

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015505 (991-999)

AKU J. Sci.Eng.18 (2018) 015505 (991-999)

DOI: 10.5578/fmbd.67762

Araştırma Makalesi / Research Article

## Karayolu ve Demiryolu Yatay Eğri Tasarımlarında Sademe Konfor Ölçütünün İncelenmesi

Ahmet Sami KILINÇ<sup>1</sup>, Tamer BAYBURA<sup>2</sup><sup>1</sup> İller Bankası A.Ş., Erzurum Bölge Müdürlüğü, Proje ve Mekansal Planlama Müdürlüğü, Erzurum.<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.e-posta: [akilic@ilbank.gov.tr](mailto:akilic@ilbank.gov.tr), [tbaybura@aku.edu.tr](mailto:tbaybura@aku.edu.tr)

Geliş Tarihi:04.07.2018

; Kabul Tarihi: 07.12.2018

### Özet

Karayolu ve demiryolu ulaşım sistemlerinde kullanılan yatay eğriler güzergahın kritik kesimlerini oluştururlar. Güzergâh boyunca konforun artırılması ve güvenliğin sağlanması açısından üzerinde durulması gereken önemli bir konu minimum eğri yarıçapının belirlenmesidir. Bir güzergahın yatay geometrisinin tasarımı aşamasında, önceden belirlenen en küçük eğri yarıçaplarından daha küçük yarıçaplar kullanılamaz. Bu sebeple, minimum eğri yarıçapı tasarımı dikkate alınması gereken en önemli sınır değerlerden birisidir. Bu değer, dever sınır değerlerine, yanal ivme sınır değerlerine, görüş uzunluklarına ve yanal sademe sınır değerlerine bağlı olarak hesaplanabilir. Bu çalışmada, güzergah geometrisinin tasarımı aşamasında minimum eğri yarıçapını hesaplamak için sademe konfor ölçütü kullanılmıştır. Daha sonra, hesaplanan değerler, konforlu ve güvenli ulaşımı sağlamak için yol-araç dinamikleri için en uygun eğri yarıçapını belirlemek üzere diğer ölçütlere göre hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Farklı hızlarda, şekil ve grafikler üzerinde yapılan karşılaştırmaların sonuçlarına göre, farklı proje hızlarında kullanılacak en iyi ölçütler belirlenmiş ve bu ölçütler için hesaplanan yatay eğri değerlerinin kullanılması önerilmiştir.

### Anahtar kelimeler

Sademe; İvme;  
Ulaştırma; Geçki  
Geometrisi; Yatay Eğri

## Examination of the Rate of Change of Acceleration as Comfort Criterion in Highway and Railway Horizontal Curve Designs

### Abstract

Horizontal curves used in highway and railway transportation systems constitute critical points of routes. An important point to increase comfort throughout the route and ensure safety is the determination of the minimum curve radius. In the design stage of the horizontal geometry of a route, radii that are smaller than predefined values must not be used. For this reason, the minimum curve radius is one of the most important limit values that have to be considered in design. This value can be calculated based on the limit values of superelevation, lateral acceleration, sight distance and rate of change of lateral acceleration. In this study, as a criterion of comfort in the evaluation of route geometry, the rate of change of acceleration was used to compute the minimum curve radius. Then, calculated values were compared to the values calculated according to other criteria to determine the most suitable curve radius for road-vehicle dynamics to ensure comfortable and safe transportation. According to the results of several comparisons made at various speeds, forms and charts, the best criteria that can be used at different project speeds were determined, and the use of horizontal curve values computed for these criteria was recommended.

### Keywords

Rate of Change of  
Acceleration;  
Acceleration;  
Transportation; Route  
Geometry; Horizontal  
Curve

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Bir ulaşım yapısına ilişkin standartların oluşmasında birçok kistasın rolü vardır. Bunların en

önemlilerinden bir tanesi güzergâhın yatay ve düşey geometrisidir (Baybura 2001). Güzergah yatay geometrisi tasarımı üzerinde durulması gereken

ana konulardan birisi güzergâhın doğru parçalarından oluşan kesimlerinin birleştirilmesidir. Farklı doğrultuya sahip iki doğru parçası en basit şekliyle R yarıçaplı bir daire yayı (daireysel kurp) ile birleştirilir (Vatankhah et al. 2013). Ancak, daireysel kurbun doğru parçalarına teğet olduğu noktalarda ortaya çıkan ani merkezkaç kuvvet etkisinin başta güvenlik ve konfor olmak üzere standartlara ilişkin tüm tasarım ölçütlerini olumsuz yönde etkilediği ve işletme hızının artmasıyla bu etkinin tehlikeli boyutlara ulaştığı bilinmektedir (Baybura 2001).

Yatay kurplarda merkezkaç kuvvetinin oluşturduğu enine ivme taşıt güvenliğini azaltmakta ve yolculuk konforunu olumsuz yönde etkilemektedir. Sademe yatay kurplarda meydana gelen enine ivmenin birim zamandaki değişimi olarak tanımlanır. Ulaşım sistemleri tasarımında tasarım ölçütü olarak kullanılan konfor ölçütü sademe değeridir. Yatay kurp tasarımlarında sademe ölçütünün dikkate alınması araç dinamiği, konfor ve güvenlik açısından önem taşımaktadır.

Literatürde bulunan yanal sademe hesap bağıntılarının bir bölümü, birim tutarsızlığı nedeniyle yanlış sonuç vermekte, bir bölümü ise yalnızca sabit hızlı hareket ve lineer eğrilik-dever değişimi için geçerli olabilmektedir (Kahler 1989, Kahler 1990b, Kobryn 1991b, Kobryn 1993, O'Flaherty 1986, Esveld 1989, Umar ve Yayla 1994, Baybura 2001). Baykal (1996)'da yatay geometri dikkate alınarak iki boyutlu, tüm hareket modelleri ve tüm yatay geometri özellikleri için geçerli yanal sademe bağıntıları türetilmiştir. Baybura (2001)'de geçki düşey geometrisindeki eğrilik ve boyuna eğim değişimleri de dikkate alınarak, düşey eğrilik ve boyuna eğim değişimlerini de içeren, genel olarak geçerli üç boyutlu yanal sademe bağıntısı türetilmiştir.

Bu çalışmada, ulaştırma sistemleri yatay geometri tasarımında tasarım ölçütü olarak kullanılacak en küçük yatay kurp yarıçapları konfor ölçütü sademe sınır değerleri kullanılarak türetilmiştir. Sademe ölçütüne bağlı minimum kurp yarıçapı bağıntıları, literatürdeki yanal sademe bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bağıntılar yardımıyla sademe sınır değerlerine göre karayolu ve

demiryolları için en küçük yatay kurp yarıçapları hesaplanmıştır. Hesaplanan yatay kurp yarıçapları, mevcut yöntemlerle elde edilen yatay kurp yarıçapları ve çeşitli ülkelerde karayolu ve demiryolları için önerilen minimum kurp yarıçaplarıyla karşılaştırılmış, sademe kıstasına göre hesaplanan yatay kurp yarıçaplarının kullanılabilirliği değerlendirilmiş, hızlı, güvenli ve konforlu bir yol için en uygun kurp yarıçapı tasarım için önerilmiştir. Çalışma ile karayolu ve demiryolu yatay geçki tasarımında konfor, güvenlik ve kapasite açısından standartların yükseltilmesi amaçlanmıştır.

## 2. En Küçük Kurp Yarıçapı ve Hesabı

Geçki yatay geometrisi yatay kurp tasarımı aşamasında dikkate alınması gereken en önemli kıstaslardan birisi kurp yarıçapıdır. Güzergâhın farklı doğrultularını birleştiren kurplar yolun kritik kesimlerini oluşturmaktadır. Tasarım aşamasında araçların güvenli ve konforlu bir şekilde bu kesimleri geçmelerini sağlayacak en küçük kurp yarıçapı çok iyi belirlenmelidir (Kılınç ve Baybura 2012).

Güzergâhın kritik kesimlerini oluşturan yatay kurplarda kurp yarıçapının meydana gelen kazalar üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Değişik ülkelerde yapılan araştırmalar ve kaza etüt sonuçlarına göre kurp yarıçapı arttıkça kaza riski azalmakta, kurp yarıçapının azalması ise kazaları ciddi oranda artırmaktadır. Kurp yarıçapı ve kazalar arasındaki ilişki konulu farklı ülkelerde yapılan araştırma sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

- ABD'deki yollarda yapılan araştırmaya göre 5000 araç/gün' den daha küçük trafik hacmine sahip yollarda kurp yarıçapının artmasıyla kaza oranının azaldığı, küçük yarıçaplı tek bir kurbun meydana gelen kazalar açısından aynı yarıçaplı ve birbirini takip eden çok sayıda kurptan daha riskli olduğu sonuçlarına varılmıştır (Tunç 2004).
- Almanya'daki düşük ve yüksek hacimli yollarda yapılan araştırmalar düşük trafik hacimli yollardaki küçük yarıçaplı kurplarda kaza sıklığının daha fazla olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır (Tunç 2004).

- İngiltere yollarında yapılan araştırmalar ile küçük yarıçaplı keskin kurplarda meydana gelen kazaların yarıçapı büyük yumuşak kurplardan daha fazla olduğunu sonucunu göstermiştir (Tunç 2004).
- İsveç'teki iki şeritli yollarda yapılan araştırmaların sonucuna göre kurp yarıçapı 1000 m' den küçük olan kurplarda kaza oranlarının azaldığı, kurp yarıçapı 3300 m' den büyük olan kurplarda kurp uzunluğunun fazla olması ve sürücülerin hızlarını artırmaları gibi nedenlerle kaza oranlarının arttığı görülmüştür (Tunç 2004).
- Babkow (1975) Rusya'daki yollarda yaptığı araştırmalarda, Kurp yarıçapını, kurp yarıçapının aliymandan kurba geçişlerde oluşturduğu hız farklarına göre tehlikeli ve güvenli olarak sınıflandırmıştır. Buna göre kurplar, hız farkı % 20' den daha az ise güvenli kurp, hız farkı % 20 ile % 40 arasında ise nispeten güvenli kurp, hız farkı % 40 ile % 60 arasında ise tehlikeli kurp, hız farkı % 60' dan büyük ise çok tehlikeli kurp olarak sınıflandırılmıştır.
- Wilson tarafından yapılan araştırmalara göre kurp yarıçapı 170 m' de küçük kurplardaki kaza oranının kurp yarıçapı 910 m' den büyük olan kurplardaki kaz oranından 5 kat fazla olduğu sonucu çıkmıştır (Tunç 2004).

Karayolu ve demiryollarında yatay kurplar hareket dinamiğinin önemli olduğu kritik kesimlerdir. Yatay kurpların tasarımı aşamasında güzergâh konforunun artırılması ve güvenliğinin sağlanması amacıyla üzerinde durulması gereken önemli bir konu üzerinde birçok faktörün etkili olduğu en küçük kurp yarıçaplarının belirlenmesidir. Geçki yatay geometrisinin tasarımı aşamasında, belirlenen en küçük kurp yarıçaplarından küçük yarıçaplar kullanılamaz. Bu nedenle en küçük kurp yarıçapları tasarım açısından dikkate alınması gereken en önemli sınır değerlerden biridir. En küçük yatay kurp yarıçapı çeşitli yöntemlerle elde edilebilir. Bu yöntemleri birbirinden ayıran temel fark hesaplamalarda farklı parametrelerin

kullanılmasıdır. En küçük yatay kurp yarıçapı dever sınır değerlerine göre, görüş uzaklıklarına göre, yanal ivme sınır değerlerine göre ve yanal sademe sınır değerlerine göre hesaplanabilir (Baykal 2009).

### 2.1 Yanal Sademe

İvmenin birim zamandaki değişim miktarı sademe olarak adlandırılmaktadır. Sademe kavramı mesafenin üçüncü türevi olarak tanımlanır (Schot 1978). Yol güvenliği ve konforu açısından sademe önemli bir tasarım ölçütüdür. Sademe yolculuk konforunu belirlemede kullanılan bir değerdir ve yol tasarımlarında konfor ölçütü olarak bilinir (Manns 1985, Kahler 1990, Kobryn 1993, Megyeri 1993, Anderson 1994, Förstberg 2000, Baykal 2009). Geçki yatay geometrisinde geçki elemanı olarak kullanılan eğrilerin, yol-araç dinamiği yönünden karşılaştırılmasında en uygun ölçüt yanal sademedir (Jacobs 1987, Tarı ve Baykal 1995, Baykal 1996, Baykal vd. 1997, Tarı 1997, Baybura 2001).

Güzergâh boyunca hareket eden bir taşıta yukarıdaki ivmeler etki eder ve bu ivmelerin oluşturduğu bileşke ivme sademeyi doğurur. Yanal sademe, eğrisel bir yörünge üzerinde (v) ani hızıyla hareket eden (m) kütleli araca etki eden serbest kuvvetlerin meydana getirdiği bileşke ivmenin, yörünge eğrisinin normali doğrultusunda zamana göre değişimi olarak tanımlanır (Baykal 1996). Baykal (1996)'da yanal sademe bağıntısı düşey geometri ihmal edilerek sadece yatay geometri dikkate alınarak iki boyutlu olarak ifade edilmiştir. Yatay ve düşey geometri dikkate alınarak ve üç boyutlu olarak ifade edilen yanal sademe bağıntısı Baybura (2001)'da aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$Z_Y = \frac{da_Y}{dT} = \frac{b \cdot v}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left\{ \begin{array}{l} \left( 3 \cdot k_Y \cdot a_T + v^2 \frac{dk_Y}{dl} \mp \frac{u \cdot v^2}{b\sqrt{1+W^2}} \right) \frac{dk_D}{dl} \\ + \left( \frac{-k_Y \cdot v^2 \cdot u}{u^2 + b^2} - \frac{g}{b} + \frac{g \cdot u^2}{b(u^2 + b^2)} \right) \\ \mp \frac{k_D \cdot v^2}{b\sqrt{1+W^2}} \mp \frac{-k_D \cdot v^2 \cdot u^2}{b\sqrt{1+W^2} \cdot (u^2 + b^2)} \frac{du}{dl} \\ \mp \left( \frac{-u \cdot k_D \cdot v^2 \cdot W}{b(1+W^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \frac{dW}{dl} \mp \left( \frac{2 \cdot u \cdot k_D \cdot a_T}{b\sqrt{1+W^2}} \right) \end{array} \right\} \quad (1)$$

Bağıntı (1)'deki ( $\bar{\tau}$ ) operatörleri, dere (açık) düşey kurp için (-), tepe (kapalı) düşey kurp için (+) olarak uygulanmalıdır.

Burada;

- $Z_Y$  : Yanal Sademe ( $m/s^3$ )  
 $v$  : Aracın ani hızı ( $m/s$ )  
 $a_T$  : Teğetsel ivme ( $m/s^2$ )  
 $a_Y$  : Yanal ivme ( $m/s^2$ )  
 $u$  : Dever ( $m$ )  
 $T$  : Zaman ( $s$ )  
 $W$  : Boyuna eğim  
 $k_D$  : Geçki düşey geometri eğriliği ( $1/m$ )  
 $k_Y$  : Geçki yatay geometri eğriliği ( $1/m$ )  
 $L$  : Geçkinin yatay izdüşümü uzunluğu ( $m$ )  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi ( $9,81 m/s^2$ )  
 $b$  : Yol platformu yatay genişliği ( $m$ )

Yatay geometride koordinatı bilinen sabit bir noktadan uzaklıkları sabit ve R boyu kadar mesafede olan noktaların geometrik yeri olarak tanımlanan düzlem eğrisi, dairesel kurp olarak adlandırılır. Sabit uzaklık, dairesel kurbun yarıçapı (R) olup, dairesel kurbun eğrilik fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$k_Y(l) = \frac{1}{R_Y} = \text{Sabit} \left( \frac{1}{m} \right) \quad (2)$$

Dairesel kurbun dever fonksiyonu ise şu şekilde tanımlanır;

$$u(l) = u_{\max} = \text{Sabit} (m) \quad (3)$$

Burada  $u_{\max}$  v proje hızına ve R dairesel kurp yarıçapına bağlı olarak hesaplanan sabit bir değerdir. Baybura (2001)'de yol platform genişliğinin (b), yerçekimi ivmesinin (g) ve bileşke teğetsel ivmenin ( $a_T$ ) sabit kaldığı varsayılmıştır.

(1) eşitliği yatay geometriye göre düzenlenebilir. Geçkinin düşey eğriliği ( $k_D$ ) ile boyuna eğimin (W) olmadığı kabulüne göre yatay geometri için oluşan ve Baykal (1996) yanal sademe bağıntısına karşılık gelen yanal sademe bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$Z_Y = \frac{da_Y}{dT} = \frac{bv}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left\{ 3k_Y a_T + v^2 \frac{dk_Y}{dl} + \left( \frac{-k_Y v^2 u}{u^2 + b^2} - \frac{g}{b} + \frac{g u^2}{b(u^2 + b^2)} \right) \frac{du}{dl} \right\} \quad (4)$$

## 2.2 Sademe Sınır Değerlerine Göre En Küçük Yatay Kurp Yarıçapı

Sademe yolculuk konforunu belirlemede kullanılan bir değerdir. Yapılan gözlemler, kurplarda  $Z_Y = 0,3 m/s^3$  değerinden itibaren sademenin hissedildiğini ve  $Z_Y = 0,4 m/s^3$  değerinin ise rahatsızlık verdiğini göstermiştir (Bostancı 2005).

The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 2011) standartlarına göre karayollarında  $0,3 m/s^3$  ile  $1 m/s^3$  arasında değişen sademe değerleri kabul edilebilir değerlerdir. Literatürdeki bazı yanal sademe sınır değerleri çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1** Karayolu ve Demiryolu için Sademe Sınır Değerleri

$Z_Y (m/s^3)$	
Karayolu	Demiryolu
$Z_Y: 0,6$ (Kentsel Yollar - Schofield; 2001)	$Z_Y: 0,5$ (Megyeri; 1993)
$Z_Y: 0,3$ (Kırsal Yollar - Schofield; 2001)	$Z_Y: 0,2$ (Esveld; 1989)
$Z_Y: 0,6$ (Umar, Yayla; 1997)	$Z_Y: 0,4$ (Förstberg; 2000)
$Z_Y: 0,6$ (Uren, Price; 1985)	$Z_Y: 0,5$ (Evren; 2002)
$Z_Y: 0,5$ (Manns; 1985)	
$Z_Y: 0,3$ (AASHTO; 2011)	

Yanal sademe sınır değerlerine göre minimum kurp yarıçaplarının hesaplanması için öncelikle yanal sademeye bağlı minimum kurp yarıçapını veren bağıntıların belirlenmesi gerekir. Bağıntı (4)'de verilen yanal sademe bağıntısından minimum kurp yarıçapını veren bağıntı elde edilebilir.

Bağıntı (4)'deki  $k_Y$  değeri herhangi bir noktadaki yatay geometri eğriliğini temsil etmektedir.  $k_Y$ ; ( $R_Y$ ) yatay geometri eğrilik yarıçapı olmak üzere,  $\left( \frac{1}{R_Y} \right)$  değerine eşittir. (Baykal 2009). Yatay kurplarda yatay geometri eğrilik yarıçapı, yatay kurp yarıçapına eşittir.

Bağıntı (4)'deki, dever ve yatay geometri eğriliğinin yola göre türevleri sıfıra eşittir. Bağıntı (4)'de  $k_Y$  ifadesi yerine  $\left( \frac{1}{R_Y} \right)$  ifadesi getirilip bağıntı düzenlenirse (5) bağıntısı elde edilir.

$$Z_Y = \frac{3 \cdot a_T \cdot b \cdot v}{R \sqrt{u^2 + b^2}} \quad (5)$$

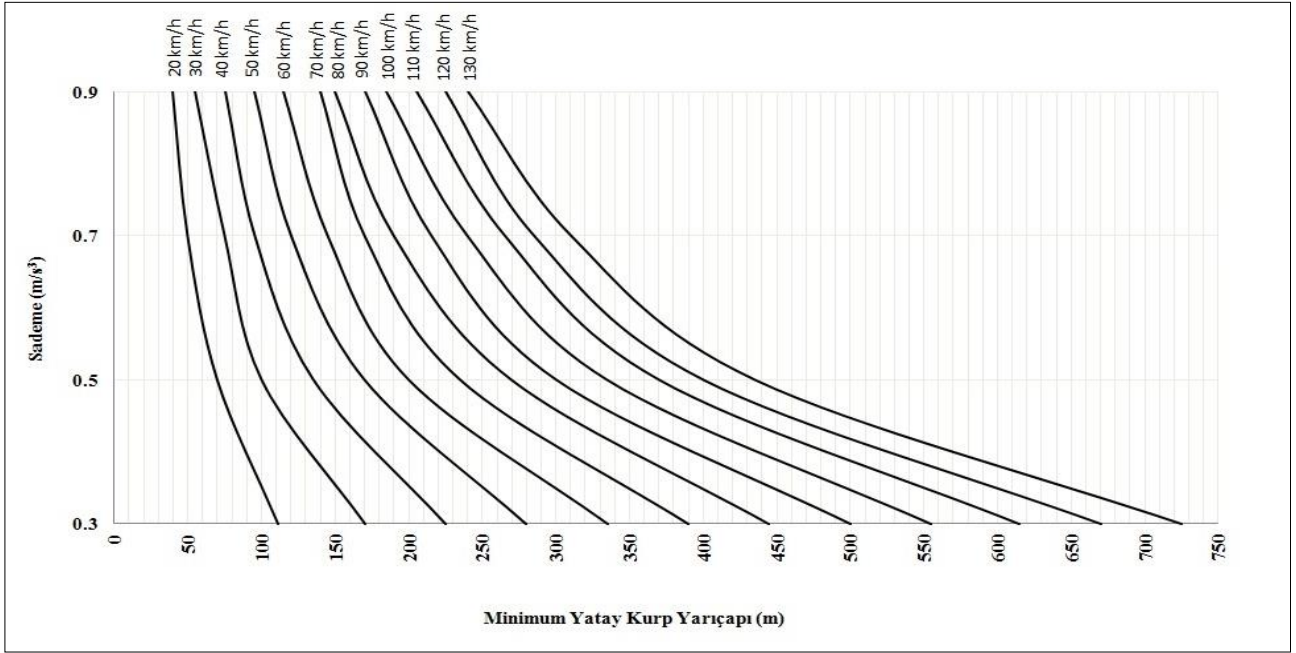
(5) bağıntısındaki  $\sqrt{u^2 + b^2}$  (yol platformu eğik genişliği) değeri, b (yol platformu yatay genişliği) değerine eşit alınabilir. Sademe ölçütüne göre en küçük kurp yarıçapını veren bağıntı karayolları için aşağıda verilmiştir.

$$R_{min} = \frac{3v_{max} \cdot a_T}{Z_Y} \quad (6)$$

Literatürdeki diğer ölçütlere bağlı olarak (yanal ivme, dever) ve yanal sademe sınır değerleriyle hesaplanmış en küçük kurp yarıçapları karayolları için çizelge 2’de, sademe – minimum kurp yarıçapı grafiği şekil 1’de verilmiştir. Sademe sınır değerlerine göre yapılan hesaplamalarda daire yayı boyunca aracın maksimum  $a_T$ : 2 m/s<sup>2</sup>’lik sabit ivmeli hareket yaptığı kabul edilmiştir.

**Çizelge 2** Sademe, Dever, Yanal İvme Ölçütlerine Göre En Küçük Kurp Yarıçapları (Karayolu)

v (Km/h)	R <sub>min</sub> (m)				a <sub>y</sub> (m/s <sup>2</sup> )	q <sub>max</sub> (%)
	Z <sub>y</sub> :0,3	Z <sub>y</sub> :0,5	Z <sub>y</sub> :0,7	Z <sub>y</sub> :0,9		
20	111	70	50	40	15	15
30	170	100	75	55	35	30
40	225	135	95	75	55	55
50	280	170	120	95	90	85
60	335	200	145	115	125	125
70	390	235	170	140	170	175
80	445	270	190	150	220	230
90	500	300	215	170	280	305
100	555	335	240	185	345	395
110	615	370	265	205	415	500
120	670	400	285	225	495	670
130	725	435	310	240	580	830



**Şekil 1** En Küçük Kurp Yarıçapı Grafiği (Karayolu)

Çizelge 3’de karayolları için literatürde önerilen en küçük sademe değeri olan 0,3 m/s<sup>3</sup> sademe değerine göre hesaplanan minimum kurp yarıçapları ile çeşitli ülkelerde tasarım için önerilen minimum kurp yarıçapları verilmiştir.

**Çizelge 3** Sademe, Dever, Yanal İvme Ölçütlerine Göre En Küçük Kurp Yarıçapları (Karayolu)

Ülke	Tasarım Hızı (km/h)								
	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Z: 0,3 m/s <sup>3</sup>	280	335	390	445	500	555	615	670	725
Avustralya (Dağlık)	-	-	105	160	270	440	530	670	785
Avustralya (Düz)	45	65	90	135	215	-	-	-	-
Avusturya	80	125	180	250	-	450	-	700	-
Belçika	-	120	-	240	-	425	-	650	-
Kanada	80	120	170	230	300	390	530	670	950
Danimarka	-	120	200	280	380	500	-	800	-
Fransa	-	120	-	240	-	425	-	665	-
Güney Amerika	80	125	180	250	335	440	560	710	-
İspanya	-	120	180	250	-	450	-	650	-
İsveç	160	-	350	-	500	-	625	-	-
İsviçre	75	120	175	240	320	420	525	650	-
Amerika	80	125	175	230	305	395	500	665	-
Türkiye	73	113	168	229	304	394	501	667	832

(5) bağıntısı kullanılarak oluşturulan demiryolları için sademe sınır değerlerine göre en küçük yatay kurp yarıçapını veren bağıntı aşağıda verilmiştir.

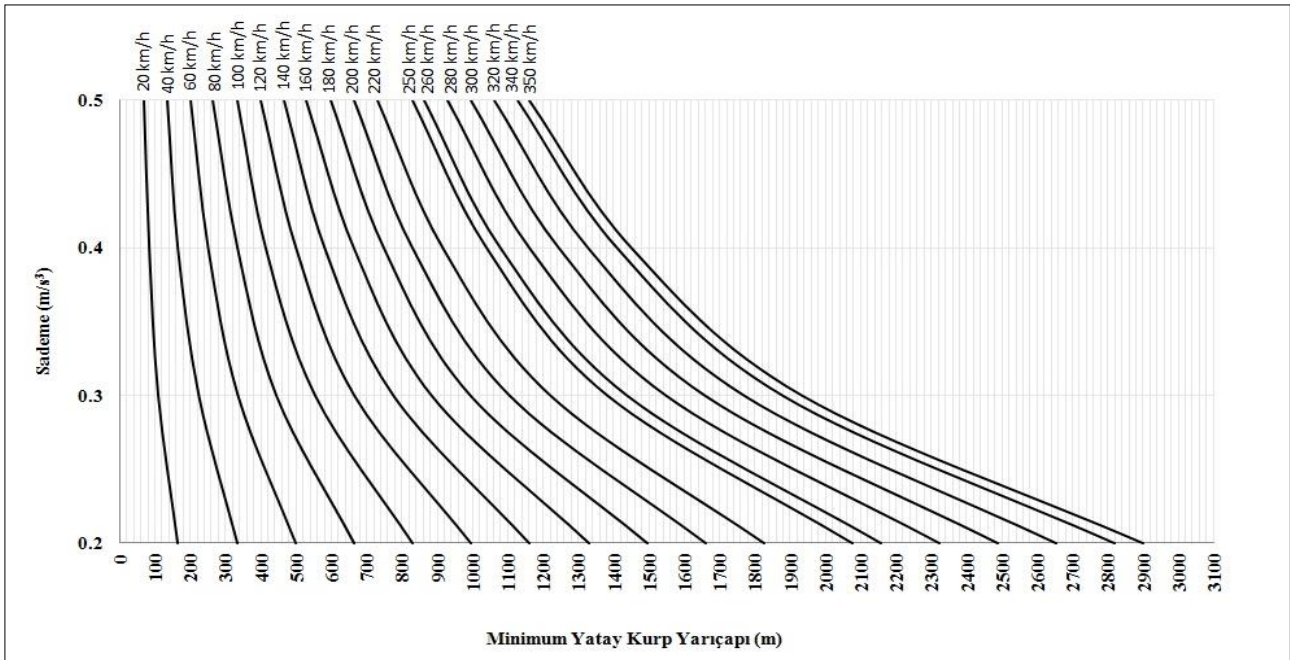
$$R_{min} = \frac{3 \cdot v_{max} \sqrt{b^2 - u_{max}^2 \cdot a_T}}{b \cdot Z_Y} \quad (7)$$

Demiryolu yatay kurp tasarımında kullanılacak en küçük yatay kurp yarıçapları farklı sademe değerlerine göre, 0-350 km/h hız aralığında (7) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda aracın daire yayı boyunca

maksimum  $a_T$ : 2 m/s<sup>2</sup>lik sabit ivmeli hareket yaptığı kabul edilmiştir. Hesaplamalarda izin verilen en büyük dever  $u_{max}$ : 0,15 m, hat genişliği  $b$ : 1,5 m olarak alınmıştır. Literatürdeki diğer bağıntılarda (Yanal ivme, Dever) ve yanal sademe sınır değerleriyle hesaplanmış en küçük kurp yarıçapları demiryolları için çizelge 4’ de, sademe – minimum kurp yarıçapı grafiği şekil 2’de verilmiştir.

**Çizelge 4** Sademe, Dever, Yanal İvmeye Göre En Küçük Yatay Kurp Yarıçapları (Demiryolu)

V (Km/h)	R <sub>min</sub> (m)				a <sub>Y</sub> (m/s <sup>2</sup> )	u <sub>max</sub> (m)
	0,2	0,3	0,4	0,5		
20	165	110	85	70	20	35
40	335	225	165	135	75	125
60	500	335	250	200	170	285
80	665	445	335	265	305	500
100	830	555	415	335	470	785
120	995	665	500	400	680	1130
140	1160	775	580	465	925	1535
160	1330	885	665	530	1205	2005
180	1495	995	750	600	1525	2535
200	1660	1105	830	665	1885	3135
220	1825	1220	915	730	2280	3790
250	2075	1382	1040	830	2945	4890
260	2156	1437	1078	862	3183	5290
280	2322	1548	1161	929	3691	6136
300	2487	1658	1244	995	4237	7043
320	2653	1769	1327	1061	4821	8014
340	2819	1879	1410	1128	5442	9047
350	2902	1935	1451	1161	5767	9587



**Şekil 2** En Küçük Kurp Yarıçapı Grafiği (Demiryolu)

Çeşitli ülkelerde yüksek hızlı demiryolları için farklı proje hızları ve farklı dever değerleri için önerilen minimum kurp yarıçapları ile demiryollarında önerilen en küçük sademe sınır değeri olan  $0,2 \text{ m/s}^3$  değeri ile hesaplanan minimum kurp yarıçapları çizelge 5’de verilmiştir.

**Çizelge 5**  $0,2 \text{ m/s}^3$  Sademe Değerine Göre hesaplanan ve Çeşitli Ülkelerde Önerilen Minimum Kurp Yarıçapları (Demiryolu).

	$v_{\max}$ (km/h)	$u_{\max}$ (mm)	$R_{\min}$ (m)	$R_{\min}$ (m) $Z_y: 0,2 \text{ m/s}^3$
Fransa	300	180	4000	2485
	350	180	6250	2900
Almanya	300	160	4000	2485
	350	170	5120	2900
İtalya	300	150	5450	2495
	350	130	7000	2910
İspanya	300	150	4000	2490
	350	150	6500	2905
Belçika	300	150	4800	2490

### 3. Bulgular

Karayolları için; çizelge 2 ve şekil 1 incelendiğinde;  $Z: 0,3 \text{ m/s}^3$  sademe sınır değerine göre,  $120 \text{ km/h}$  hızına kadar en büyük minimum kurp yarıçapı değerlerinin sademe ile elde edilen değerler olduğu görülmektedir.  $120 \text{ km/h}$  hızına kadar ivme ve dever sınır değerlerine göre hesaplanan kurp yarıçapları konfor şartını sağlamamaktadır.  $120 \text{ km/h}$  hız değerinden sonraki hızlarda dever sınır değeri ile elde edilen minimum kurp yarıçapları, konfor ölçütüne (sademe) göre hesaplanan kurp yarıçaplarından büyük olduğu için tasarımda konfor şartlarını sağlamaktadır. Konfor, güvenlik ve kapasite bakımından kaliteli bir tasarım için, yatay güzergâh tasarımlarında  $120 \text{ km/h}$  hız değerine kadar sademe ile elde edilen minimum kurp yarıçapları tercih edilmelidir.  $120 \text{ km/h}$  hız değerinden sonra dever ölçütüne göre elde edilen yarıçaplar standartların yükseltilmesi bakımından tasarımda kullanılabilir.

Karayolları için tüm ölçütler içinde  $0-120 \text{ km/h}$  hız aralığında konfor, güvenlik ve kapasite bakımından standartları en yüksek tasarıma olanak veren sademe değeri literatürde en küçük sademe olan  $0,3 \text{ m/s}^3$  değeri, minimum kurp yarıçapları ise bu değerle elde edilen yarıçaplardır.  $120 \text{ km/h}$  hızından sonraki hızlarda dever sınır değerlerine göre hesaplanan kurp yarıçapları tasarımda kullanılabilir

ancak konfor sınır değerinden büyük kurp yarıçapları kurp boyunu ve yol uzunluğunu gereksiz arttıracığından tasarımda tercih edilmemelidir.

Karayolları için çizelge 3 incelendiğinde;  $0-120 \text{ km/h}$  hız aralığında Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Danimarka, Fransa, Güney Amerika, İspanya, İsviçre, Amerika ve Türkiye karayolları için önerilen minimum yatay kurp yarıçaplarının  $0,3 \text{ m/s}^3$  sademe sınır değerine göre hesaplanan kurp yarıçaplarından küçük olduğu ve konfor şartını sağlamadıkları görülmektedir.  $0-120 \text{ km/h}$  hız aralığında konfor açısından standartları yüksek bir tasarım için bu ülkeler için önerilen minimum kurp yarıçapları konfor şartını sağlayacak şekilde güncellenmelidir.  $90-130 \text{ km/h}$  hız aralığında İsveç için önerilen minimum kurp yarıçapları konfor şartını sağlamaktadır.

Demiryolları için; çizelge 4 ve şekil 2 incelendiğinde;  $Z: 0,2 \text{ m/s}^3$  sademe sınır değerine göre,  $100 \text{ km/h}$  hızına kadar en büyük minimum kurp yarıçapı değerlerinin sademe ile elde edilen değerler olduğu görülmektedir.  $100 \text{ km/h}$  hızına kadar dever sınır değerlerine göre hesaplanan kurp yarıçapları,  $180 \text{ km/h}$  hızına kadar ise ivme sınır değerlerine göre hesaplanan yarıçaplar konfor şartını sağlamamaktadır.  $100 \text{ km/h}$  hız değerinden sonraki hızlarda dever sınır değeri ile elde edilen minimum kurp yarıçapları, konfor ölçütüne (sademe) göre hesaplanan kurp yarıçaplarından büyük olduğu için tasarımda konfor şartlarını sağlamaktadır. Konfor, güvenlik ve kapasite bakımından kaliteli bir tasarım için, yatay güzergâh tasarımlarında  $100 \text{ km/h}$  hız değerine kadar sademe ile elde edilen minimum kurp yarıçapları tercih edilmelidir.  $100 \text{ km/h}$  hız değerinden sonra dever ölçütüne göre elde edilen yarıçaplar,  $180 \text{ km/h}$  hız değerinden sonra ise ivme ölçütüne göre hesaplanan yarıçaplar standartların yükseltilmesi bakımından tasarımda kullanılabilir.

Tüm ölçütler içinde  $0-350 \text{ km/h}$  hız aralığında konfor, güvenlik ve kapasite bakımından standartları en yüksek tasarıma olanak veren sademe değeri literatürde demiryolları için en küçük sınır değer olan  $0,2 \text{ m/s}^3$  değeri, minimum kurp yarıçapları ise bu değerle elde edilen yarıçaplardır.  $100 \text{ km/h}$  hız değerinden sonra dever ölçütüne göre elde edilen

yarıçaplar, 180 km/h hız değerinden sonra ise ivme ölçütüne göre hesaplanan yarıçaplar tasarımda kullanılabilir ancak konfor ölçütüne (sademe) göre hesaplanan yarıçaplardan büyük yarıçapların tercih edilmesi kurp boyunu ve yol uzunluğunu gereksiz artıracığından tasarımda sademe ölçütüne göre hesaplanan yarıçaplarından büyük yarıçaplar tercih edilmemelidir.

Demiryolları için çizelge 5 incelendiğinde; Fransa, Almanya, İtalya, İspanya, Belçika yüksek hızlı demiryolları tasarımlarında 300 km/h ve 350 km/h hızları için önerilen minimum kurp yarıçaplarının 0,2 m/s<sup>3</sup> sademe sınır değerine göre hesaplanan minimum kurp yarıçaplarından çok büyük olduğu görülmektedir. Konforlu bir tasarım için sademe kıstasına göre hesaplanan minimum kurp yarıçapları yeterli olacağından bu ülkeler için önerilen minimum kurp yarıçapları, kurp boyu ve yol uzunluğunun gereksiz yere artmaması için düşürülmelidir.

### 3. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, ulaştırma sistemleri yatay geometri tasarımında tasarım ölçütü olarak kullanılacak en küçük yatay kurp yarıçapları konfor ölçütü sademe sınır değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sademe ölçütüne bağlı minimum kurp yarıçapı bağıntıları, literatürdeki yanal sademe bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bağıntılar kullanılarak sademe sınır değerlerine göre karayolu ve demiryolları için en küçük yatay kurp yarıçapları hesaplanmıştır. Hesaplanan yatay kurp yarıçapları, ivme ve dever sınır değerleriyle hesaplanan yatay kurp yarıçaplarıyla karşılaştırılmış, ivme ve dever ölçütlerine göre hesaplanan yatay kurp yarıçaplarının konfor açısından kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çeşitli proje hızlarında şekiller ve çizelgeler üzerinde yapılan karşılaştırma sonuçlarına göre, farklı proje hızlarında kullanılacak en uygun ölçütler tespit edilmiş, tasarımda o ölçüte göre hesaplanan yatay kurpların kullanılması önerilmiştir.

Sademe, geçki tasarımında güvenlik, konfor, kapasite ve işletme verimliliği açısından önemli bir

ölçüttür. Yukarıda elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler yapılmıştır.

- Karayolu, demiryolu ve hızlı tren yolu geçki tasarımında mevcut standartların yükseltilebilmesi ve hızlı, güvenli ve konforlu ulaştırma yapılarının inşası için sademe ölçütü tasarımda dikkate alınması ve yeni araştırmalarla konunun irdelenmesi önerilir.
- Hâlihazırda tasarım için önerilen minimum kurp yarıçaplarından konfor ölçütüne göre hesaplanan yarıçaplardan küçük olanların, konfor ölçütünü karşılayacak şekilde büyütülmesi önerilir.
- Özellikle yüksek hızlı demiryolları için önerilen minimum kurp yarıçaplarından sademe ölçütüne göre hesaplanan yarıçaplara göre çok büyük olanların yol uzunluğunun gereksiz yere artmasına sebebiyet vereceğinden tasarımda kullanılmaması ve tasarım için önerilen bu yarıçapların küçültülmesi önerilir.
- Karayolu ve demiryollarında kazalarının yoğun olarak yaşandığı kurp kesimlerinin sademe açısından sorgulanması, kazaların önlenmesi için sademe ölçütüne göre belirlenen kurp yarıçapından küçük yarıçaplı kurpların iyileştirilmesi önerilir.
- Ülkemizde karayolları ve yüksek hızlı demiryolları için geometrik standartların günümüz şartlarına uygun olarak yeniden belirlenmesi önerilir.

### 4. Kaynaklar

- AASHTO, 2011. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.
- Anderson, J. E., 1994. Maglev Performance Simulator. Report of Contract No: DTRS-57 - 94 - 00004, U.S. Department of Transportation.
- Babkow, V., F., 1975. Road Conditions and Traffic Safety. MIR Publishers, Moscow.
- Baybura, T., 2001. Geçki Düşey Geometrisinin Yanal Sademeye Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi,



- İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 137.
- Baybura, T. ve Baykal, O., 2005. Geçki Düşey Geometrisinin Yanal Sademeye Etkisinin Araştırılması. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İTÜ, İstanbul.
- Baykal, O., 1996. On Concept of Lateral Change of Acceleration. *ASCE, Journal of Surveying Engineering*, **Vol.122**, No.3, 132-141.
- Baykal, O., Tari, E., Coşkun, Z., Şahin M., 1997. New Transition Curve Joining Two Straight Lines. *ASCE, Journal of Transportation Engineering*, **123(5)**, 337-345.
- Baykal, O., 2009. Mühendislik Ölçmeleri-1, Kara ve Demir Yollarında Geçki Geometrisi Tasarımı ve Aplikasyonu. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Bostancı, B., 2005. Klotoid Eğrisinde Yol Dinamiğinin İncelenmesi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita, Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Mart 2005, Ankara.
- Esveld, C., 1989. Modern Railway Track. Graphics Department of Thyssen Stahl A. G., Duisburg, Germany.
- Evren, G., 2002. Demiryolu. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Förstberg, J., 2000. Ride Comfort and Motion Sickness in Tilting Trains. PhD thesis, Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 234.
- Jakops, E., 1987. Die Sinusoide als neuzeitliches Trassierungselement. *Vermessungs-Ingenieur*, **87(1)**, 60-68.
- Kahler, D., 1989. Die Stauchklothoide als Übergangsbogen in engen Ausfahrten. *Vermessungstechnik und Raumordnung*, **51(2)**, 116-124.
- Kahler, D., 1990b. Übergangsbögen zur Ausrundung der Neigungswechsel im Schienen-Schnellverkehr. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **115(4)**, 154-162.
- Kılınc, A.S. and Baybura, T., 2012. Determination of Minimum Horizontal Curve Radius Used in the Design of Transportation Structures Depending on the Limit Value of Comfort Criterion Lateral Jerk. FIG Working Week, Knowing to Manage the Territory, Protect the Environment the Cultural Heritage, 6-10 May 2012, Rome, Italy.
- Kobryn, A., 1991b. Zur Kurvenüberleitung bei der Ausfahrt von Autobahnen. *Vermessungstechnik und Raumordnung*, **53(8)**, 385-391.
- Kobryn, A., 1993. Allgemeine Mathematische Übergangskurven als Trassierungselement. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **93(5)**, 227-242.
- Manns, K., 1985. Querbeschleunigung und Querruck in der Übergangsbogenbemessung; Dissertation. Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt, Deutschland.
- Megyeri, I., 1993. Eisenbahn – Bewegungsgeometrie. Akademiai Kiado, Jeno, Hungary.
- O'Flaherty, C. A., 1986. Highways. Volume 1, Traffic Planning and Engineering, Third Edition, Edward Arnold, London, England.
- Schofield, W., 2001. Engineering Surveying – Theory and Examination Problems for Students. Butterworth-Heinemann, Oxford, New Delhi.
- Schot, S.H., 1978. The Time Rate of Change of Acceleration. *American Journal of Physics*, **46**, No. 11, 1090-1094.
- Tari, E. and Baykal, O., 1995. A New Transition Curve, Proc. Symp. 27-29 September 1st Turkish-German Joint Geodetic Days, İstanbul.
- Tari, E., 1997. Geçki Tasarımında Yeni Eğri Yaklaşımları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 87.
- Tunç, A., 2004. Yol Güvenlik Mühendisliği ve Uygulamaları. Asil Yayın, Ankara.
- Uren, J. and Price, W. F., 1985. Surveying for Engineers, Second edition, Macmillan Education Ltd., Basingstoke and London, England.
- Vatankhah A.R., Easa S.M. and Mahdavi A., 2013. Alternativesolutions for horizontal circular curves by noniterative methods. *Journal of Surveying Engineering*, **139 (3)**, 111-119.