

KLOTOİD EĞRİSİNDE YOL DİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ

B. Bostancı¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Emirdağ Meslek Yüksekokulu, Harita Kadastro Bölümü, Emirdağ, bostanci@aku.edu.tr

ÖZET

Günümüzde yol güzergahlarının oluşturulması tekniğinde, doğru ve daire yaylarının dışında geçiş eğrilerinin kullanılması da bir zorunluluk haline gelmiştir. Yapılan araştırmaların ışığı altında klotoid, uygun geometrik çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bugüne kadar klotoid genelde matematiksel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ise bir taşıtın klotoidli kurpta fiziksel olarak hareketi incelenmektedir.

Anahtar Sözcükler : Klotoid, Yol Dinamiği, Eğrilik, Merkezkaç Kuvvet

ABSTRACT

IN CLOTHOID CURVE EXAMINATION OF THE ROAD DYNAMIC

It is essential to use the transition curves apart from the straight line and circle bows in forming technique of the road routes at present. Clothoid seems to be the most convenient geometrical solution according to the current studies. Clothoid has been examined mathematically up to now. In this study, the physical movement of a vehicle in a clothoidal curp is being examined.

Keywords: Clothoid, Road Dynamic, Curvature, Centrifugal Force

1. GİRİŞ

Trafik yollarının projelerinde basit çalışmalarda doğru ve daire yayları kullanılır. Büyük projelerde ek olarak geçiş eğrileri de kullanılır. Geçiş eğrileri aliyma ile kurp arasına yerleştirilen eğrilerdir (Aydın, 2000).

Yol projelerinde kullanılan temel elemanlar:

- Doğru (sabit eğrilik = 0)
- Daire (sabit eğrilik = 1/R)
- Geçiş Eğrisi (değişken eğrilik)

Yol güzergahının sembolik gösterimi için plan altlığında eğrilik değeri kullanılır.

$$K = \frac{d\tau}{dL} = \frac{1}{R} \quad (1)$$

τ = Planda doğrultudan sapma açısı [grad]

$$L = \text{Yol uzunluğu} \quad [\text{m.}]$$

$$R = \text{Yarıçap} \quad [\text{m.}]$$

V hızı ile hareket eden bir taşıt aliymandan kurba girişinde ani bir merkezkaç kuvvet oluşur. Taşıtı kurbun dışına doğru savurma ve devirme etkisi gösteren bu kuvveti dengelemek üzere dever uygulaması yanında geçiş eğrisi de yerleştirilir. Geçiş eğrisi iki amacı gerçekleştirmek üzere uygulanır :

1. Taşıt geçiş eğrisi üzerinde sabit bir V hızıyla yoluna devam edebilmelidir.
2. Taşıtın direksiyonu geçiş eğrisi üzerinde sabit bir Δ_e açısal hızı ile döndürüldüğünde, kurba girişte en büyük dönüş açısı elde edilmiş olur (Yayla, 2002).

1.1 . Klotoid

Geçiş eğrisi olarak kullanılan bir eğridir. Denklemi $L.R = A^2$ olup, L geçiş eğrisi uzunluğu ile R kurp yarıçapının çarpımı bir A sayısının karesine eşittir. $A=1$ alınrsa bu klotoide birim klotoid adı verilir (Bostancı, 1995). Klotoid, eğriliği $K = 0$ 'dan $K = \infty$ 'a giden ve sürekli doğrusal artan bir eğridir. Her defasında ilgili yarıçap ile gelişigüzel eğri uzunluğunun çarpımı sabittir.

$$L.R = \text{sabit}$$

Bu denklemin sabit terimi ikinci dereceden gösterimle A parametresi şeklinde ifade edilerek bir boyutsal formül çıkarılır.

$$A^2 = R.L \Rightarrow A = \sqrt{R.L} \quad (2)$$

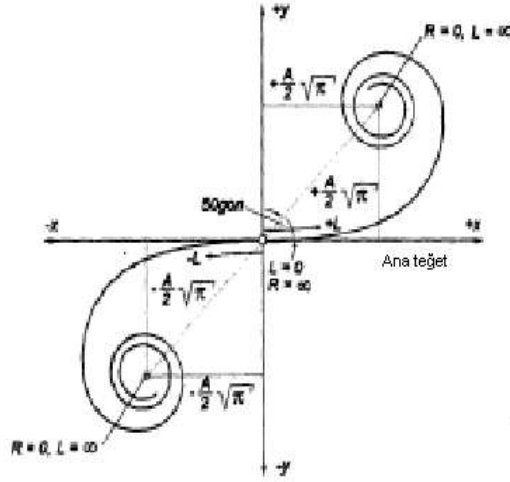
A	Klotoid parametresi	[m]
R	Klotoidin sonundaki yarıçap	[m]
L	Klotoid uzunluğu	[m]

Klotoid'de eğrilik uzunlukla lineer değişir. Bu nedenle sürücü direksiyonu değişmeyen açısal hızla döndürebilir.

$$K = \frac{d\tau}{dL} = \frac{1}{R} = \frac{L}{A^2}$$

(3)

K = Eğrilik



Şekil 1: Koordinat sisteminde klotoid

2.YOL DİNAMIĞI

Güvenlik ve kapasite açısından taşıtların kurpları sürekli bir hareketle ve alıymandaki hızını mümkün mertebe muhafaza edecek şekilde dönmesi istenir. Düşük standartlı yollarda, hız koşulunu sağlayacak yarıçapta kurp tesisi ekonomik açıdan zor olup, bu gibi yollarda küçük yarıçaplı kurpların yapımı kaçınılmazdır (Yayla, 2002).

Taşıtların sürekli bir hareketle, güvenle dönebilecekleri minimum yarıçap, taşıtın tipi, boyutları, sürtünme katsayısı ve dönüş hızına bağlıdır. Diğer yandan, bir kurbu dönebilmek için gereken dönme açısı birden gerçekleştirilemez. Kurp içinde dönme hareketine devam eden taşıtların dönme açısı da yavaş yavaş ve üniform bir şekilde büyür.

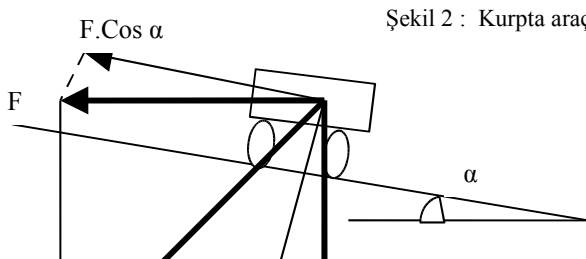
Alıymandan yatay kurba giren bir taşıtın, kurbun dışına doğru bir merkezkaç kuvvete maruz kaldığı bilinen bir husustur. Taşıt üzerinde dışa doğru savurma (kaydırma) ve devirme etkisi gösteren bu kuvvetin fizikten bilinen değeri,

$$F = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

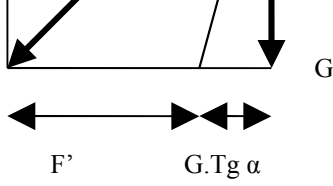
(4)

2.1 Enine İvme ve Sademe

Kurp üzerinde seyreden bir taşıt merkezkaç kuvvetten doğan bir enine ivmeye maruz kalır. Bu ivmeyi oluşturan kuvvet Şekil 2'ye göre



Şekil 2 : Kurpta araçlara etkiyen kuvvetler



$$F' = F - G.Tg\alpha$$

(5)

$$m.a = m.\frac{V^2}{R} - m.g.tg\alpha$$

şekline dönüşür ve $Tg \alpha = q/100$ olduğuna göre enine ivmeyi veren bağıntı ,

$$a = \frac{V^2}{R} - 9,81.\frac{q}{100}$$

(6)

Motorlu taşıt içindeki yolcuların kurbu geçişleri sırasında fazla rahatsız olmadan tahammül edebilecekleri en büyük enine ivme değeri Alman RAL (Richtlinien für die Anlage von Landstrassen) yönetmeliğinde gözlem sonuçlarına dayanılarak, $1,47 \text{ m/s}^2$ olarak kabul edilmiştir. Kurpta meydana gelen enine ivmenin birim zaman içindeki değişimi olan,

$$\varphi = \frac{da}{dt} = \frac{a}{t}$$

(7)

değeri sademe olarak tanımlanır. Burada t zamanı, L uzunluğundaki geçiş eğrisinin geçilebilmesi için gereken zaman olup değeri,

$$t = \frac{L}{v}$$

Sademe yolculuk konforunu belirlemede kullanılan bir değerdir. Yapılan gözlemler, kurplarda $\varphi = 0,3 \text{ m/s}^3$ değerinden itibaren sademenin hissedildiğini ve $\varphi = 0,4 \text{ m/s}^3$ değerinin ise rahatsızlık verdiğini göstermiştir. Geçiş eğrilerinin uzunluğunu tayinde esas alınan sademe için kabul edilen en yüksek değer $\varphi = 0,6 \text{ m/s}^3$ olarak alınmaktadır.

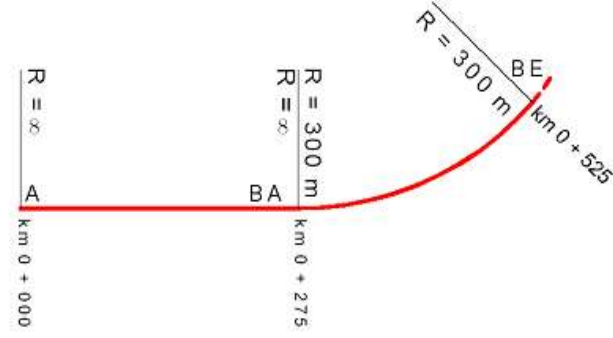
2. 2 Klotoid'de Yol Dinamiği İncelemesi

Bir yol kurbundaki taşıt geçişi sırasında eğriliğe bağlı olarak, çeşitli yan ivmeler veya yan kuvvetler etkili olur. Aşağıda gösterilen örnek durumlarda eğriliğin grafiği, enine ivme etkisi ve merkezkaç kuvvet etkisi görülecektir. Örnek durum, önce doğru-daire geçişini inceledikten sonra aynı güzergaha klotoid yerleştirilmesi durumunu göstermektedir. Bu durumda doğru-klotoid-daire geçişi oluşmaktadır.

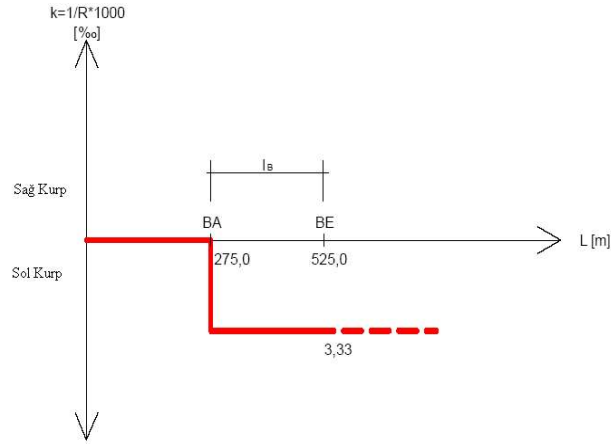
Verilenler:

Taşıtların ağırlığı : $m = 800 \text{ kg}$.

Enine eğim (%): $q = 4$ Hız : $V = 90 \text{ km/h}$



Şekil 3: Yol projesinde daire yayı



Şekil 4: Daire yayı eğriliği

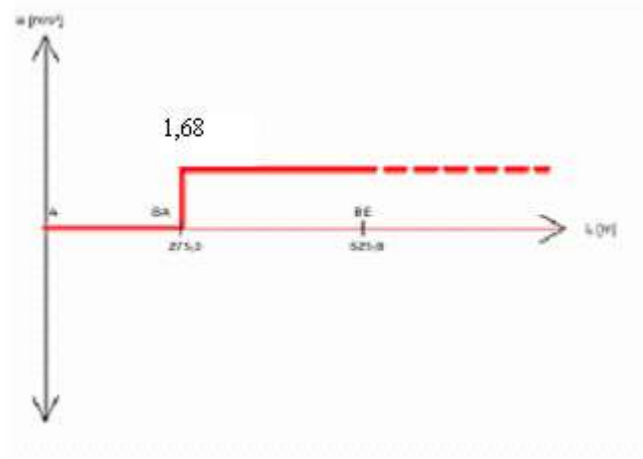
Eğrilik geçişinde enine ivmenin fizikten bilinen formülü,

$$a = \frac{V^2}{13.R} - g \cdot \frac{q}{100} \quad (m/s^2)$$

Burada V= hız, a = enine ivme ve R= kurp yarıçapıdır.

$$a = \frac{90^2}{13.R} - 9,81 \cdot \frac{4}{100} = 1,68 m/s^2$$

Doğrudan daireye ani geçişlerde ivme geçişinde aynı şekilde birdenbire atlamalı değişmektedir. Bu durumu grafikte gösterirsek;



Şekil 5: Kurpta enine ivme

Taşıt açısal hızı,

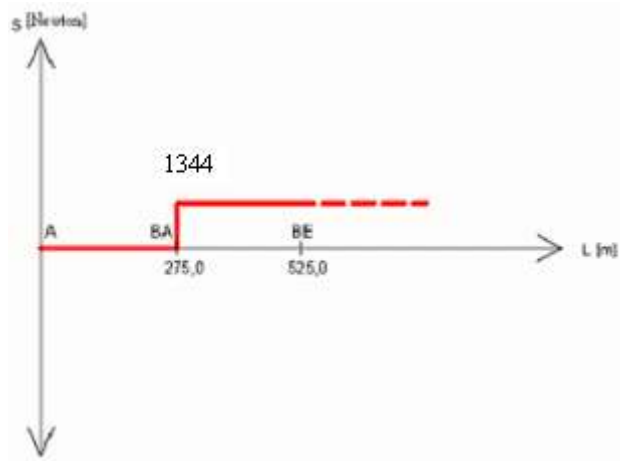
$$\omega = \frac{V}{3,6.R} = \frac{90}{3,6.300} = 0,083333 \quad (\omega = \frac{d\Delta}{dt}) \quad (8)$$

Eğrilik geçişindeki merkezkaç kuvvet,

$$F = m.a \quad \Rightarrow \quad F = 800 \cdot \left(\frac{90^2}{13.300} = 9,81 \cdot \frac{4}{100} \right)$$

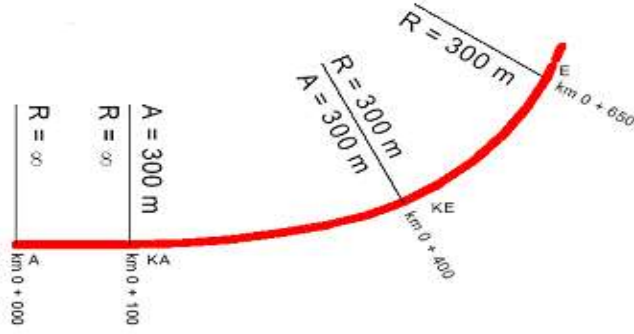
$$F = 1344 \text{ kg } \frac{m}{s^3}$$

$$F = 1344 \text{ Newton}$$

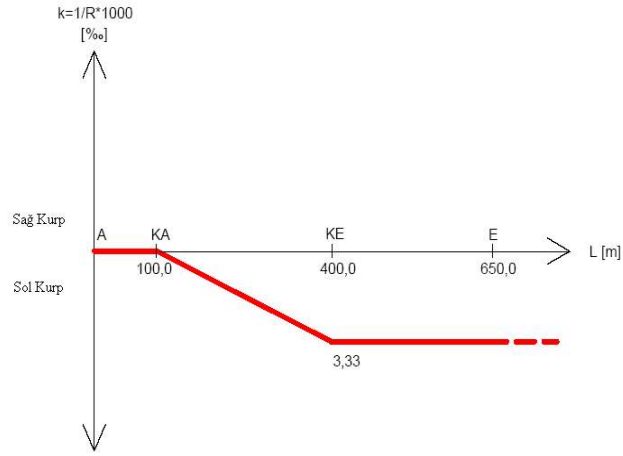


Şekil 6: Kurpta merkezkaç kuvvet

Doğru-klotoid-daire geçişinde yol dinamiği,

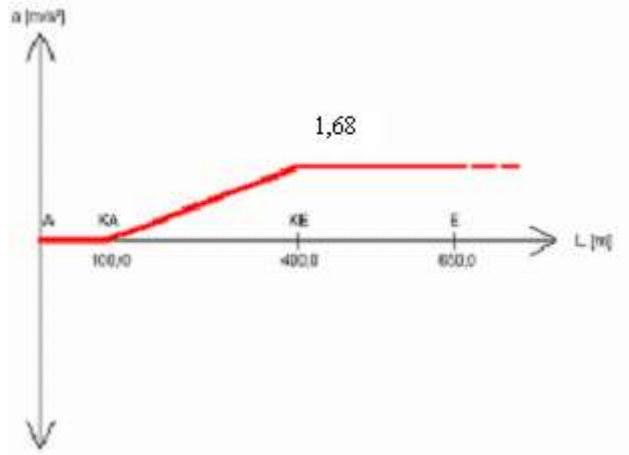


Şekil 7: Yol projesinde klotoid

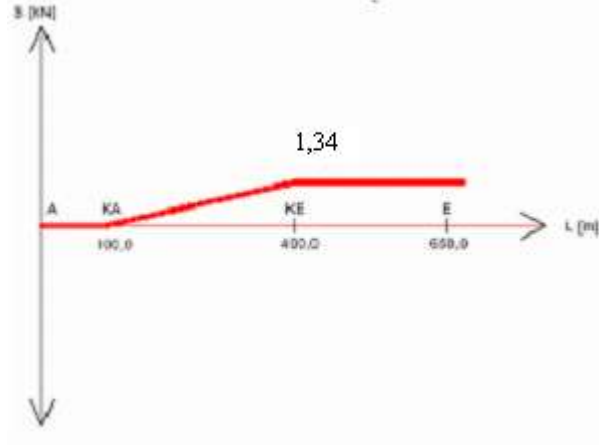


Şekil 8: Klotoidli kurbun eğriliği

Doğru ile daire arasındaki klotoid bağlantısı yarıçap sürekli değiştiği için, geçiş bölümü bağlantısı bir doğru ile açıklanabilir. Yarıçap değişikliği sınır değerleri $R = \infty$ ve $R = 300$ arasındadır.



Şekil 9: Klotoidde enine ivme değişimi



Şekil 10: Klotoide merkezkaç kuvvet değişimi

Merkezkaç ivme ve merkezkaç kuvvet klotoid geçişinde sürekli olarak artmaktadır. Eğrilik geçişinden dolayı sademe (ivme değişimi) :

$$V = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/sn}$$

$$\text{Km } 0+100 \Rightarrow t_1 = 100/25 = 4 \text{ s}$$

$$\text{Km } 0+400 \Rightarrow t_2 = 400/25 = 16 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad t = t_2 - t_1 = 16 - 4 = 12 \text{ s.}$$

Sademenin oluşumu :

$$\omega = \frac{da}{dt}$$

$$\omega = \frac{a}{t}$$

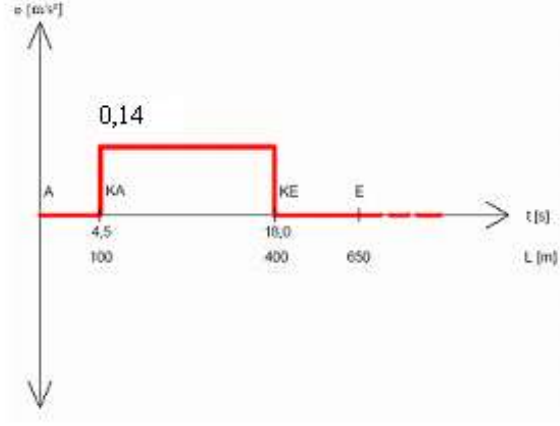
(9)

V' nin sabit olduğu düşünülürse ve t= Eğrilik değişikliği arasındaki zaman olduğuna göre sademe,

$$\omega = \frac{1,68 \text{ m/s}^2}{12 \text{ s}}$$

$$\omega = 0,14 \text{ m/s}^3$$

$$\Rightarrow (\omega_{\max} = 0,5 \text{ m/s}^3)$$



Şekil 11: Klotoidde sademe (ivme değişikliği)

Maksimum sademenin $0,5 \text{ m/s}^3$ olduğunu düşünürsek, grafikten görüldüğü gibi bu klotoid geçişinde ivme değişimi son derece konforlu bir biçimde oluşmaktadır.

2.3. Klotoid'li Kurpta Savrulma Noktasının Bulunması

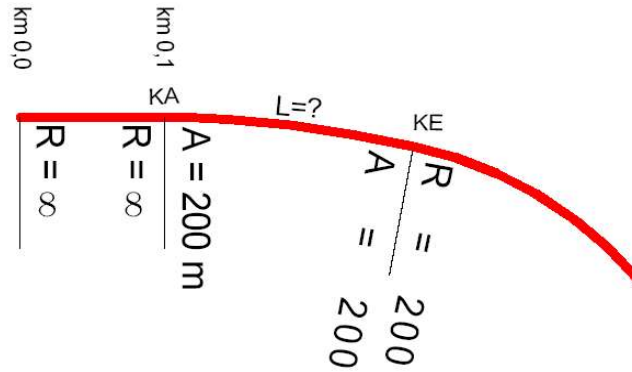
Bir araba yüksek hızda ve frensiz olarak klotoidli kurba giriyor. Aracın hangi konumda kaymaya maruz kalacağını hesaplayalım. Bu konuyu bir örnek üzerinde inceleyelim;

$$V = 120 \text{ km/h}$$

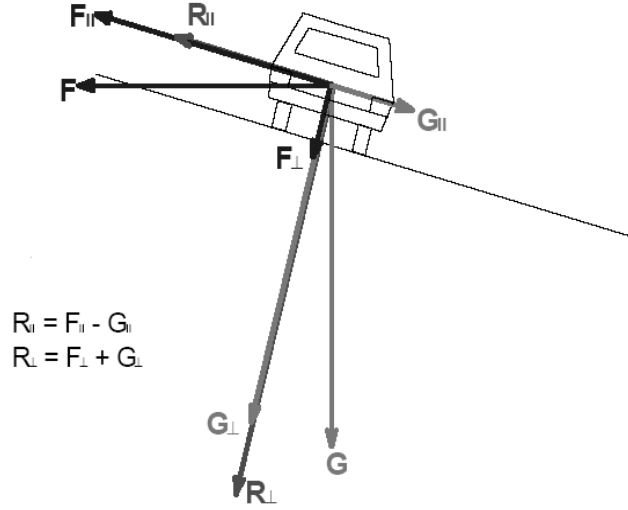
$$f = 0,2 \text{ (Mevcut sürtünme katsayısı)}$$

$$q_A = 2,5$$

$$q_E = 6,0$$



Şekil 12: Klotoidli güzergah durumu



Şekil 13: Araçlara kurpta etkiyen kuvvetler

$$\begin{aligned}
 R_{\parallel} &= F_{\parallel} - G_{\parallel} \\
 &= F \cdot \cos\alpha - G \cdot \sin\alpha \\
 &= \frac{m \cdot V^2}{13 \cdot R} \cdot \cos\alpha - m \cdot g \cdot \sin\alpha
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 R_{\perp} &= F_{\perp} + G_{\perp} \\
 &= G \cdot \cos\alpha + F \cdot \sin\alpha \\
 &= m \cdot g \cdot \cos\alpha + \frac{m \cdot V^2}{13 \cdot R} \cdot \sin\alpha
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$R_{\parallel} = f \cdot N$$

(N= Yol üstüne düşey etkiyen kuvvet)

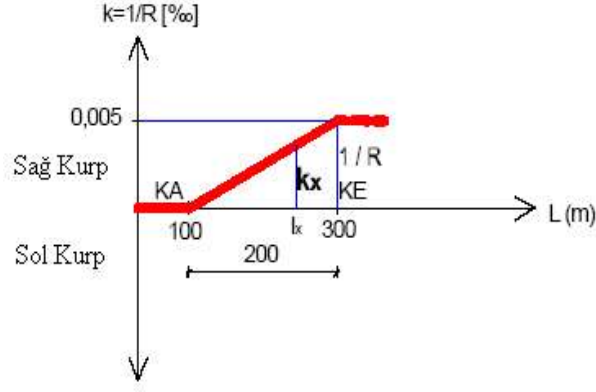
$$R_{\parallel} = 0,2 \cdot R_{\perp} \tag{12}$$

$$\frac{m \cdot V^2}{13 \cdot R} \cdot \cos\alpha - m \cdot g \cdot \sin\alpha = 0,2 \cdot \left(m \cdot g \cdot \cos\alpha + \frac{m \cdot V^2}{13 \cdot R} \cdot \sin\alpha \right)$$

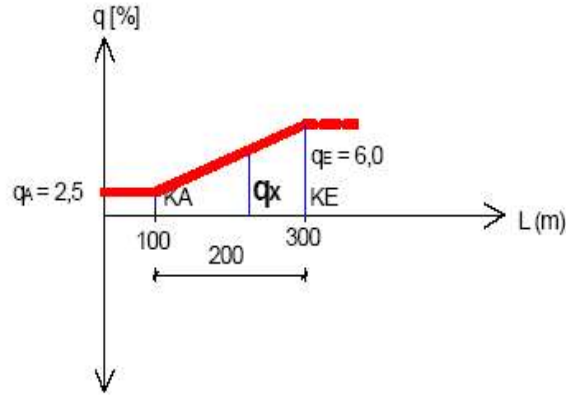
$$\frac{V^2}{13 \cdot R} \cdot (5 \cdot \cos\alpha - \sin\alpha) = g \cdot (\cos\alpha + 5 \cdot \sin\alpha)$$

Her iki tarafı Cos alpha ile böler ve k= 1/R, Tg alpha = q/100 dersek

$$\frac{V^2}{13} \cdot k \cdot \left(5 - \frac{q}{100} \right) = g \cdot \left(1 + 5 \cdot \frac{q}{100} \right) \tag{13}$$



Şekil 14: Klotoid eğriliği



Şekil 15: Klotoidde enine eğim

$A^2 = R.L$ (Klotoidin genel formülü)

Bu formül sayesinde verilen klotoidin eğrilik fonksiyonu oluşturulabilir.

$$\frac{k(x)}{l_x} = \frac{k_E}{L} = \frac{1}{R.L} \quad (14)$$

$$k(x) = \frac{k_E}{L} . l_x = \frac{1}{R.L} . l_x$$

$$k(x) = \frac{1}{200.200} . l_x$$

$$k(x) = \frac{1}{40000} . l_x$$

Bu klotoidde ait eğim fonksiyonu da aynı şekilde bulunabilir.

$$q_x = q_A + \frac{(q_E - q_A)}{L} . l_x$$

$$q_x = 2,5 + \frac{6 - 2,5}{200} . l_x$$

(15)

(13) VE (14) no'lu formülde bulduğumuz k_x ve q_x ' i aşağıdaki (12) nolu formülde yerine koyarsak,

$$\frac{120^2}{13} \cdot \left(\frac{1}{40000} \cdot l_x \right) \left(5 - \frac{2,5 + \frac{6-2,5}{200} \cdot l_x}{100} \right) = 9,81 \cdot \left(1 + 5 \cdot \frac{2,5 + \frac{6-2,5}{200} \cdot l_x}{100} \right)$$

$$l_x^2 - 26623,017 l_x + 2321429,2 = 0$$

Bu denklemin köklerini bulursak,

$$l_{x1} = 26535,5 \quad m \quad l_{x2} = 87,48 \quad m.$$

Demek ki araba klotoidin içinde 87,48 m. de savrulmaya uğrayacaktır.

Bu noktadaki yarıçap, $R(87,48) \Rightarrow R = \frac{A^2}{L} = \frac{200^2}{87,48} = 457,24 m.$

Bu noktadaki enine eğim, $q(87,48) \Rightarrow q = 2,5 + \frac{6-2,5}{200} \cdot 87,48 = 4,031 \cong \% 4$

Bu noktadaki ivmeyi bulursak, $a = \frac{V^2}{13 \cdot R} - g \cdot \frac{d}{100} = \frac{120^2}{13 \cdot 300} - 9,81 \cdot \frac{4}{100} = 3,30 \frac{m}{s^2}$

Bu noktada araca etkiyen kuvvet. $F = m \cdot a = 800 \cdot 3,30 = 2640 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 2640 \text{ Newton}$

2.4. Araçlarda Yol Dinamiği ve Güvenliğine Yönelik Sistemler

2.4.1. ABS (Anti Blockier System)

Almancadaki Anti-Blockier System'in kısaltmasından oluşur. Bunu bazı firmalar ALS (Anti-Lock System) adıyla da kullanmaktadır. Tekerleklerin frenleme sırasında kilitlenmesini önler. Bu sistemde her bir tekerlekteki algılayıcılar yoluyla ABS' nin beynine tekerleklerin durumu hakkında bilgi gönderilir. Tekerleğin durduğu iletildiğinde sistem devreye girerek freni kısa bir süre için serbest bırakır. Frenleme sürdüğü için yeniden tekerlek kilitlenir ve sistem yeniden freni serbest bırakır. Genel olarak bakıldığında otomobillerin çoğunda ABS sayesinde fren mesafesi biraz daha kısadır ama bazılarında ABS ile fren mesafesi değişmez veya biraz daha uzun olabilir. ABS' nin esas işlevi frenleme sırasında direksiyon kontrolünü sağlamaktır. Böylece, bir virajda lastikleri kilitleyecek kadar sert fren yapıldığında araç viraj dışına kaymadan normal şarttaki çizgisine yakın bir çizgide frenleme yapabilir.

2.4.2. ESP (Elektronisches Stabilitäts Program)

Frenleme ve ivmeleme sırasında aracın stabilitesini artıran ABS ve TCS (Traction Control System - Çekiş Kontrol Sistemi) üzerine kurulu olan ESP, otomobile daha üstün bir dinamik denge ve kontrol sağlar. ESP; aracın tepkileri ile sürücünün gitmek istediği yön arasında bir fark hissettiği anda, elektronik motor yönetim sistemini kullanarak motor gücünü azaltma yoluyla stabilizeyi korur ve sürücünün kontrolü kaybetmesini engeller. Ayrıca ESP, ABS' yi kullanarak araç sürücünün gitmek istediği çizgiden kopmadan önce tekerleklere ayrı ayrı fren uygulayabilir. Olağan sürüş koşullarında, direksiyonu gitmek istediğiniz yöne çevirirseniz araç kontrolünüz altında

dönmeye başlar. Üç olağandışı koşul altında araç sürücünün isteğinin dışında hareket edebilir. Bunlar; önden kayma, arkadan kayma ve ani şerit değişikliğidir.

2.4.3. Viraj Işığı

Dönebilen ön farlar, direksiyon açısına ve otomobilin hızına bağlı olarak ± 15 derecelik açıda ekstra aydınlatma sağlayarak kurplarda ve kavşaklarda geceleyin geniş görüş imkanı sunmaktadır. Böylece kurplar % 80-90' a kadar daha iyi aydınlatılmaktadır.

2.5. Sonuçlar ve Öneriler

Rahat, konforlu ve emniyetli bir yolculuk için yol projelerinde klotoit kullanılması bir lüks olarak değil bir ihtiyaç olarak algılanmalıdır. Bu amaçla Karayolları Genel Müdürlüğü özellikle klotoit kullanılması gerekmeyen yarıçapta kurplar hariç, diğer tüm kurplarda klotoit kullanımına gitmelidir.

Yol güzergahı oluşturulurken yol geometrisi yanında yol dinamiği de incelenmelidir. Bu güvenli ve konforlu yolculuk yapabilmek için gerekli şartlardan birisidir. Her gün onlarca trafik kazasının sonucunda can ve mal kaybının çok olduğu ülkemiz açısından son derece gereklidir.

Kurplarda savrulma hızları, devrilme hızlarından daha küçük çıkmaktadır. Bu durum kurplarda ve aynı zamanda klotoitte savrulmanın, devrilmeden daha kolay meydana geleceğini gösterir.

Ülkemizde özellikle çok yağış alan bölgelerde, yol yüzeyinin sürtünme katsayıları ve buna bağlı olarak sürtünme kuvvetleri sık sık kontrol edilmeli ve kazalara karşı zamanında gerekli önlemler alınmalıdır.

Araçlarda yol güvenliğine yönelik sistemler geliştirilmekte ve özellikle lüks araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür sistemler yol dinamiği ve emniyeti açısından tüm araçlarda kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Anonim.**, (1965) *Büro ve Arazi için Tip ve Tablolar*, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayını, Yayın No: 134 Ankara.
- Apak, D.**, (1978) *Güzergah Elemanı Olarak Klotoid (Çeviri)*, Ankara,
- Aydın, Ö.**, (2000) *Mühendislik Ölçmeleri* İstanbul.
- Bostancı B.**, (1995) *Şehir içi Yol Projelerinin Hazırlanması ve Kavşaklar*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kiper, T.**, (2002) *Karayolu Projesi Temel Bilgileri* , Ankara.
- Osterloh, H.**, (1977) *Strassenplanung mit Klothoiden* , Berlin.
- Özdirim, M.**, (1994) *Trafik Mühendisliği* (Cilt 1, Cilt 2), Ankara.
- Ras**, (1984) *Richtlinien für die Anlage von Strassen* , Köln.
- Umar, F., Yayla, N.**, (1997) *Yol İnşaatı*, İstanbul.
- Yayla, N.**, (2002) *Karayolu Mühendisliği*, İstanbul.
- <http://www.arabadergisi.com/sozluk/sozluk13.htm> 13.03.2004
- http://www.cis.tugraz.at/isv/lehre/lehrveranst/swvorlesung/SWVO_2003_E07b.pdf 18.04.2004
- <http://www.eiba.tuwien.ac.at/Lehre99/anschauung/eisenbahnwesen-theorie/node8.html> 20.04.2004
- http://www.fh-bochum.de/fb5/baeumker/physik/ingv5_teil2.pdf 02.05.2004
- http://www.fh-bochum.de/fb5/baeumker/physik/ingv6_teil1.pdf 02.05.2004
- http://www.fh-mainz.de/fr_bauing/personal/cronen/material/1-1.pdf 18.04.2004
- http://www.fh-mainz.de/fr_bauing/personal/cronen/material/1-2.pdf 18.04.2004
- http://www.fh-mainz.de/fr_bauing/personal/cronen/material/2-1.pdf 18.04.2004
- http://www.otokoc.com.tr/showroom/binek_araclar/focus/guvenlik.jsp 02.04.2004
- <http://schulen.eduhi.at/riedgym/physik/9/achterbahn/klothoidenlooping.htm#top> 20.04.2004
- <http://www.svpt.de/Download/Bearbeitungshinweise%20Knotenpunktentwurf.pdf> 20.04.2004
- <http://www.sv-medien-service.de/imperia/md/content/svcm/bdt/11.pdf> EPS 02.05.2004

