac{F_{yf}}{2c_{af}} = \frac{W_f \cdot v^2}{c_{af} \cdot g r_c}$$

$$\alpha_r = \frac{F_{yr}}{2c_{ar}} = \frac{W_r \cdot v^2}{c_{ar} \cdot g r_c}$$

$c_{af}, c_{ar}$  Yanal kuvvet katsayıları, (otomobillerde 15...40 kN/rad, kamyon ve otobüslerde ise, 30...90 kN/rad arasında alınabilir),

## Bir virajı dönmek için gerekli yönlendirme açısı

$$\delta_f = \frac{L}{r_c} + \left( \frac{W_f}{c_{af}} - \frac{W_r}{c_{ar}} \right) \frac{v^2}{g r_c}$$

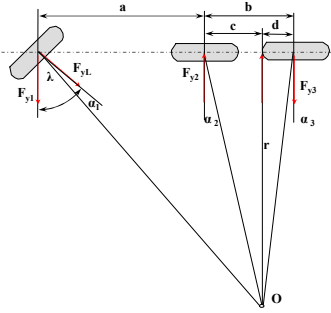
•Yönlendirme katsayısı  $c_s = \frac{W_f}{c_{af}} - \frac{W_r}{c_{ar}}$

$$\delta_f = \frac{L}{r_c} + c_s \frac{v^2}{g r_c}$$

Eşitliğe göre, verilen bir virajı kat etmek için gerekli direksiyon açısı şunlara bağlıdır:

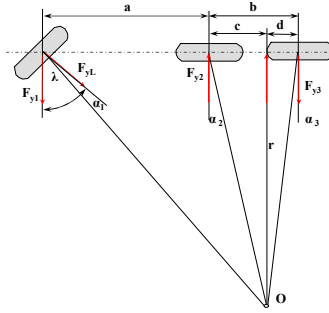
- dingiller arası uzaklık
- ağırlık dağılımı
- hız
- lastik yanal katılığı

## Üç dingilli bir taşıtta kayma açıları



- Üç dingilli bir taşıta etkiyen yanal kuvvetler, kayma açıları ve yönlendirme açısı
- $F_{y1} = F_{y2} - F_{y3}$
- $F_{y2} = c_{\alpha 2} n_2 \alpha_2$
- $F_{y3} = c_{\alpha 3} n_3 \alpha_3$
- $c_{\alpha}$  yanal kuvvet katsayısı 4...6°'lik kayma açılarında yaklaşık olarak sabittir ve lastik karakteristikleri çizelgesinden alınır. Otomobillerde 15...40 kN/rad, kamyon ve otobüslerde, 30...90 kN/rad alınabilir.
- n: Bir dingildeki tekerlek sayısı

## Üç dingilli bir taşıtta kayma açıları...



- Kayma açıları

$$\alpha_1 = \frac{F_{yf}}{c_{\alpha f} n_f} = \frac{m_f v^2}{r_c c_{\alpha f} n_f}$$

$$\alpha_2 = \frac{L}{r_c} \frac{c_{\alpha 3} n_3 b(a+b)}{c_{\alpha 3} n_3 (a+b) + c_{\alpha 2} n_2 a}$$

$$\alpha_3 = \frac{b}{r_c} - \alpha_2$$

## Direksiyon karakteristikleri

Araçın ağırlık merkezine etki eden merkezkaç kuvvet, ağırlık merkezinin konumuna göre ön ve arka tekerleklerle dağıtılır.

Bu durum aracın sürüş doğrultusundan sapmasına yol açar.

Kayma açısının etkisi uygun yöntemlerle ( karşı direksiyon etkisi) azaltılmaktadır.

## Nötr yönlendirme

• Yönlendirme katsayısı  $c_s = 0$ , ( $\alpha_f = \alpha_r$ , ön ve arka tekerleklerin kayma açıları eşit) ise, belirli bir virajı almak için gerekli yönlendirme açısı

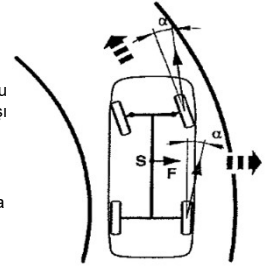
Bu yönlendirme özelliğine sahip taşıta "nötr yönlendirmeli taşıt" denir.

$$\delta_f = \frac{L}{r_c}$$

Sabit yarıçaplı bir virajda ivmelenen bir taşıtın sürücüsü, aynı direksiyon pozisyonunu korumalıdır.

Diğer bir ifadeyle, direksiyon pozisyonu sabit tutularak yapılacak ivme artışı sırasında, dönüş yarıçapı değişmez.

Böyle bir taşıt düz yolda ilerlerken, ağırlık merkezine etkiyen bir yanal kuvvetin etkisinde kaldığında, ön ve arka tekerleklerde eşit kayma açıları gelişeceğinden, orijinal doğrultusundan farklı bir açıdaki düz bir doğrultuyu izler.



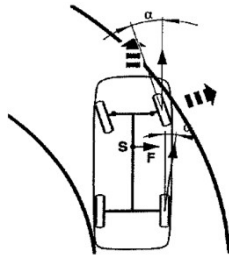
## Yetersiz yönlendirme

Yönlendirme katsayısı  $c_s > 0$  olduğunda, ( $\alpha_f > \alpha_r$ ), sabit yarıçaplı bir virajı almak için gerekli yönlendirme açısı  $\delta_f$  hızın karesiyle orantılı olarak artmaktadır. Bu kullanım özelliğine sahip taşıtlara "yetersiz yönlendirmeli taşıt" denir.

Yetersiz yönlendirmeli bir taşıtla, sabit yarıçaplı bir virajda hızlanan bir taşıtın sürücüsü, direksiyon açısını artırmak zorundadır.

Diğer bir ifadeyle, sabit bir direksiyon açısında hızlanan böyle bir taşıtın dönme yarıçapı büyür.

Düz yolda gitmekte olan yetersiz yönlendirmeli bir taşıta, yanal kuvvet etkiğinde; taşıtın ön tekerlekleri, arka tekerleklerinden daha büyük sapma açısı geliştirir ( $\alpha_f > \alpha_r$ ) ve oluşan sapma hareketi, taşıtı kuvvetten uzaklaşmaya yöneltir.



## Yetersiz yönlendirme...

• Yetersiz yönlendirmeli taşıtlarda, herhangi bir virajı dönmek için gerekli olan açının  $2L/r_c$  ye eşit olduğu durumdaki hızla, "karakteristik hız ( $v_{ch}$ )" denir.

• Karakteristik hızda taşıta düşük hız veya nötr yönlendirmeye oranla iki katı direksiyon açısı gerekir.

• Karakteristik hız :

$$\frac{2L}{r_c} = \frac{L}{r_c} + c_s \frac{v^2}{gr_c} \quad v_{ch} = \sqrt{\frac{gL}{c_s}}$$

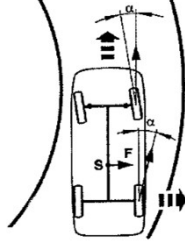
## Aşırı yönlendirme

Yönlendirme karakteristiği  $c_s < 0$  ise, ( $\alpha_f < \alpha_r$ ), sabit yarıçaplı bir virajı geçmek için gerekli yönlendirme açısı, hız arttıkça azalmaktadır. Bu tür kullanım özelliğine sahip taşıtlara "aşırı yönlendirmeli taşıt" denir.

Aşırı yönlendirmeli bir taşıt, sabit yarıçaplı bir virajda hızlanırken, sürücünün direksiyon açısını azaltması gereklidir.

Diğer bir ifadeyle, böyle bir taşıt, sabit direksiyon açısıyla hızlanırken, dönüş yarıçapı azalmaktadır.

Doğrusal hareket halindeki aşırı yönlendirmeli bir taşıtın ağırlık merkezine, yanal bir kuvvet etkilediğinde; ön tekerlekler, arka tekerleklerden daha küçük kayma açısı geliştireceğinden ( $\alpha_f < \alpha_r$ ), bir sapma hareketi oluşur ve taşıt yanal kuvvet tarafına sapar.



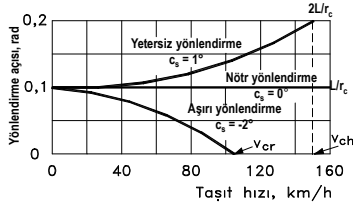
## Aşırı yönlendirme...

- Aşırı yönlendirmeli bir taşıtta, herhangi bir virajı dönmek için gerekli yönlendirme açısının sıfır olduğu hıza "kritik hız" denir.
- Kritik hızda taşıt sıfır derece direksiyon açısında bile kararsız bir şekilde döner.
- Kritik hız

$$\frac{L}{r_c} = c_s \frac{v^2}{gr_c} = 0 \quad v_{cr} = \sqrt{\frac{gL}{-c_s}}$$

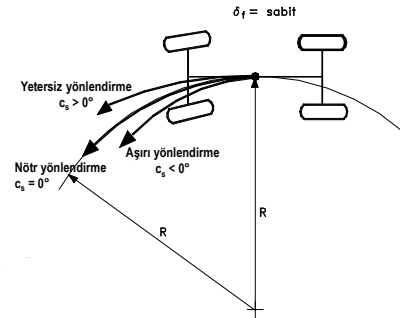
## Hız-yönlendirme açısı ilişkisi

Hız-yönlendirme açısı ilişkisi, ( $r_c = 30$  m,  $L = 3$  m)



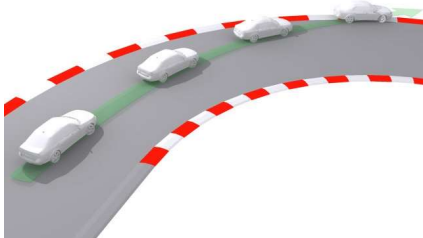
## Dönüş tutumları

Sabit direksiyon açısındaki dönüş tutumları



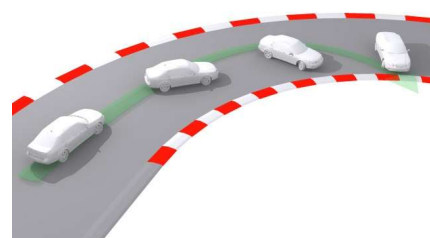
## Dönüş tutumları...

Yetersiz yönlendirme



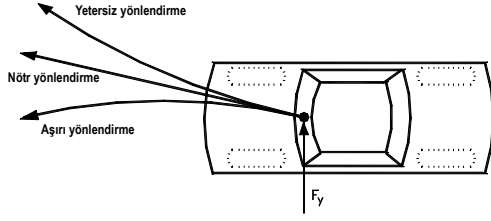
## Dönüş tutumları...

Aşırı yönlendirme



## Dönüş tutumları...

Yanal kuvvet etkisindeki üç tip taşıtın doğrultu tutumu



## Dönüş tutumları...

- Taşıtın kararlı kullanım karakteristiklerini etkileyen ana faktörler; ağırlık dağılımı ve lastiklerin dönüş katlıkları (cornering stiffness)'dir.
- Ağırlığının büyük bölümü ön lastiklere etkiyen, önden motorlu ve önden çekişli taşıtlar, yetersiz yönlendirme eğilimlidir.
- Ağırlığının büyük bölümü arka lastiklere etkiyen, arkadan çekişli taşıtlar ise, aşırı yönlendirme eğilimlidir.
- Ağırlık dağılımının değişimi, kullanım davranışını da değiştirmektedir.
- Üç tip yönlendirme özelliği arasında, doğrultu kararlılığı açısından istenmeyeni, aşırı yönlendirme davranışıdır.
- Taşıtların, 0,4 g gibi belirli bir yanal ivme değerine kadar, küçük bir miktar yetersiz yönlendirmeli olması arzu edilmektedir.

## ÖRNEK

Dingilleri arası 2,6 m olan, 10 kN ağırlığındaki bir taşıtın statik ağırlık dağılımı % 55 ön, % 45 arka tekerlekler şeklindedir. Bu taşıtın;

- Ön lastiklerin yanal kuvvet katsayısı 39 kN/rad ve arka lastiklerin yanal kuvvet katsayısı 38,3 kN/rad olduğuna göre, taşıtın kararlı kullanım davranışını,
- Sadece ön lastiklerin, yanal kuvvet katsayısı 55 kN/rad olan radyal lastiklerle değiştirildiği durumdaki kararlı kullanım davranışını, belirleyiniz.

## ÇÖZÜM

$$c_s = \frac{W_f}{c_{af}} - \frac{W_r}{c_{ar}} = \frac{10000 \times 0,55}{2 \times 39000} - \frac{10000 \times 0,45}{2 \times 38300} = 0,012 \text{ rad} = 0,69^\circ$$

$c_s$  nin değeri pozitif olduğundan, taşıt yetersiz yönlendirmelidir ve karakteristik hızı

$$v_{ch} = \sqrt{\frac{gL}{c_s}} = \sqrt{\frac{9,81 \times 2,6}{0,012}} = 46,1 \text{ m/s} = 166 \text{ km/h}$$

b) Radyal lastikler takıldığında

$$c_s = \frac{10000 \times 0,55}{2 \times 55000} - \frac{10000 \times 0,45}{2 \times 38300} = -0,0087 \text{ rad} = -0,5^\circ$$

$c_s$  nin değeri negatif olduğundan, taşıt aşırı yönlendirmelidir ve kritik hızı

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{gL}{-c_s}} = \sqrt{\frac{9,81 \times 2,6}{0,0087}} = 54,15 \text{ m/s} = 194,9 \text{ km/h}$$

## Viraj tutumu

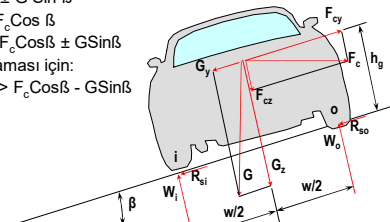
Yol yüzeyine paralel olan kuvvetlerin toplamından;

$$\begin{aligned} \mu_y(G \cos \beta + F_{cz}) &= F_{cy} \pm G \sin \beta \\ F_{cz} &= F_c \sin \beta \text{ ve } F_{cy} = F_c \cos \beta \\ \mu_y(G \cos \beta + F_c \sin \beta) &= F_c \cos \beta \pm G \sin \beta \end{aligned}$$

Taşıtın, viraj dışına kaymaması için:

$$\mu_y(G \cos \beta + F_c \sin \beta) > F_c \cos \beta - G \sin \beta$$

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r_c}$$



$$\mu_y(G \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{r_c} \sin \beta) = \frac{m \cdot v^2}{r_c} \cos \beta - G \sin \beta$$

$$G(\mu_y \cos \beta + \sin \beta) = \frac{m \cdot v^2}{r_c} (\cos \beta - \mu_y \sin \beta)$$

$\cos \beta$ 'ya bölünerek yeniden düzenlenirse, maksimum güvenli hız:

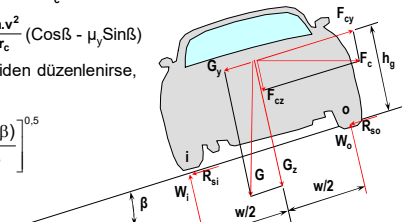
## Viraj tutumu...

$$\mu_y(G \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{r_c} \sin \beta) = \frac{m \cdot v^2}{r_c} \cos \beta - G \sin \beta$$

$$G(\mu_y \cos \beta + \sin \beta) = \frac{m \cdot v^2}{r_c} (\cos \beta - \mu_y \sin \beta)$$

$\cos \beta$ 'ya bölünerek yeniden düzenlenirse, maksimum güvenli hız:

$$v_{max} = \left[ \frac{g r_c (\mu_y + \tan \beta)}{1 - \mu_y \cdot \tan \beta} \right]^{0,5}$$



Taşıtın, viraj merkezine kaymaması için gerekli minimum güvenli hız:

$$\mu_y(G \cos \beta + F_c \sin \beta) + F_c \cos \beta = G \sin \beta$$

$$v_{min} = \left[ \frac{g r_c (\tan \beta - \mu_y)}{1 + \mu_y \cdot \tan \beta} \right]^{0,5}$$

## Virajda yana devrilme

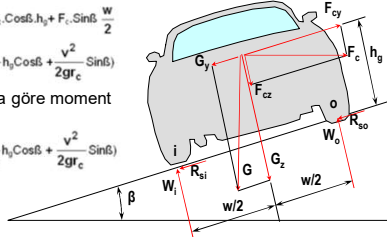
$\Sigma M = 0$  dan;

$$W_i w = G \cos \beta \frac{w}{2} - G \sin \beta h_g + F_c \cos \beta h_g + F_{cy} \sin \beta \frac{w}{2}$$

$$W_i = G \left( \frac{1}{2} \cos \beta - \frac{h_g}{w} \sin \beta + \frac{v^2}{g r_c w} h_g \cos \beta + \frac{v^2}{2 g r_c} \sin \beta \right)$$

Benzer olarak, o noktasına göre moment alındığında;

$$W_o = G \left( \frac{1}{2} \cos \beta + \frac{h_g}{w} \sin \beta - \frac{v^2}{g r_c w} h_g \cos \beta + \frac{v^2}{2 g r_c} \sin \beta \right)$$



Parantez içerisinde bulunan değerler, "dinamik yanıl ağırlık dağılım faktörleri"dir.

Dışarıya doğru devrilmenin başlangıcında, taşıtın tüm ağırlığı dıştaki tekerlekler gelmektedir. Bu nedenle, dış tekerlekler için dinamik yanıl dağılım faktörü 1, iç tekerlek için ise, 0 olacaktır.

## Virajda yana devrilme...

$$\frac{1}{2} \cos \beta + \frac{h_g}{w} \sin \beta - \frac{v^2}{g r_c w} \left( \frac{h_g}{w} \cos \beta - \frac{1}{2} \sin \beta \right) = 0$$

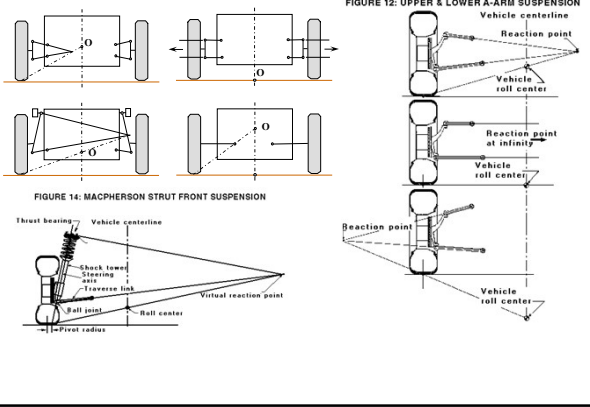
Her terim,  $\cos \beta$  'ya bölüldükten sonra, v için yeniden düzenlenirse;

$$v_{max} = \left[ \frac{g r_c \left( \frac{1}{2} + \frac{h_g}{w} \tan \beta \right)}{\frac{h_g}{w} - \frac{1}{2} \tan \beta} \right]^{0.5}$$

İçte devrilme bakımından minimum hız, dışa devilmeye benzer şekilde fakat dış tekerlek yükü sifira eşitlenerek belirlenebilir.

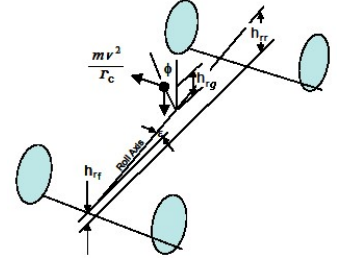
$$v_{min} = \left[ \frac{g r_c \left( \frac{h_g}{w} \tan \beta - \frac{1}{2} \right)}{\frac{h_g}{w} - \frac{1}{2} \tan \beta} \right]^{0.5}$$

## Devrilme merkezi - devrilme eksenini



## Devrilme merkezi - devrilme eksenini...

Yüksek devrilme merkezi, merkezin ağırlık merkezine daha yakın olması demek olduğundan, virajlarda daha az devrilme ihtimali; ancak, sıçramalara bağımlı olarak daha çok iz değişimi demektir.



## Devrilme açısı

Ağırlık merkezinin devrilme eksenine uzaklığı:

$$h_{ig} = h_g - \frac{L_r h_r - L_r h_r}{L}$$

$h_{rt}$ ,  $h_{rr}$ : ön ve arka devrilme merkezlerinin zemine uzaklığı, m,

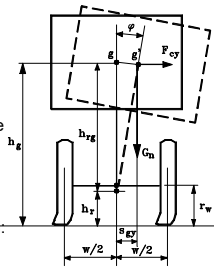
Devrilme açısı  $\phi$  genellikle  $10^\circ$  yi geçmediğinden  $h_g \approx$  sabit kabul edilebilir.

Ağırlık merkezinin y eksenindeki yer değişimi:

$$s_{gy} = h_{ig} \tan \phi$$

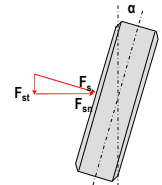
$$\phi = \frac{F_{cy} h_{ig}}{c_{sa} - G h_{ig}}$$

$c_{sa}$ : süspansiyonun açılal katılığı, Nm/rad

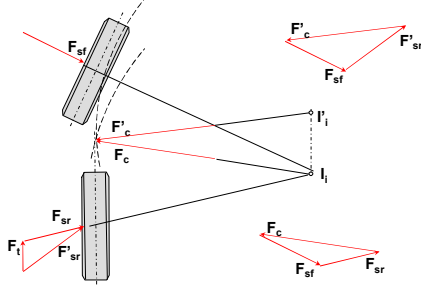


## Tahrik kuvvetinin viraj yeteneğine etkisi

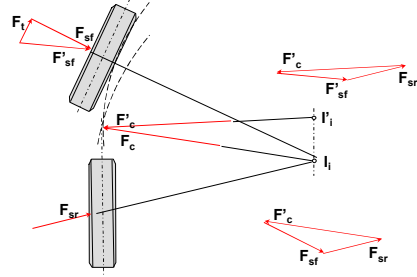
$F_{st}$  kuvvetine "dönüş direnci" adı verilmektedir. Taşıt, dönüş sırasında, tekerleklerinde oluşan bu direnç kuvvetinin etkisiyle yavaşlar.



## Arkadan tahrikli taşıt



## Önden tahrikli taşıt



## Yönlendirme girişlerine kararlı cevap

Taşıt, farklı girişler uygulanan bir kontrol sistemi olarak değerlendirilebilir. Bir dönüş işlemi gerçekleştirilirken; sürücünün uyguladığı direksiyon çevirme "giriş", buna karşı taşıtın hareket değişkenleri olan "sapma hızı", "yanal ivme" ve "dönme yarıçapı" da çıkış değerleri olarak kabul edilirler. Çıkış değerleri, değişik taşıtların cevap karakteristiklerinin karşılaştırılmasında kullanılırlar.

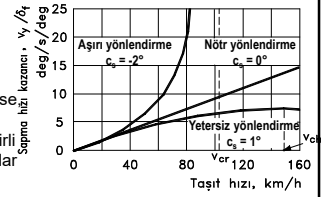
### Sapma hızı cevabı

$$\text{Sapma hızı: } v_y = \frac{v_x}{r_c}$$

$$\text{Sapma hızı kazancı: } \frac{v_y}{\delta_f} = \frac{\frac{v_x}{r_c}}{\frac{L}{r_c} + \frac{c_s \cdot v_x^2}{g r_c}} = \frac{v_x}{\left( L + \frac{c_s \cdot v_x^2}{g} \right) \delta_f} \quad (\text{rad/s/rad})$$

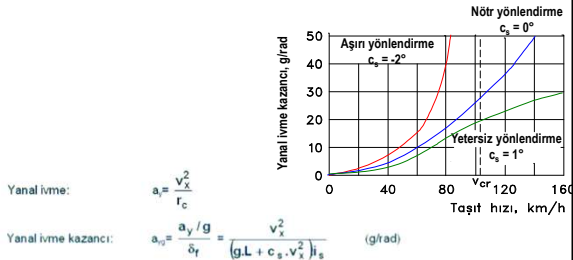
## Sapma hızı cevabı

- Nötr yönlendirmeli bir taşıtta, yönlendirme katsayısı  $c_s$  sıfır olduğundan, sapma hızı kazancı doğrusal olarak değişmektedir.
- Yetersiz yönlendirmeli bir taşıtta ise  $c_s$  pozitifdir. Sapma hızı kazancı, ileriye doğru hızla artarak, belirli bir hızda maksimum oluncaya kadar artmakta, sonra azalmaktadır.



Maksimum sapma hızı kazancının olduğu hız, karakteristik hız ( $v_{ch}$ ) dir. Aşırı yönlendirmeli bir taşıtta ise,  $c_s$  nin değeri negatif ve sapma hızı kazancı hızla artmakta ve belirli bir değerde bölün sıfır olduğunda, sonsuza ulaşmaktadır. Bu andaki hız, kritik hız ( $v_{cr}$ ) dir. Yönlendirme kullanım cevabı açısından, aşırı yönlendirmeli taşıtlar nötr yönlendirmeli taşıtlara oranla çok daha duyarlıdır. Nötr yönlendirmeli taşıtlar ise, yetersiz yönlendirmeli taşıtlara oranla daha uyumludur.

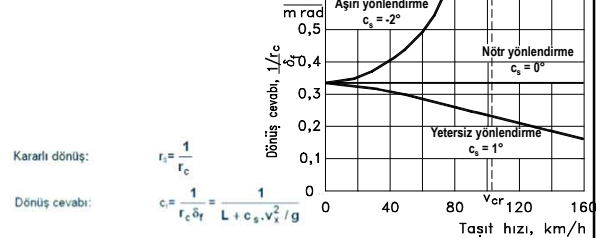
## Yanal ivme cevabı



$$\text{Yanal ivme: } a_y = \frac{v_x^2}{r_c}$$

$$\text{Yanal ivme kazancı: } \frac{a_y}{\delta_f} = \frac{\frac{v_x^2}{r_c}}{\frac{L}{r_c} + \frac{c_s \cdot v_x^2}{g r_c}} = \frac{v_x^2}{\left( g \cdot L + c_s \cdot v_x^2 \right) \delta_f} \quad (\text{g/rad})$$

## Dönüş cevabı



$$\text{Kararlı dönüş: } r_i = \frac{1}{r_c}$$

$$\text{Dönüş cevabı: } c_c = \frac{1}{r_c \delta_f} = \frac{1}{L + c_s \cdot v_x^2 / g}$$

- Dönüş cevabı açısından en duyarlı taşıt, aşırı yönlendirmeli taşıttır.
- $c_s$  negatif olduğundan, belirli bir hızda bölüm sıfıra, dönüş cevabı da sonsuza ulaşır.
- Bu ise, dönüş yarıçapının sıfır olması yani taşıtın geriye dönmesi ve kontrolden çıkması anlamına gelmektedir.

## ÖRNEK

Ağırlığı 10 kN, dingilleri arası 2,6 m olan bir taşıtın statik ağırlık dağılımı; % 55 ön, % 45 arka tekerlekler şeklindedir. Ön tekerleklerin dönüş katılığı 39 kN/rad, arka tekerleklerinki ise 38,3 kN/rad olarak belirlenmiştir. Direksiyon dişli oranı 24:1 olduğuna göre; sapma hızı kazancı ve yanal ivme kazancını, direksiyon açısı cinsinden belirleyiniz.

## ÇÖZÜM

$$c_s = \frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}} = 0,012 \quad \text{rad} = 0,69^\circ$$

Sapma hızı kazancı:

$$v_{yg} = \frac{v_x}{\left( L + \frac{c_s \cdot v_x^2}{g} \right)_s} \quad (\text{rad/s/rad})$$

çeşitli hızlar için hesaplanabilir.

Yanal ivme kazancı:

$$a_{yg} = \frac{v_x^2}{(gL + c_s \cdot v_x^2)_s} \quad (\text{g/rad})$$

değişik hızlar için hesaplanabilir.

SON

