

## BÖLÜM 5: YATAY KURPLAR

### 5.1 GİRİŞ

Kurplar belirli bir doğrultuda giden aliymanların doğrultularının değişmesi gerektiği yerlerde kullanılır. Geçkinin doğrultu değiştirmesinin çeşitli sebepleri vardır. Bunlardan ilki yolun geçtiği bölgenin topografyasıdır. Dağlık ve dalgalı arazilerde zorunlu noktalar arasındaki kot farklarından dolayı, yolun doğrultusu sık sık değişebilir. Düz arazilerde doğrultu değişmesi ve yatay kurp ihtiyacı azdır.

Bununla birlikte düz arazilerde de topografyadan kaynaklanan doğrultu değişiklikleri olmasa bile monotonluğu azaltmak için yatay kurp kullanılır. Zira çok uzun aliymanlarda sürücülerin dikkatleri dağılır. Gece sürüşlerinde sürekli karşı yönden gelen trafiğin far ışıklarından kaynaklanan göz kamaşması meydana gelir. Aynı şekilde doğu-batı yönünde gitme durumu varsa, sabah güneş doğarken, akşam güneş batarken sürücülerin gözleri güneş ışığı ile kamaşır.

Bu gibi mahzurlu durumları azaltmak maksadıyla belirli bir mesafeden (8-10 km) daha fazla aliyman boyu istenmez.

Şayet uzun aliymanlardan kaçınılmıyorsa en azından aliymanların boyu kısaltılarak aralarına büyük yarıçaplı kurplar yerleştirilmesi yoluna gidilir.

Yatay kurplar tasarlanırken yolun güvenlik, kapasite ve yolculuk konforu gibi hususlar açısından öngörülen standartları sağlaması istenir. Bu açıdan doğru tasarlanmamış yatay kurplarda işletme hızı düşeceğinden yolun kapasitesi ve hizmet düzeyi de düşer. Taşıtların savrulma ve devrilme etkilerine maruz kalmalarından dolayı bir çok trafik kazası meydana gelme ihtimali doğar. Diğer taraftan kötü tasarlanmış yatay kurplar konforu bozarak kötü yolculuk şartlarına sebep olurlar.

Bu sebeplerden ötürü yatay kurplar karayolundaki kritik kesimleri oluştururlar ve detaylı olarak analiz edilmeleri gerekir. Yatay kurplar genellikle daire yaylarından meydana gelir. Küçük kurp yarıçaplarında belirli bir hızın üzerinde seyredildiğinde aliymandan kurba geçişte taşıt içinde bulunanlar bir savrulma etkisine maruz kalırlar. Bu etkiyle seyahat konforu düşer. Seyahat konforunu belirli bir düzeyde korumak için aliymanla kurp arasına geçiş eğrisi veya rakortman adı verilen özel eğriler yerleştirilir. Böylelikle merkezkaç kuvvetinin ani etkisi azaltılmış olur.

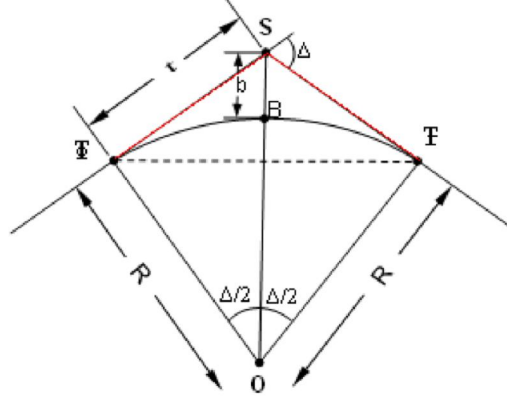
Küçük yarıçaplı yatay kurplarda güvenli ve konforlu seyir şartlarını sağlamak için başvurulan bir diğer yol ise dever uygulamasıdır. Dever, kısaca, yola enine yönde verilen eğimdir. Yola verilen dever sayesinde taşıtın maruz kaldığı merkezkaç kuvvetinin bir kısmı güvenli ve konforlu bir şekilde karşılanır.

Uygulamada üç türlü yatay kurp ile karşılaşılır. Bunlar:

- a) Basit yatay kurplar
- b) Birleşik yatay kurplar
- c) Ters yerleştirilmiş yatay kurplar

## 5.2 BASİT YATAY KURPLAR

Basit yatay kurplar iki aliymanı birbirine bağlamak için kullanılır. Bir basit yatay kurbun beş temel elemanı vardır. Bunlar; sapma açısı ( $\Delta$ ), yarıçap ( $R$ ), teğet uzunluğu ( $t$ ), developman uzunluğu ( $D$ ) ve bisektris uzunluğu ( $b$ ) olup karp karakteristikleri olarak da bilinirler.



Şekil 5.1: Basit yatay karp ve elemanları (karakteristikleri)

Aliymanların kurplar yerleştirilmeden önceki kesişme noktalarına **some noktası (S)** denir. Aliyman doğrultuları arasındaki açı ise **sapma açısı ( $\Delta$ )** olarak adlandırılır. Basit yatay kurpta her iki teğet uzunluğu da geometri gereği birbirine eşittir ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunur:

$$t = R \cdot \tan\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (5.1)$$

İlk teğet noktasına **kurbun başlangıcı, girişi, birinci teğet noktası** veya **tanjant orijin** adı verilir. Diğer teğet noktasına ise **kurbun sonu, çıkışı, ikinci teğet noktası** veya **tanjant final** adı verilir. İki teğet noktası arasında kalan daire yayı, **developman** veya **karp açılımı** olarak adlandırılır. **Developman uzunluğu (D)** basit olarak, merkez açısı bilinen daire yayı uzunluğu formülüyle hesaplanır:

$$D = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{360} \cdot \Delta^\circ \quad (5.2)$$

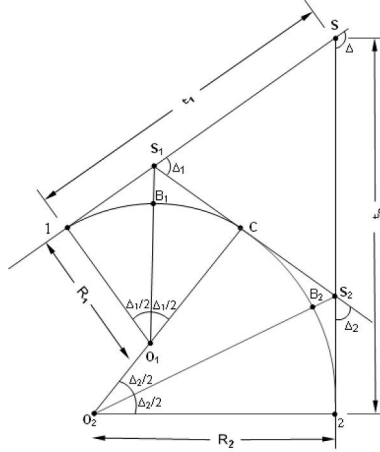
Teğet noktalarından kurbun içine doğru çizilen dikler geometri gereği, **yarıçap (R)** mesafesinde kesişirler. Kesim noktası **yatay kurbun merkezidir (O)**. Yatay kurbun ortasına **bisektris noktası (B)** denir. Bisektris noktasının some noktasına mesafesine **bisektris uzunluğu (b)** adı verilir.

$$b = R \cdot \left( \frac{1}{\cos \frac{\Delta}{2}} - 1 \right) \quad (5.3)$$

Yatay kurbun merkezini some noktasına bağlayan doğru karp merkez açısını iki eşit parçaya böler. Basit yatay kurbun sapma açısı ile merkez açısı da birbirine eşittir.

### 5.3 BİRLEŞİK YATAY KURPLAR

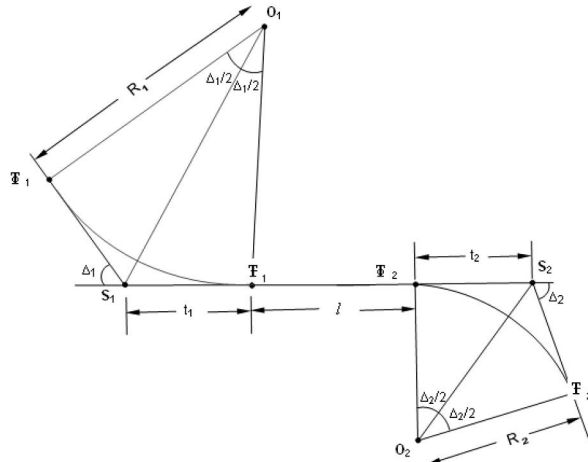
Ortak bir teğetin aynı tarafında ve farklı yarıçaptaki iki daire yayından oluşan yatay kurplardır. Kombine yatay karp adıyla da anılırlar. İlk kurbun ikinci teğeti ile ikinci kurbun ilk teğeti aynı noktadır. Geçki tasarımı sırasında ortaya çıkan kısıtlardan ve özel durumlardan dolayı kullanılırlar. Kırsal yollarda özellikle topografik açıdan geçilmesi zor arazi kesimleri, maliyeti artırıcı doğal engeller ve şehir içi yollarda imar kısıtları birleşik yatay karp kullanılmasını gerektirebilir. Birleşik yatay karp kullanılacaksa da büyük karp yarıçapının, küçük karp yarıçapına oranının en fazla 1,5 olması istenir. Yani;  $R_2 \leq 1,5 R_1$  olmalıdır. Birleşik yatay kurplar  $\Delta$ ,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $t_1$  ve  $t_2$  olmak üzere yedi karakteristik elemanla tanımlanırlar.



Şekil 5.2: Birleşik yatay kurplar ve elemanları (karakteristikleri)

### 5.4 TERS YERLEŞTİRİLMİŞ YATAY KURPLAR

Ortak bir teğetin iki yanında (sağında ve solunda) bulunan iki daire yayından meydana gelirler. Kurpların merkezleri ters yönlerde olduğu için **ters karp** olarak da bilinirler. Normalde her iki kurbun hesabı tekil olarak yapılır. Ancak özellikle düşük standartlı yollarda topografik kısıtlar dolayısıyla iki karp arasındaki düz kısım yetersiz ise tasarım sırasında her iki karp da beraberce ele alınarak çözülür. Zira dever ve geçiş eğrisi uygulamalarını, uzunluğu sınırlı düz kısımda yapmak bir hayli zordur. Bunun için de ilk kurbun bitimi ile ikinci kurbun başlangıcı arasında en azından 60 m mesafe bırakılması önerilir.



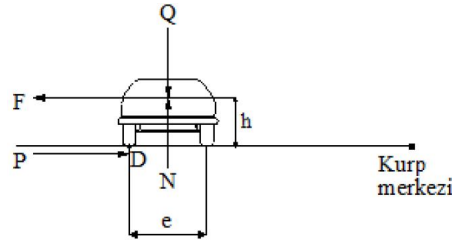
Şekil 5.3: Ters yerleştirilmiş yatay kurplar ve elemanları (karakteristikleri)

## 5.5 YATAY KURPLARDA TAŞIT STABİLİTESİ

### 5.5.1 Deversiz Yatay Kurplarda Taşıtların Stabilitesi

Bir yol kesiminde alıymandan yatay kurba giren bir taşıtların, çeşitli kuvvetlerin etkisinde hareket eder. Bu kuvvetler şunlardır:

- Taşıtların ağırlığından meydana gelen yerçekimi kuvveti (Q)
- Buna karşı koyan, zıt yöndeki tepki kuvveti (N)
- Kurban merkezinden dışına doğru olan merkezkaç kuvveti (F)
- Buna karşı koyan, zıt yöndeki enine sürtünme kuvveti (P)



Şekil 5.4: Yatay kurbun içerisindeki taşıtların etkiyen kuvvetler

Taşıtların dışa doğru önce savrulmasına, yüksek hızla seyrediyorsa, sonra da devrilmesine sebep olan merkezkaç kuvvetinin değeri dinamiğin temel prensibinden yararlanarak şu şekilde ifade edilir:

$$F = m \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (5.4)$$

Burada; F : Merkezkaç kuvveti (N)

m : Taşıtların kütlesi (kg)

v : Taşıtların hızı (m/s)

R : Yatay kurbun yarıçapı (m)

Q : Taşıtların ağırlığı (N)

g : Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Taşıtların, enine eğim yani deversiz verilmemiş bir yatay kurbun da seyrederken bazı kritik hız değerlerini aşarsa savrulma ve devirme etkileriyle karşılaşır. İlk kritik hız değerini aşınca öncelikle savrulur. **Savrulma hızı** aşağıdaki denge şartlarının yazılmasıyla bulunur:

$$\text{Denge şartları: } F = P \quad \text{ve} \quad Q = N \quad (5.5)$$

İkinci denge şartından N terimi yerine Q terimi yazılırsa, sürtünme kuvveti şu şekilde olur:

$$P = \mu_e \cdot Q \quad (5.6)$$

Bu durumda enine sürtünme katsayısını da taşıt ağırlığına bağlı olarak şöylece yazmak mümkündür:

$$\mu_e = \frac{P}{Q} \quad (5.7)$$

Sürtünme kuvveti yerine ilk denge şartındaki merkezkaç kuvveti (P terimi yerine F terimi) yazılırsa, enine sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mu_e = \frac{\frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R}}{Q} = \frac{v^2}{g \cdot R} \quad (5.8)$$

Önceki ifadede taşıtın hızı km/sa ( $v=V/3,6$ ) ve yerçekimi ivmesi  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  olarak yazılırsa enine sürtünme katsayısı için aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$\mu_e = \frac{V^2}{9,81 \cdot R \cdot (3,6)^2} = \frac{V^2}{127 \cdot R} \quad (5.9)$$

Bu durumda hız terimi çekilirse, deversiz bir yatay kurpta savrulmaya sebep olan kritik hız değeri şu şekilde bulunur:

$$V_{sav} = 11,3 \sqrt{\mu_e \cdot R} \quad (5.10)$$

Yatay kurplardaki F merkezkaç kuvvetinin taşıtı devirme etkisi, Q taşıt ağırlığının dıştaki tekerleklerin yol yuvarlanma yüzeyine temas ettiği noktaya uygulanan ( $Q \cdot e/2$ ) momenti ile karşılanır. Buna göre devrilmeye sebep olan hız da Şekil 5.4'de görülen D noktasına göre bu kuvvetlerin moment dengesi yazılarak aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$F \cdot h = Q \cdot \frac{e}{2} \quad \left(\frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R}\right) \cdot h = Q \cdot \frac{e}{2} \quad v = \sqrt{\frac{e}{2} \cdot \frac{g \cdot R}{h}} \quad (5.11)$$

Burada; F : Merkezkaç kuvveti (N)

h : Taşıtın ağırlık merkezinin kaplama yüzeyine mesafesi (m)

Q : Taşıtın ağırlığı (N)

e : Taşıtın tekerlekleri arasındaki mesafe (m)

g : Yerçekimi ivmesi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

v : Taşıtın hızı (m/s)

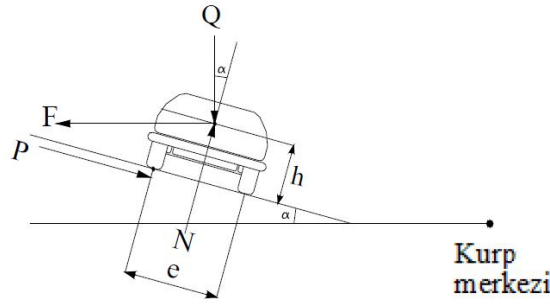
R : Kurp yarıçapı (m)

Hız km/sa cinsinden ( $v=V/3,6$ ) ifade edilip, yerçekimi ivmesinin değeri ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ) yerine konulursa **devrilme hızının** son hali şöyle olur:

$$V_{\text{dev}} = 8,0 \sqrt{\frac{e \cdot R}{h}} \quad (5.12)$$

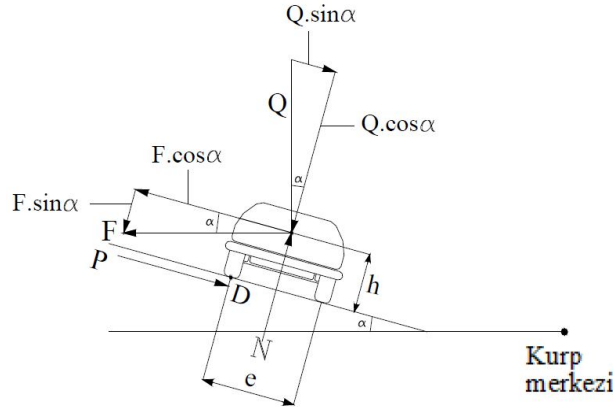
### 5.5.2 Deverli Yatay Kurplarda Taşıt Stabilitesi

Pratikte, stabiliteyi bozan merkezkaç kuvvetinin savurma ve devirme etkilerini karşılamak için yol enkesitine enine yönde ve çeşitli şekillerde eğim verilir. Aşağıdaki şekilde bir örneği görülen enine eğim, yol eksenine veya yol kenarlarına ait kotların belirli mesafeler içinde değiştirilmesiyle verilir ve **dever** olarak anılır.



Şekil 5.5: Yatay kurpta dever uygulanması ve taşıta etkiyen kuvvetler

Dever verilmiş kurplarda savrulma ve devrilmeye yol açan kritik hızlar da deversiz durumda olduğu gibi, denge şartlarından yararlanılarak bulunur. Bunun için şekilde görülen merkezkaç kuvveti ve taşıt ağırlığını eğik düzleme paralel ve dik olan bileşenlerine ayırmak gerekir.



Şekil 5.6: Deverli yatay kurpta taşıta etkiyen kuvvetler ve bileşenleri

Taşıt ağırlığı ve sürtünme kuvveti merkezkaç kuvvetine karşı koymaya çalıştığı için, denge denklemini şu şekilde yazmak mümkündür:

$$F \cdot \cos \alpha = Q \cdot \sin \alpha + P \quad (5.13)$$

P sürtünme kuvveti, kendisine dik normal kuvvet (burada bileşenleri kullanılacaktır) ile sürtünme katsayısının çarpımı olduğuna göre şekilden yararlanarak denklem şöyle ifade edilebilir:

$$F \cdot \cos \alpha = Q \cdot \sin \alpha + \mu_e \cdot (Q \cdot \cos \alpha + F \cdot \sin \alpha) \quad (5.14)$$

Denklemden F merkezkaç kuvveti yerine açılmış hali yazılırsa;

$$\frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos \alpha = Q \cdot \sin \alpha + \mu_e \cdot (Q \cdot \cos \alpha + \frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \sin \alpha) \quad (5.15)$$

olur. Bu durumda denklemin her iki tarafı  $\cos \alpha$ 'ya bölünür ve Q terimleri sadeleştirilirse,

$$\frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} + \mu_e \cdot \left( \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha} + \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \right) \quad (5.16)$$

elde edilir. Denklemden aşağıdaki sadeleştirmeler yapıldıktan sonra kritik savrulma hızı bulunur:

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = \operatorname{tg} \alpha + \mu_e \cdot \left( 1 + \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) \quad \frac{v^2}{g \cdot R} (1 - \mu_e \cdot \operatorname{tg} \alpha) = (\operatorname{tg} \alpha + \mu_e)$$

$$v^2 = \frac{(\operatorname{tg} \alpha + \mu_e) \cdot (g \cdot R)}{(1 - \mu_e \cdot \operatorname{tg} \alpha)} \quad v = \sqrt{\frac{(\operatorname{tg} \alpha + \mu_e) \cdot (g \cdot R)}{(1 - \mu_e \cdot \operatorname{tg} \alpha)}} \quad (5.17)$$

Hız km/sa cinsinden ( $v=V/3,6$ ) ifade edilip, yerçekimi ivmesinin değeri ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ) yazılırsa **deverli durumdaki savrulma hızı** şu şekilde yazılır:

$$V_{\text{sav}} = 11,3 \sqrt{\frac{R \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \mu_e)}{(1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \mu_e)}} \quad (5.18)$$

Şayet deverli kurplar için yukarıdaki verilen bağıntıda  $\operatorname{tg} \alpha=0$  değeri yazılırsa, denklem (5.10)'da verilen deversiz kurplar için kritik hız bağıntısı elde edilir.

Dever verilmiş kurplarda devrilmeye yol açan kritik hız ise şekilde görüldüğü gibi taşıtın dıştaki tekerleğinin yol yuvarlanma yüzeyine değdiği D noktasındaki moment dengesinden yararlanılarak bulunur:

$$F \cdot \cos \alpha \cdot h = Q \cdot \sin \alpha \cdot h + Q \cdot \cos \alpha \cdot \frac{e}{2} + F \cdot \sin \alpha \cdot \frac{e}{2} \quad (5.19)$$

Denklemden F merkezkaç kuvveti yerine konulursa denklem şu hale gelir:

$$\frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos \alpha \cdot h = Q \cdot \sin \alpha \cdot h + Q \cdot \cos \alpha \cdot \frac{e}{2} + \frac{Q}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{e}{2} \quad (5.20)$$

Daha önceki durumlarda olduğu gibi, denklemin her iki tarafı  $\cos \alpha$ 'ya bölünüp Q terimleri sadeleştirilir ve hız terimi yalnız bırakılırsa denklemin son hali şu şekilde olur:

$$v = \sqrt{\frac{(\operatorname{tg} \alpha \cdot h + \frac{e}{2}) \cdot (g \cdot R)}{(h - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{e}{2})}} \quad (5.21)$$

Hız km/sa cinsinden ( $v=V/3,6$ ) ifade edilip, yerçekimi ivmesinin değeri ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ) yazılırsa **deverli durumdaki devrilme hızı** şu şekilde yazılır:

$$V_{\text{dev}} = 11,3 \sqrt{\frac{R \cdot (\operatorname{tg} \alpha \cdot h + \frac{e}{2})}{(h - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{e}{2})}} \quad (5.22)$$

Bilindiği üzere karayolu, başlangıçta seçilen belirli bir proje hızına göre tasarlanır. Belirli bir  $V_p$  proje hızında savrulma ve devrilmeye yol açmayacak minimum kurp yarıçapları ise bağıntılardan yararlanılarak aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır:

$$R_{\min(\text{sav})} \geq \frac{V_p^2 \cdot (1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \mu_e)}{127 \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \mu_e)} \quad (5.23)$$

$$R_{\min(\text{dev})} \geq \frac{V_p^2 \cdot (h - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{e}{2})}{127 \cdot (\operatorname{tg} \alpha \cdot h + \frac{e}{2})} \quad (5.24)$$

### 5.5.3 Minimum Kurp Yarıçapı

Daha önce belirtildiği gibi dever verilmiş kurplarda merkezkaç kuvveti ile bunu dengeleyen kuvvetler arasındaki denge denklemini, aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = \operatorname{tg} \alpha + \mu_e + (\mu_e \cdot \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \operatorname{tg} \alpha) \quad (5.25)$$



Bu denklemin sağ tarafındaki üçüncü terim, diğerlerinin yanında (özellikle  $\mu_e$ 'nin) daha küçük olduğundan ihmal edilebilir seviyededir. İhmal edilen bu terim düşürülürse, denge denkleminin yeni hali şu şekilde olur:

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = \text{tg}\alpha + \mu_e \quad (5.26)$$

Denklem, enine eğim  $\tan\alpha$  yerine, q dever miktarı yazılırsa ( $q = \tan\alpha$ ) aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = q + \mu_e \quad (5.27)$$

Hız km/sa'e çevrilip ( $v = V/3,6$ ) yerçekimi ivmesinin değeri ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ) yazılırsa denklemin son hali ise şöyledir:

$$\frac{V^2}{127 \cdot R} = q + \mu_e \quad (5.28)$$

Bu durumda açıkça görülmektedir ki merkezkaç kuvvetinin bir kısmı deverle bir kısmı da enine sürtünme aracılığıyla karşılanır. Merkezkaç kuvvetinin ne şekilde karşılanacağını belirlemesi konusunda çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu hususta çeşitli ülkelerde farklı uygulamalar yapılmaktadır. Bağıttan R karp yarıçapı terimi çekilirse, tasarımda öngörülen bir proje hızına göre gerekli olan minimum karp yarıçapı ifadesi şu şekilde yazılır:

$$R_{\min} = \frac{V_p^2}{127 \cdot (q + \mu_e)} \quad (5.29)$$

Burada;  $R_{\min}$  : Minimum karp yarıçapı (m)

$V_p$  : Proje hızı (km/sa)

q : Dever eğimi ( $q = \tan\alpha$ )

$\mu_e$  : Enine sürtünme katsayısı

Enine sürtünme katsayısının değeri ( $\mu_e$ ) daha önce belirtildiği üzere, kaplamanın cinsi, pürüzlülüğü, ıslak veya kuru olması, tekerlek lastiğinin eski yada yeniliği, dişlerinin özelliği, içindeki havanın basıncı, seyir esnasındaki sıcaklığı ve taşıtın hızı gibi birçok faktöre bağlıdır. Kuru ve pürüzlülüğü yüksek kaplamalarda enine sürtünme katsayısı değeri de büyüktür. Ancak güvenlik açısından hesaplarda küçük değerler almak uygun olur. Uygulamada genellikle  $\mu_e = 0,08-0,18$  aralığında değerlerin alınması önerilmektedir. Buna benzer şekilde tasarım esnasında kabul edilecek maksimum dever miktarı ( $q_{\max}$ ) da merkezkaç kuvvetinin karşılanması ve dolayısıyla minimum karp yarıçaplarının tayini açısından önemlidir. Bu değerlerin de yüksek standartlı yollar ile kent içi yollarda en fazla 0,04 alınması; nispeten düşük standartlı yollarda ise 0,08 veya 0,10 olarak alınması tavsiye edilmektedir.

#### 5.5.4 Dever

Daha önce tanımlandığı gibi, yatay kurpta belirli bir hızla seyir esnasında, taşıt stabilitesini bozan merkezkaç kuvvetinin savurma ve devirme etkilerini karşılamak amacıyla yol enkesitine enine yönde verilen eğime dever denir. Stabilitiye katkıda bulunan önemli diğer bir unsur da enine sürtünmedir. Bir an için, enine sürtünmenin olmadığı veya ihmal edildiği idealleştirilmiş bir durum varsayılırsa, merkezkaç kuvvetinin tamamı deverle karşılanıyor demektir. Denklem (5.28)'de  $\mu_e=0$  yazıldığında şu ifade elde edilir:

$$\frac{V^2}{127 \cdot R} = q \quad (5.30)$$

Bu durumda bulunan enine eğime, **teorik dever** adı verilir. Bunun anlamı, teorik olarak enine sürtünme etkisinin bulunmadığı bir kurpta, merkezkaç kuvvetini karşılamak üzere verilmesi gerekli olan dever miktarının, taşıt hızı ve kurp yarıçapına bağlı olduğudur. Doğaldır ki böyle bir durumda enine ivme değeri de sıfır olacaktır.  $V_p$  proje hızıyla tasarlanan bir yoldaki teorik dever şu şekilde belirlenir:

$$q_{\text{teo}} = \frac{V_p^2}{127 \cdot R} = 0,00786 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (5.31)$$

Dever, ondalık olarak değil de yüzde cinsinden kullanılıyorsa, bağıntı şu hali alır:

$$q_{\text{teo}} = 0,786 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (5.32)$$

Teorik dever uygulamada doğrudan kullanılamaz; zira değeri yüksektir. Taşıt (özellikle ağır taşıtlar), belirlenen proje hızından daha düşük hızlardaki seyir şartlarında veya yatay kurp kesimindeki duruşlar için, teorik dever formülüyle bulunan enine eğimlerde stabilitesini koruyamayıp kurp içine doğru kayabilir veya devrilebilir. Özellikle aşırı ve dengesiz yükleme durumlarında ortaya çıkan momentler kayma veya devrilme hareketini kolaylaştırır. Yüksek değerdeki enine eğimin sebep olduğu merkezci kuvvet bu şartlarda merkezkaç kuvvetinden daha büyük olabilmektedir. Bunun sonucu olarak kullanımda bir üst sınır olmak üzere,  $q_{\text{maks}}$  tanımlanması gereği vardır.

Diğer taraftan, gerçek hayat şartlarında, sürtünme küçük olabilir ama yok sayılmayacak mertebede etkileriyle karşılaşılır. Bu yüzden gerçekte merkezkaç kuvvetinin etkisini karşılamak üzere enine sürtünmenin katkısı göz ardı edilemez. Böylece de merkezkaç kuvvetinin ne kadarının deverle, ne kadarının enine sürtünme ile karşılanacağı problemi ortaya çıkar. Konu ile ilgili olarak literatürde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Ancak şu kadarı söylenebilir ki, durumu gerçeğe yaklaştırmak için, bazı ülkelerde merkezkaç kuvveti etkisinin yarısının deverle, diğer yarısının da enine sürtünme ile karşılandığı kabulüne göre teorik dever formülü düzeltilmektedir. Bu şekilde elde edilen dever miktarına **pratik dever** adı verilir. Dever formülü bu durumda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$q_{\text{pratik}} = 0,786 \cdot \frac{V_p^2}{R} \cdot 0,50 = 0,393 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (5.33)$$

Ülkemizde uygulanan pratik dever formülü, merkezkaç kuvveti etkisinin yaklaşık %56'sının deverle, %44'ünün enine sürtünme ile karşılandığı kabulüyle elde edilmiştir. Buna göre ülkemiz için proje hesaplarında kullanılan formül şu şekildedir:

$$q_{\text{pratik}} = 0,786 \cdot \frac{V_p^2}{R} \cdot 0,56 = 0,443 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (5.34)$$

Deverin üst sınırı ( $q_{\text{maks}}$ ) yolun sınıfına ve dolayısıyla proje hızına göre genellikle %4 ile %10 değerleri arasında değişir. Kent içinde hızlar düşük olduğundan maksimum dever miktarı da düşüktür. Kentdışı yollarda yolun sınıfı, kış mevsimindeki karlanma ve buzlanma şartları da dikkate alınarak %8-%10 değerleri kullanılabilir. Ayrıca, ihtiyaçlar ve uygun şartlar neticesinde, istisnâ olarak %12 değerinin kullanılması da mümkündür. Drenaj ihtiyacına veya kentiçi ve kentdışı yol olmasına göre %1,5 ile %3 sınırları arasındaki çatı eğimlerine karşılık gelen dever miktarı, minimum dever ( $q_{\text{min}}$ ) olarak bilinir. Uygulamada en çok kullanılan çatı eğimi,  $q_{\text{min}}=\%2$ 'dir.

### 5.5.5 Deverin Uygulanması

Bilindiği gibi karayolu tasarımı, başlangıçta seçilen yol sınıfına göre belirlenmiş proje standartlarına uygun olarak yapılır. Proje standartları, tasarımda uyulacak sınır değerlerin tanımlanması bakımından önemlidir. Deverin uygulanmasında da standartlara bağlı hususlar söz konusudur. Maksimum dever miktarı ( $q_{\text{maks}}$ ), yolun çatı eğimi olarak da bilinen minimum dever miktarı ( $q_{\text{min}}$ ) ve minimum dever uygulama boyu  $L_{d(\text{min})}$  bunların başlıcalarıdır.

Kurp yarıçaplarının çok büyük olduğu yol kesimlerinde ya da çok düşük standartlı yollarda aliymandan dairesel yatay kurba girişlerde güvenliği ve konforu artırmaya yönelik olarak ilave yol elemanları (geçiş eğrileri, rakortman) kullanılmayabilir. Bu durumda yapılan uygulama, geçiş eğrisiz dever uygulaması adıyla anılır.

Deverin seçilen proje hızı ve uygulanan kurp yarıçapına göre ulaşması istenen en büyük değeri (hesaplanan maksimum değeri) daha önce belirtildiği üzere ülkemizde kullanılan

$$q = 0,443 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (5.35)$$

formülüyle bulunur. Burada da,  $q \leq q_{\text{maks}}$  kısıtına uymak gerekir. Bu kısıt sağlanamıyorsa yani hesaplanan dever miktarı,  $q > q_{\text{maks}}$  oluyorsa, hesaplamalar için  $q = q_{\text{maks}}$  alınarak, ya proje hızı değiştirilmeden kurp yarıçapı artırılır ya da kurp yarıçapı değiştirilmeden hesaplara esas teşkil eden proje hızı düşürülür. Bu durumda bulunan hıza **kısıt hızı** ( $V_k$ ) denir ve uygulamada yolun bu kesimine hız kısıtlamasına yönelik trafik uyarı işaretleri konur. Yapılan hesaplamalar sonucunda dever miktarı  $q < q_{\text{min}}$  olarak bulunursa, ilgili yarıçaplı yatay kurp için dever uygulaması yapmaya gerek yoktur.

Dever, aliymanda verilen çatı eğiminden hesaplanan maksimum değerine bir anda ulaşamaz. Bu geçişin güvenli ve konforlu olarak yapılabilmesi için belirli bir mesafeye ihtiyaç vardır. Dever uygulama boyu ( $L_d$ ) denilen bu mesafe aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır:

$$L_d = 0,0354 \cdot \frac{V_p^3}{R} \quad (5.36)$$

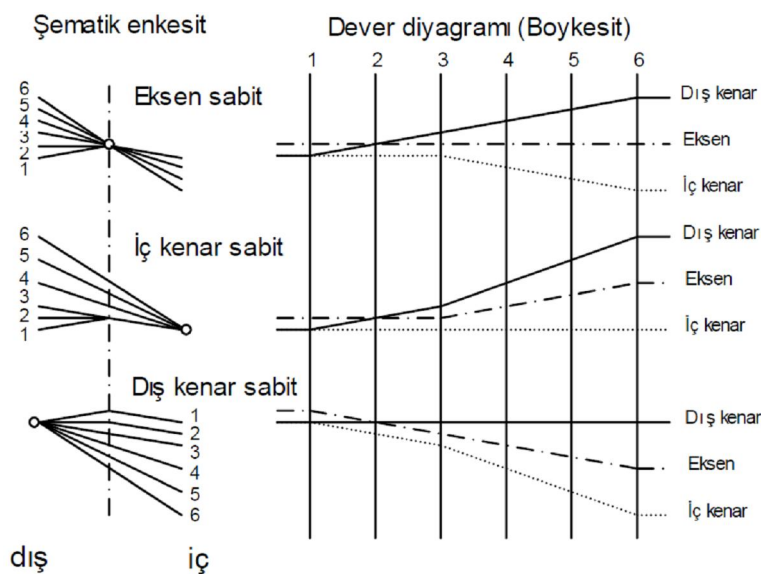
Bulunan bu değer  $L_d \geq L_{d(\min)} = 45$  m kısıtını sağlamalıdır. Şayet sağlamıyorsa  $L_d = 45$  m alınarak hesaplara devam edilir. Düz kısımda hareket eden taşıtın kurba girmesiyle beraber, merkezkaç kuvveti etkisinden dolayı stabilitesi bozulur ve içindeki yolcular konforsuzluğu hissetmeye başlar. Bu etkiyi karşılamaya yönelik tedbirler kurp girişinde alınmış olmalıdır. Bunun için de kurba girildiğinde çatı eğiminin değişip dever haline yani tek eğime gelmesi gereklidir.

Uygulamada dever verilmesine kurp girişinden belirli bir mesafe önce alıyman üzerindeki bir noktadan başlanıp, kurp içinde belirli bir noktada en büyük değere ulaşılması istenir. Bu bakımdan bağıntı (5.35)'de bulunan uzunluk için, tecrübeler sonucunda, kurp başlangıcından  $2/3L_d$  önce alınan nokta ile,  $1/3L_d$  sonra alınan nokta arasında dever uygulanır. Diğer bir ifadeyle, normal şartlarda, dever uygulaması kurp başlangıcından en az 30 m önce başlayıp, en az 15 m sonra en büyük değerine ulaşacak şekilde yapılmalıdır.

Dever, bu uygulama boyunca lineer (doğrusal) olarak artar. Lineer artıştan dolayı uygulama başlangıcından itibaren belirli bir mesafede, ne kadarlık bir deveere erişildiği kolayca hesaplanabildiği gibi; bunun tersi olarak belirli bir miktardaki deverin uygulama başlangıcından itibaren hangi mesafeye karşılık geldiği de bulunabilir.

Dever, yol ekseninin, kurp merkezi ile aynı taraftaki yolun iç kenarının ve diğer taraftaki dış kenarının durumuna göre üç değişik yöntemle uygulanır. Bu yöntemler şunlardır:

- Eksen sabit dever uygulaması** (yol eksen kotunun sabit tutularak, iç kenar kotunun düşürülüp dış kenar kotunun yükseltilmesiyle)
- İç kenar sabit dever uygulaması** (yol iç kenar kotunun sabit tutularak, eksen ve dış kenar kotlarının yükseltilmesiyle)
- Dış kenar sabit dever uygulaması** (yol dış kenar kotunun sabit tutularak, eksen ve iç kenar kotlarının düşürülmesiyle)

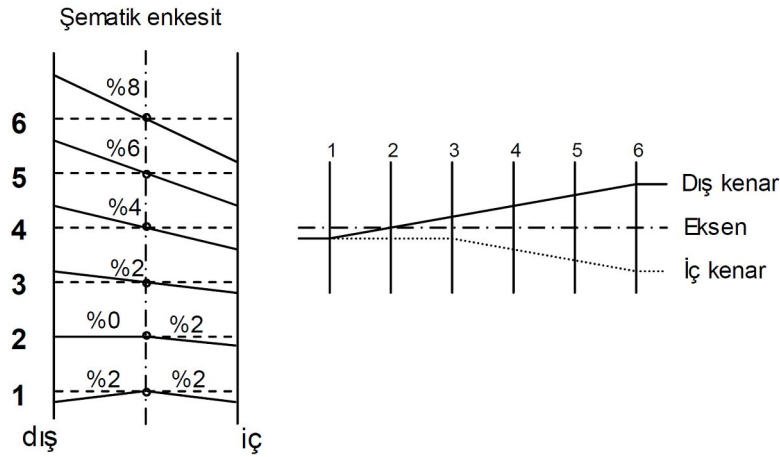


Şekil 5.7: Deverin 3 farklı uygulaması

Eksen kotu sabit tutularak uygulanan birinci yöntemin en olumlu tarafı, boykesitte kırmızı kotları değiştirmeye gerek olmamasıdır. Kenar kotlarının sabit tutularak de-ver verildiği diğer iki yöntemde ise eksen kotları değişeceği için, boykesit kırmızı kotları tekrardan hesaplanmalıdır. İç kenarın sabit tutulması durumunda, eksen kotları yükselir, dış kenarın sabit tutulması durumunda ise düşer. Diğer önemli bir farklılık ise drenaj yapılmasında ortaya çıkar. Eksen ve dış kenarın sabit tutulduğu iki yöntemde yol iç kenarında belirli bir çukurlaşma meydana gelir. Çukurlaşma yüzey sularının drenajını zorlaştırabilir. Bu gibi durumlarda, drenaj probleminin çözümü üzerine özellikle eğilmek yerinde olur.

Hangi yöntemin kullanılması gerektiği hususunda, yatay kurbun bulunduğu yerdeki yarma ve dolgu durumu, dolayısıyla drenaj imkanlarının bilinmesi önem arz eder. Eksen kırmızı kotu yeniden hesaplanmadığı ve kenarlardaki kot yükseltme ve düşürme miktarları diğerlerinden daha az olduğu için en yaygın uygulama, eksen sabit de-ver uygulamasıdır. Burada sadece bu uygulamadan bahsedilecektir.

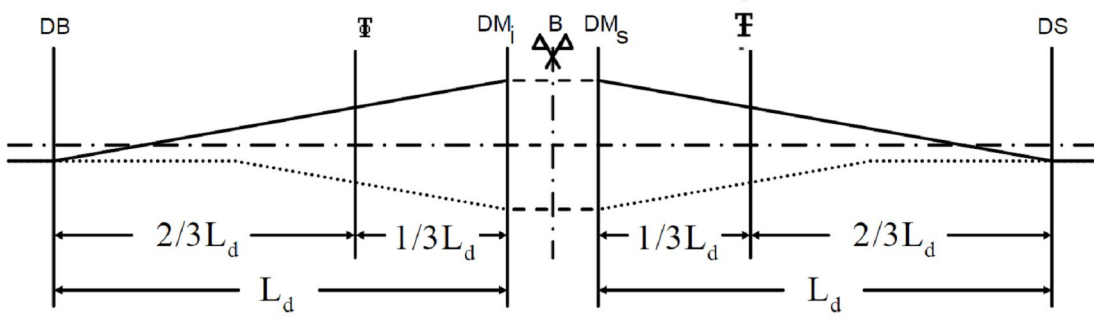
Eksen sabit de-ver uygulamasında, taşıt kurba girmeden  $2/3L_d$  mesafe evvel, çatı eğimi değiştirilmeye başlanır. Değişim, kenarların eksen etrafında döndürülmesi suretiyle yapılır (Şekil 5.8). İlk önce eksen kotundan düşük olan dış kenar kotu kaldırılarak eksenle aynı kota getirilir (2. enkesit). Bu durumda dış kenar tarafındaki platform kesiminin enine eğimi sıfır olur. İç kenar tarafında ise de-ver, hâlâ çatı eğimindedir.



Şekil 5.8: Eksen sabit de-ver uygulaması

Sonra, dış kenar kotu kaldırılmaya devam edilerek, iç kenarla aynı eğime getirilir (3. enkesit). Bu durumda iç kenar ve dış kenar de-ver yükseklikleri eksen kotuna göre mutlak değerce aynı olup; iç kenar kotu aşağıda, dış kenar kotu yukarıdadır. Bu noktadan itibaren tek bir eğime ulaşan yol platformunu, eksen etrafında döndürmeye devam edilir. Her döndürülüşte eğim artışına paralel olarak iç kenar kotu düşer, dış kenar kotu yükselir (4. ve 5. enkesitler). Değişim miktarları eksen kotuna göre mutlak değerce yine aynıdır. Bu arada eksen etrafındaki döndürme işlemi yapılırken yatay kurbun içine girilmiş olur. Yani, artık merkezkaç kuvvetinin sebep olduğu olumsuz etkileri karşılamak üzere, kurp merkezi yönünde, istenilen büyüklükte, tek eğimli bir yuvarlanma yüzeyi elde edilmiş demektir. Yatay kurbun başlangıcından  $1/3L_d$  mesafe sonra, hesaplanan en büyük de-ver değerine ulaşılmca eksen etrafındaki döndürme işlemine son verilir (6. enkesit).

Bu noktadan sonra dever, kurbu meydana getiren daire yayı boyunca maksimum değerinde sabit olarak devam ettirilir. Kurp çıkışında ise aynı sıralı işlemler bu sefer tersi yönünde yapılır. Yani, kurp çıkışından  $1/3L_d$  mesafe önce eksen etrafında döndürme işlemi ters yönde tekrar başlatılır. Bu nokta deverin en büyük değerinde olduğu son noktadır. Kurp çıkışına ulaşıldığında, merkezkaç kuvveti etkilerini karşılamaya yönelik belirli bir dever, ilk kısımdakiyle aynı miktarda yine vardır. Sıralı işlemlerle kurp çıkışından  $2/3L_d$  mesafe sonra dever, çatı eğimine getirilerek uygulama tamamlanır.



**Şekil 5.9:** Eksen sabit dever uygulamasını gösteren simetrik dever diyagramı

Çatı eğiminin değişmeye başladığı nokta (DB), deverin kurp içinde en büyük değerine ulaştığı ilk nokta (DM<sub>i</sub> veya DM<sub>1</sub>), buna simetrik olarak deverin kurp içindeki en büyük değerini aldığı son nokta (DM<sub>s</sub> veya DM<sub>2</sub>) ve kurpun çıkışı tarafında deverin tekrar çatı eğimine döndüğü nokta (DS) notasyonu ile gösterilir. Notasyonun kullanılışı simetrik dever diyagramında görüldüğü gibidir.

Bir dever diyagramı, aynı zamanda dever uygulama uzunluğu boyunca alınan boykesit olduğundan, eksen kotuna kıyasla dever yüksekliklerini gösterir. Dever uygulamasında yapılan kot yükseltme veya düşürme miktarı, b platform genişliği (m) olmak üzere, aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$h = q \cdot \frac{b}{2} \quad (5.37)$$

Bulunan değer negatif (-) ise, eksen kotuna göre düşürülmüş, pozitif (+) ise eksen kotuna göre yükseltilmiş demektir. Minimum ve maksimum dever yüksekliklerini hesaplamak için şu formüller kullanılır:

$$h_{\min} = q_{\min} \cdot \frac{b}{2} \quad h_{\max} = q_{\max} \cdot \frac{b}{2} \quad (5.38)$$

Şayet kurpta genişletme veya daraltma varsa, formüllerdeki platform genişliği terimi yeni duruma göre düzeltilip, hesaplamalar buna göre yapılmalıdır.