

KARAYOLLARINDA KULLANILAN GEÇİŞ EĞRİLERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

(DOKTORA TEZİ)

Fırat Üniversitesi Merkez Kütüphanesi

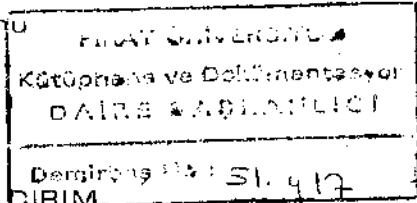


0067461

255.07.02.03.00.00/08/0067461

IM D/4

Yük. Müh. Necatî KULOĞLU
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü



Tez Yöneticisi : Doç. Bekir YILDIRIM

25
D.T.
FEN BİL.

ELAZIĞ
MAYIS — 1988



Okuduğum ve jüriye sunulmasını uygun gördüğüm
bu tez, kanımca bir Doktora tezinde bulunması gereken
tüm nitelikleri taşımaktadır.

Doç.Bekir YILDIRIM

Tez Yöneticisi



ÖZET

Son yıllarda taşıt teknolojisindeki hızlı gelişmeler sonucu yüksek hız yapabilen taşıtlar imal edilmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak karayollarının projelendirilmesinde esas alınan proje hızlarının da artırılması kaçınılmaz olmaktadır. Yeni proje hızlarına göre projelendirilecek güzergâhlarda ve mevcut güzergâhların iyileştirilmeleri çalışmalarında özellik arzeden güzergâh elemanı kurbalardır. Taşıtların, alıy-
manda müsaade edilen hızlarını kurba içerisinde de devam ettirebilmeleri amacı ile kurbaların giriş ve çıkışında geçiş eğrileri kullanılmaktadır. Ayrıca, geçiş eğrileri kurbada meydana gelen merkezkaç kuvvetinin ani etkisini de ortadan kaldırarak konforu artırmaktadır.

Bu çalışmada, mevcut geçiş eğrileri incelenmiş ve karayollarında en çok uygulanan geçiş eğrisi klotoid'ten daha konforlu ve ekonomik olan yeni bir geçiş eğrisi önerilmiştir.

Birinci bölümde, neden böyle bir çalışmaya gerek olduğu kısaca izah edilmiştir.

İkinci bölümde, kurbada taşıtların stabilitesi incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, geçiş eğrileri üzerinde yapılan araştırmalardan söz edilerek, karayollarında en çok kullanılan kübik parabol, lemniskat ve klotoid geçiş eğrileri özellikleriyle birlikte kapsamlı bir şekilde



incelenmiştir.

Dördüncü bölümde yeni bir geçiş eğrisi önerilmiştir. Geçiş eğrilerinde en önemli özellik eğrilik değişimidir. Sapma açısı, dever ve yanal ivme gibi temel değerler eğrilığe bağlı olarak değişir. Eğrilik değişimi 2. dereceden bir fonksiyon kabul edilerek, elde edilen geçiş eğrileri incelenmiş, bunlardan geçiş eğrisi 1 diye adlandırdığımız eğri önerilmiştir. Geçiş eğrisi 1 ile klotoid karşılaştırılarak, geçiş eğrisi 1'in klotoidde göre avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir.

Beşinci bölümde, sayısal örneklerle klotoid ve geçiş eğrisi 1'in kurba içerisindeki konumları incelenmiştir.

Altıncı bölümde, sonuçlar özet olarak verilmiştir.



SUMMARY

In recent years as a result of rapid developments in otomotive industry, the vehicles that are capable of having very high speed, have been manufactured. In accordance with these developments the design speeds that are based on highway project are becoming unavoidable to increase. Curves have special importance in the improvement of the present routes and in the design of the routes considering new design speed.

In order to maintain the vehicle speeds in the curve as in the alignment at the entrance and exit of curves the transition curves are used. Furthermore since transition curves remove the sudden effect of centrifugal force in the curve it increases the comfort.

In this study current transition curves are examined and a new transition curve which is more comfortable and more economical than the transition curve, clothoid which has a wide application in highways, has been proposed.

In the first chapter the reason of the need to study a topic as such has been briefly defined.

In the second chapter the stability of vehicles in curve has been investigated.

In the third chapter researchs done on transition curves have been summed up and such transition curves as cubical parabol, lemniscate and clothoid that are widely used in highways, have been examined in



detail.

In the fourth chapter a new transition curve has been proposed. The most significant property in transition curves is the change in curvature. The basic concepts such as slope angle, super elevation and lateral acceleration vary depending on curvature. Assuming that the change of curvature is a second order function the obtained transition curves are examined and the curve that is called the transition curve 1 is proposed. Comparing the transition curve 1 with clothoid the advantages and disadvantages of the transition curve with respect to clothoid are shown.

In the fifth chapter the positions within the curve of clothoid and of transition curve 1 are investigated with numerical examples.

In the sixth chapter the obtained results are given in summary.



TEŞEKKÜR

Danışmanlığımı üstlenen ve çalışma boyunca teşvik ve ilgisini gördüğüm Doç.Bekir YILDIRIM'a, çalışmamın her safhasında değerli mesaisinden fedakârlık ederek, engin bilgi ve tecrübesiyle yardımcı olan, K. T.Ü. Rektör yardımcısı Prof.Dr.Türkay TÜDEŞ'e, devamlı teşviklerini gördüğüm Bölüm Başkanı, Dekan ve F.Ü.Rektör Yardımcısı Prof.Dr.Mesut AYAN'a teşekkürü bir borç bilir şükranlarımı arzederim.

Ayrıca, tezimi titizlikle daktilo eden Bölüm Sekreteri sayın İhsan GENÇ'e ve çizimlerime yardımcı olan Teknik Ressam sayın Nurten TUNCEL'e teşekkür ederim.



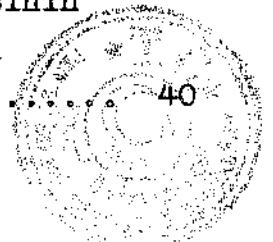
İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Özet	1
Summary	111
Teşekkür	v
İçindekiler	vi
Tablolar	x1
Şekiller	x11
Semboller	x1x
 1. GİRİŞ	 1
 2. KURBALARDA TAŞITLARIN STABİLİTESİ	 3
2.1. Kurbada Bir Taşıta Etkiyen Kuvvetler	3
2.2. Kurbalarda Kritik Hızlar	4
2.2.1. Deversiz Bir Kurbada Kritik Hızlar	4
2.2.2. Deverli Bir Kurbada Kritik Hızlar	6
2.3. Enine İvme ve Sadme	8
2.4. Minimum Kurba Yarıçapı	10
2.5. Dever	12
 3. GEÇİŞ EĞRİLERİ	 14
3.1. Giriş	14
3.2. Bugünkü Geçiş Eğrileri ve Özellikleri ...	16
3.2.1. Kübik Parabol Geçiş Eğrisi	16

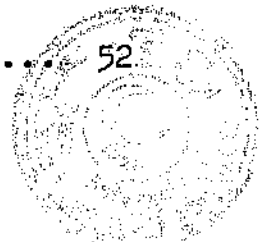


Sayfa

3.2.1.1. Eğri Denkleminin Elde Edilmesi	17
3.2.1.2. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinin Elemanlarının Hesaplanması	18
3.2.1.3. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinde Eğrilik Değişimi ..	22
3.2.1.4. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinde Değer Değişimi ...	22
3.2.1.5. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinde Enine İvmenin Değişimi	23
3.2.2. Lemniskat Geçiş Eğrisi	24
3.2.2.1. Lemniskat Geçiş Eğrisinde Eğrilik Değişimi	26
3.2.2.2. Lemniskat Geçiş Eğrisinin Elemanlarının Hesaplanması	28
3.3. Klotoid Geçiş Eğrisi	29
3.3.1. Klotoidin Özellikleri	30
3.3.2. Klotoid Geçiş Eğrisinin Eğrilik Değişimi	36
3.3.3. Klotoid Geçiş Eğrisinin Herhangi Bir Noktasındaki Sapma Açısı	37
3.3.4. Klotoid Geçiş Eğrisinin Elemanlarının Hesabı	38
3.3.4.1. x,y Dik Koordinatların Hesabı	39
3.3.4.2. Klotoid Geçiş Eğrisinin Diğer Elemanlarının Hesabı	40

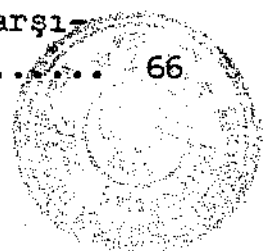


3.3.4.3. Klotoidin Temel Büyük- lükleri (C,A,L,R) Ara- sındaki Bağlantılar	41
3.3.5. Klotoid Geçiş Eğrisinde Dever Değişimi	42
3.3.6. Klotoid Geçiş Eğrisinde Enine İvmenin Değişimi	43
4. KARAYOLLARINDA YENİ BİR GEÇİŞ EĞRİSİNİN TEKLİFİ VE KLOTOİD İLE KARŞILAŞTIRMA	44
4.1. Yeni Bir Geçiş Eğrisinin Araştırılması ve Önerilmesi	45
4.1.1. Eğrilik Değişimi 2. Derece ve Yukarı Doğru Konkav Olan Geçiş Eğrisinin Elde Edilmesi	45
4.1.1.1. Genel Durum İçin Eğrinin İncelenmesi	48
4.1.1.1.1. Sapma Açısı ..	48
4.1.1.2. Özel Durum İçin Eğrinin İncelenmesi	50
4.1.1.2.1. Geçiş Eğrisi l'in Elemanları	50
4.1.1.2.2. Geçiş Eğrisi l'in Eğrilik Değişimi	52
4.1.1.2.3. Geçiş Eğrisi l'in Herhangi Bir Noktasın- daki Sapma Açısı	52



Sayfa

4.1.1.2.4. Geçiş Eğrisi 1'in x,y Dik Koordinatla- rının Hesabı .	53
4.1.1.2.5. Geçiş Eğrisi 1'in Diğer Elemanları- nın Hesabı ...	55
4.1.1.2.6. Geçiş Eğrisi 1'in Temel Büyüklikleri (Z,A,L,R) Arasındaki Bağıntılar ..	57
4.1.1.2.7. Dever Değişimi mi	57
4.1.1.2.8. Enine İvme- nin Değişimi	60
4.1.2. Eğrilik Değişimi 2. Derece ve Aşağı Doğru Konkav Olan Geçiş Eğrisinin Elde Edilmesi	60
4.1.2.1. Geçiş Eğrisi 2'nin Her- hangi Bir Noktasındaki Sapma Açısı	62
4.1.2.2. Geçiş Eğrisi 2'nin Ele- manlarının Hesabı	63
4.1.2.3. Dever Değişimi	63
4.1.2.4. Enine İvmenin Değişimi .	64
4.2. Geçiş Eğrisi 1 ve Geçiş Eğrisi 2'nin Klotoid'le Karşılaştırılması	65
4.2.1. Eğrilik Değişimi Yönünden Karşı- laştırma	66



Sayfa

4.2.2. Sapma Açısı Yönünden Karşılaştırma	67
4.2.3. Enine İvmenin Değişimi Yönünden Karşılaştırma	69
4.2.4. Dever Değişimi Yönünden Karşılaş- tırma	71
4.2.5. Öteleme Miktarı Yönünden Karşılaş- tırma	72
4.2.6. Kurba Uzunluğu Yönünden Karşılaş- tırma	74
5. SAYISAL ÖRNEKLER	76
5.1. Giriş	76
6. SONUÇ	82
7. KAYNAKLAR	83
EKLER	85
ÖZGEÇMİŞİ	



TABLOLAR

Sayfa

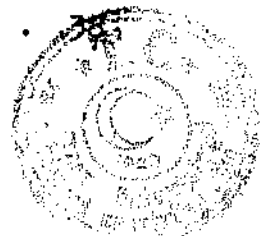
Tablo 2.1 : Proje Hızına Bağlı Olarak Enine Sürtünme Katsayıları	11
Tablo 4.1 : Eğrilik Değişimi Yönünden Karşılaş- tırma	66
Tablo 4.2 : Sapma Açısı Yönünden Karşılaştırma ..	68
Tablo 4.3 : Enine İvmenin Değişimi Yönünden Kar- şılaştırma	69
Tablo 4.4 : Dever Değişimi Yönünden Karşılaştırma	71
Tablo 4.5 : Karşılaştırılan Eğrilerin Öteleme Miktarları	73
Tablo 4.6 : Toplam Kurba Uzunluğu	75



ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1 : Kurbada bir taşıta etkiyen kuvvet- ler	4
Şekil 2.2 : Yatay kurbada enine ivmeyi meydana getiren kuvvet	9
Şekil 3.1 : Kübik parabol geçiş eğrisinin eğri- lik değişimi	17
Şekil 3.2 : Kübik parabol geçiş eğrisinin ele- manları	19
Şekil 3.3 : Kübik parabol geçiş eğrisinde dever değişimi	22
Şekil 3.4 : Lemniskat eğrisi	25
Şekil 3.5 : Lemniskat geçiş eğrisinin elemanları	28
Şekil 3.6 : Klotoid	30
Şekil 3.7 : Klotoidin meydana geliş şekli	31
Şekil 3.8 : Klotoidin parametresinin değişmesi .	31
Şekil 3.9 : Klotoidin sapma açılarındaki değişmesi	32
Şekil 3.10: Aliyman ile daire arasına klotoidin yerleştirilmesi	33
Şekil 3.11: Bir ters kurbada klotoidin yerleştii- rilmesi	34
Şekil 3.12: Klotoidin uzun ve kısa teğeti	34
Şekil 3.13: Aynı bir klotoidde yarıçap değişim- leri	35
Şekil 3.14: Büyük ve küçük parametrelili klotoid- lerde yarıçap değişimleri	36
Şekil 3.15: Klotoid geçiş eğrisinin eğrilik değişimi	36
Şekil 3.16: Klotoid geçiş eğrisinin elemanları .	36



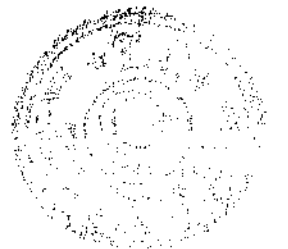
Sayfa

Şekil 3.17: Klotoid geçiş eğrisinde dever	
değişimi	42
Şekil 4.1 : 2. Dereceden eğrilik değişimi (yukarı doğru konkav)	46
Şekil 4.2 : Geçiş eğrisi 1'in elemanları	51
Şekil 4.3 : Akış diagramı	58
Şekil 4.4 : Geçiş eğrisi 1'in dever değişimi ...	59
Şekil 4.5 : 2. Dereceden eğrilik değişimi (Aşağı doğru konkav)	61
Şekil 4.6 : Geçiş eğrisi 2'nin dever değişimi ..	64
Şekil 4.7 : Karşılaştırılan eğrilerde eğrilik değişimleri	67
Şekil 4.8 : Sapma açısı değişimleri	68
Şekil 4.9 : Enine ivmenin değişimi	70
Şekil 4.10: Dever değişimi	72
Şekil 5.1 : Geçiş eğrilerinin kurba içindeki konumları	76

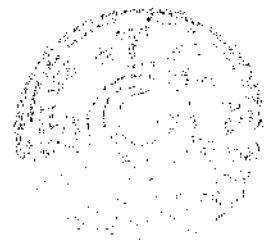


SEMBOLLER

A	Sabit katsayı, parametre
a, a_1	Enine ivme
a'	Sadme
B	Sabit katsayı
b	Geçiş eğrisi arasındaki dairesel yay uzunluğu
C	Sabit katsayı
d, d_x, d_1	Dever miktarı
e	Tekerlekler arasındaki mesafe
F	Merkezkaç kuvveti
f	Enine sürtünme katsayısı
F'	Enine ivmeyi meydana getiren kuvvet
G_B	Geçiş eğrisi başlangıcı
G_S	Geçiş eğrisi sonu
g	Yerçekimi ivmesi
h	Taşıt ağırlık merkezinin yol platformundan yüksekliği
K, k, k_x, k_1	Eğrilik
L	Geçiş eğrisi uzunluğu
L_T, L_K	Kurba uzunluğu
l	Herhangi bir noktadaki geçiş eğrisi uzunluğu
M	Dairenin merkezi
m	Taşıtın kütlesi
N	Normal kuvvet
n	Katsayı
P	Sürtünme kuvveti
R	Kurba yarıçapı



R_{min}	Minimum kurba yarıçapı
S	Kiriş uzunluğu
T_k	Kısa teğet
T_u	Uzun teğet
T, t	Teğet uzunluğu
t	Geçiş süresi
V, v	Taşıtın hızı
V_p	Proje hızı
W	Taşıtın ağırlığı
X, Y, x, y	Dik koordinatlar
X_{G_S}, Y_{G_S}	Geçiş eğrisinin son noktasının koordinatları
X_m, Y_m	Daire merkezinin koordinatları
α	Dever açısı, daire yayını gören merkez açısı
ζ, ψ	Sapma açısı
σ	Kutupsal açı
θ	Teğet giriş açısı
ρ	Eğrilik yarıçapı
Δ	Kesişme açısı
ΔR	Öteleme miktarı



1. GİRİŞ

Son yıllarda, taşıt teknolojisindeki hızlı gelişmeler sonucu yüksek hız yapabilen taşıtlar imal edilmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak karayollarının projelendirilmesinde esas alınan proje hızlarının da artırılması kaçınılmaz olmaktadır.

Gerek yeni inşaa edilen otoyol güzergâhlarında, gerekse mevcut yol güzergâhlarının yeni proje hızlarına göre iyileştirilme çalışmalarında ele alınacak güzergâh elemanı kurbalardır.

Aliymanda V hızı ile seyreden bir taşıt kurbaya girdiğinde ani bir merkezkaç kuvvetinin etkisi altına girer. Seyahat konforunu bozan, savurma ve devirme tehlikesi doğuran bu kuvveti azaltabilmek için, taşıtın V hızını düşürmek, kurba yarıçapını büyütmek, yol yüzeyine enine eğim (dever) vermek, ayrıca merkezkaç kuvvetinin ani olarak ortaya çıkmasını önlemek için de aliymanla kurba arasına eğriligi tedricen değişen bir eğri yerleştirmek gibi çözümler düşünülebilir. Bunlardan aliymandan kurbaya girişte taşıtın V hızını düşürmek, modern yol güzergâhlarının amacına ters düşmekle birlikte, sürücü hatalarından kurbalarda meydana gelen trafik kazalarını da artıracaktır. Kurba yarıçapını büyütmek, merkezkaç kuvvetini azaltmakta fakat ani ortaya çıkışını önleyememektedir. Enine eğimin ise belirli bir sınırı vardır ve bu sınırın aşılması durumunda



başka sakıncalar ortaya çıkmaktadır. Problemin esas çözümünü, aliymanla kurba arasına yerleştirilecek, eğriligi tedricen değişen eğride aramakta yarar vardır. Bu eğrilere geçiş eğrisi, rakordman eğrisi, birleştirme eğrisi gibi isimler verilmektedir. Bugüne kadar, geçiş eğrisi olarak birçok matematiksel eğriler teklif edilmiş, bunların bazıları pratikte kullanılmış bazıları da literatürde kalmaktan öteye gidememiştir. Karayollarında kullanılan geçiş eğrilerinin başlıcaları, klotoid, lemniskat ve kübik parabol'dür. Ayrıca demiryollarında da Petersen, Bloss, Klein gibi pek çok geçiş eğrileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, karayollarında halen uygulanmakta olan, kübik parabol, lemniskat ve klotoid geçiş eğrileri incelenecektir. Ayrıca, mevcut güzergâhların, yeni proje hızlarına göre iyileştirilmesi çalışmalarında ekonomik ve aynı zamanda konforlu olabilecek yeni bir geçiş eğrisi araştırılıp önerilecektir.



2. KURBALARDA TAŞITLARIN STABİLİTESİ

2.1. Kurbada Bir Taşıta Etkiyen Kuvvetler

Aliymandan yatay kurbaya giren taşıtlar, kurba içerisinde kurbanın dışına doğru yatay bir kuvvetin etkisi altına girerler. Taşıtları savurma ve devirmeye çalışan bu kuvvete, merkezkaç kuvveti denir [1] [2] [3] [4] [5]. Bu kuvvetin değeri:

$$F = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2.1)$$

dir.

Burada;

W = Taşıtlın ağırlığı (kg)

v = Taşıtlın hızı (m/sn)

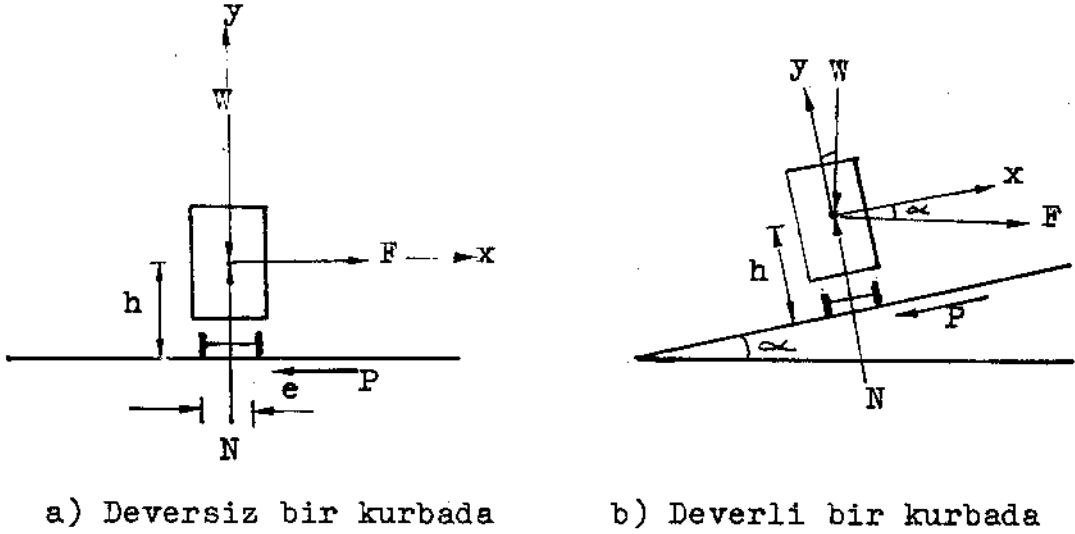
g = Yerçekimi ivmesi (9.81 m/sn²)

R = Kurba yarıçapı (m)

F = Merkezkaç kuvveti (kg)

Bir taşıta kurba içerisinde merkezkaç kuvvetinden başka, yanıl sürtünme kuvveti ve normal kuvvet de etkimektedir. Şekil 2.1'de bir taşıta etkiyen kuvvetler gösterilmiştir [1] [3] [4] [5] .





a) Deversiz bir kurbada b) Deverli bir kurbada

Şekil 2.1. Kurbada bir taşıta etkiyen kuvvetler.

2.2. Kurbalarda Kritik Hızlar

Kurba içerisinde hareket eden bir taşıtı, merkezkaç kuvveti kurba dışına doğru devirmeye ve savurmaya çalışırken, taşıtın ağırlığı ve enine sürtünme kuvveti de bunları önlemeye çalışır. Bunlardan başka yola enine eğim (dever) verilmek suretiyle de merkezkaç kuvvetinin devirme ve savurma etkisi azaltılabilir.

Kurbanın deverli ve deversiz oluşuna göre taşıtların stabilitesi şu şekildedir:

2.2.1. Deversiz Bir Kurbada Kritik Hızlar

Şekil 2.1.a göz önüne alınıp, denge şartları yazılırsa;



$$\sum X = 0 \text{ için } F = P \quad (2.2)$$

$$\sum Y = 0 \text{ için } N = W \quad (2.3)$$

bulunur. Enine sürtünme kuvveti;

$$P = f.N = f.W \quad (2.4)$$

olur. Burada, f enine sürtünme katsayısı, P ise enine sürtünme kuvvetidir. (2.2) bağıntısında F 'nin (2.1)'deki, P 'nin (2.4)'teki ifadeleri yerlerine yazılırsa,

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} = f.W$$

veya

$$\frac{v^2}{g.R} = f$$

bulunur.

$$v \text{ [m/sn]} = \frac{V \text{ [km/h]}}{3,6} \text{ ve } g=9,81 \text{ m/sn}^2$$

konursa denklem,

$$\frac{1}{9,81} \cdot \frac{v^2}{(3,6)^2} \cdot \frac{1}{R} = f$$

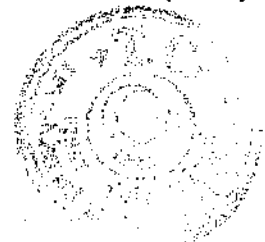
veya

$$f = \frac{v^2}{127,14 R} \quad (2.5)$$

şeklini alır. Buradan savrulma hızı,

$$V_{sav} = 11,3 \sqrt{f.R} \quad (2.6)$$

olarak bulunur.



Merkezkaç kuvveti, taşıtı, dış tekerleğin yol kaplamasına değdiği nokta etrafında devirmeye çalışır. Bu noktaya göre $\sum M=0$ şartı yazılırsa,

$$F.h - W.\frac{e}{2} = 0$$

buradan

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot h = W.\frac{e}{2}$$

bulunur. Bu ifadede,

$$v = \frac{V [\text{km/h}]}{3,6}, \quad g=9,81 \text{ m/sn}^2$$

konur ve gerekli kısaltmalar yapılırsa, devrilme hızı

$$V_{\text{dev}} = 8.0 \sqrt{\frac{R.e}{h}} \quad (2.7)$$

bulunur. Burada;

e = Tekerlekler arasındaki mesafe (m)

h = Taşıtın ağırlık merkezinin yol platformundan yüksekliği (m).

2.2.2. Deverli Bir Kurbada Kritik Hızlar

Şekil 2.1.b göz önüne alınırsa; $\sum X=0$ denge şartından,

$$F.\cos\alpha = W.\sin\alpha + P$$

veya

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos\alpha = W.\sin\alpha + f.N \quad (2.8)$$

bulunur. $\sum Y=0$ denge şartından,



$$N = W \cdot \cos \alpha + \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \sin \alpha$$

bulunur. Bulunan bu ifade (2.8)'de yerine konursa,

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos \alpha = W \cdot \sin \alpha + f(W \cdot \cos \alpha + \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \sin \alpha)$$

elde edilir. Bu eşitliğin her iki tarafı $W \cdot \cos \alpha$ ya bölünürse,

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = \tan \alpha + f + f \cdot \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \tan \alpha \quad (2.9)$$

olur. Buradan,

$$\frac{v^2}{R} (1 - f \cdot \tan \alpha) = g (f + \tan \alpha)$$

$v = \frac{V}{3,6}$ ve $g = 9.81 \text{ m/sn}^2$ değerleri yerlerine konur, gerekli düzenlemeler yapılırsa, savrulma hızı,

$$V_{\text{sav}} = 11,3 \sqrt{\frac{R(f + \tan \alpha)}{1 - f \cdot \tan \alpha}} \quad (2.10)$$

bulunur. Burada, $\tan \alpha = 0$ olması durumunda (2.10) eşitliğinin (2.6) eşitliği ile aynı olduğu görülmektedir.

Deverli bir kurbada devirmeye neden olan hız ise, dış tekerleğin kaplamaya değdiği noktaya göre moment alınarak elde edilir. $\sum M = 0$ denge şartı yazılırsa;

$$\begin{aligned} & \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos \alpha \cdot h - \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{e}{2} - W \cdot \cos \alpha \cdot \frac{e}{2} \\ & - W \cdot \sin \alpha \cdot h = 0 \end{aligned}$$

eşitlik $W \cdot \cos \alpha$ ya bölünürse,

$$\frac{v^2}{g \cdot R} \cdot h - \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \tan \alpha \cdot \frac{e}{2} - \frac{e}{2} - \tan \alpha \cdot h = 0$$

buradan,



$$\frac{v^2}{g.R} \left(h - \frac{e}{2} \tan \alpha \right) = \left(h \tan \alpha + \frac{e}{2} \right)$$

buradan da,

$$v^2 = g.R \left(\frac{h \tan \alpha + \frac{e}{2}}{h - \tan \alpha \cdot \frac{e}{2}} \right)$$

bulunur. $v = \frac{V}{3,6}$, $g = 9,81 \text{ m/sn}^2$ alınırsa devrilme hızı

$$V_{\text{dev}} = 3,6 \sqrt{\frac{9,81.R \left(h \tan \alpha + \frac{e}{2} \right)}{h - \tan \alpha \cdot \frac{e}{2}}}$$

veya

$$V_{\text{dev}} = 11,3 \sqrt{\frac{R \left(h \tan \alpha + \frac{e}{2} \right)}{h - \frac{e}{2} \tan \alpha}} \quad (2.11)$$

dir. Burada devrilme hızı km/h olarak bulunur.

2.3. Enine İvme ve Sadme

Deverli bir kurbada seyreden bir taşıt, merkezkaç kuvvetinden doğan enine (yanal) bir ivmeye maruz kalır. Bu enine ivmeyi meydana getiren kuvvetler Şekil 2.2'de gösterilmiştir [4] .

Şekil 2.2'ye göre enine ivmeyi meydana getiren kuvvet, F' kuvvetidir. Buna göre,

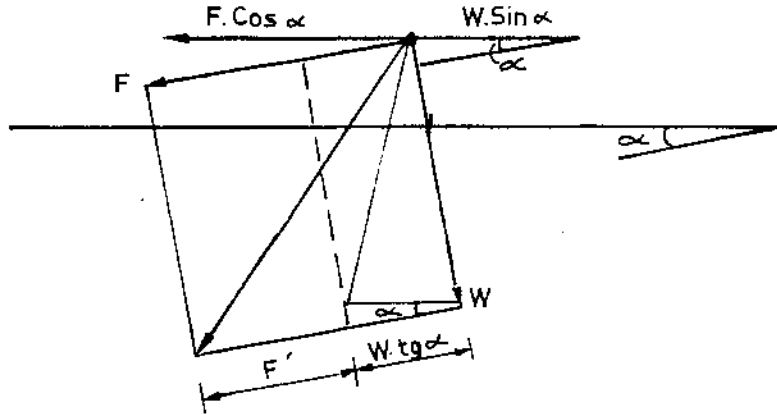
$$F' = F \cdot \tan \alpha \quad (2.12)$$

$$F' = m \cdot a$$

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

$$W = m \cdot g$$





Şekil 2.2. Yatay kurbada enine ivmeyi meydana getiren kuvvet.

ifadeleri (2.11) ifadesinde yerlerine yazılırsa,

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

olur. Buradan,

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

bulunur. $tg\alpha = \text{dever açısı} = \frac{d}{100}$ olarak gösterilirse,

$$a = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{d}{100}$$

$v = \frac{V}{3,6}$, $g = 9,81 \text{ m/sn}^2$ değerleri yerlerine konursa enine ivme

$$a = \frac{v^2}{12,96 R} - 0,0981 d \quad (2.13)$$

olarak elde edilir.

Motorlu taşıt içindeki yolcuların kurbayı geçişleri sırasında fazla rahatsız olmadan dayanabilecekleri en büyük enine ivme değeri yapılan deneylerde 1.47 m/sn^2 olarak tesbit edilmiştir [4] .



Sadme: Enine ivmenin birim zaman içerisindeki değişimidir [4][6].

$$a' = \frac{da}{dt} = -\frac{a}{t}$$

Burada t, L uzunluğundaki geçiş eğrisinin katedilmesi için gereken zamandır ve değeri,

$$t = \frac{L}{V} = \frac{3,6L}{V}$$

dir. Bu durumda sadmenin değeri,

$$a' = \frac{V^2}{12,96R} \cdot \frac{V}{3,6L} = 0,0981 \cdot d \cdot \frac{V}{3,6L}$$

$$a' = \frac{V^3}{46,7R \cdot L} = \frac{V \cdot d}{36,7L} \quad (2.14)$$

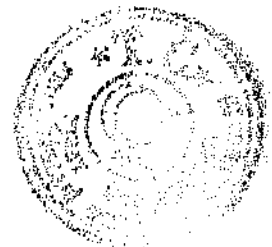
bulunur. Burada R kurba yarıçapı (m), L geçiş eğrisi uzunluğu (m), V taşıtın hızı (km/h) ve d dever miktarı (%) dir.

Sadme seyahat konforunu belirtmede kullanılan bir değerdir. Geçiş eğrilerinin uzunluğunun bulunmasında $a' = 0,3 - 0,6 \text{ m/sn}^3$ arasında bir değer kullanılır [4] [7]. Yapılan gözlemler, kurbalarda $a' = 0,3 \text{ m/sn}^3$ değerinden itibaren sadmenin hissedildiğini ve $a' = 0,6 \text{ m/sn}^3$ değerinde ise rahatsızlık verdiğini göstermiştir [4].

2.4. Minimum Kurba Yarıçapı

2.2.2'deki (2.9) eşitliği ele alınırsa,

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = \text{tg} \alpha + f + f \cdot \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \text{tg} \alpha$$



eşitliğin $f \cdot \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \text{tg} \alpha$ terimi diğer terimler yanında çok küçük olduğundan ihmal edilir ve $\text{tg} \alpha = d$ konursa,

$$\frac{v^2}{g \cdot R} = d + f$$

elde edilir. $v = \frac{V}{3,6}$ ve $g = 9,81 \text{ m/sn}^2$ alınırsa,

$$\frac{v^2}{127,14R} = d + f \quad (2.15)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı merkezkaç kuvvetinin etkisinin kısmen dever ve kısmen de enine sürtünme yolu ile karşılandığını göstermektedir. Bu ifadeden, öngörülen proje hızının sağlanabilmesi için minimum kurba yarıçapı

$$R_{\min} = \frac{v_p^2}{127,14(d+f)} \quad (2.16)$$

bağıntısı ile bulunur.

Bu bağıntıda;

V_p = Proje hızı (km/h)

d = Dever miktarı

f = Enine sürtünme katsayısı

dır. f enine sürtünme katsayısının değeri yol kaplamasının cinsine, kaplamanın kuru veya ıslak oluşuna, taşıt lastiğinin eski ve yeni oluşuna, taşıtın hızına göre değişir. Enine sürtünme katsayısı için yapılan deneylerde hıza bağlı olarak Tablo 2.1'deki değerler bulunmuştur [4].

Tablo 2.1. Proje Hızına Bağlı Olarak Enine Sürtünme Katsayıları.

Proje Hızı(km/h)	50	70	90	100	110	120
Enine Sürtünme Katsayısı	0.16	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12

2.5. Dever

Yatay kurbada, taşıta etkiyen merkezkaç kuvvetinin ortaya çıkarttığı, enine kuvvetleri azaltmak için yol yüzeyine verilen enine eğime dever denir [4] [5] [6].

Kurbada taşıta etkiyen merkezkaç kuvvetinin tamamen dever ile karşılanması durumunda enine ivme $a=0$ olacaktır. Daha önce Kısım 2.3'de bulunmuş olan (2.13) eşitliği, sıfıra eşitlenirse,

$$a = \frac{v^2}{12,96R} - 0,981.d = 0$$

$V=V_p$ alınırsa, buradan,

$$d = 0.00786 \frac{v_p^2}{R} \quad (2.17)$$

elde edilir. Burada bulunan dever, teorik dever olarak tanımlanır. Kurbada, taşıtın etki altında kaldığı merkezkaç kuvveti sadece deverle değil, enine sürtünmenin de katkısıyla karşılanır. Bazı ülkelerde merkezkaç kuvvetinin etkisinin, yarısının dever, diğer yarısının da enine sürtünme ile karşılandığı esas alınmaktadır. Bu durumda dever için;

$$d = 0.00393 \frac{v_p^2}{R} \quad (2.18)$$

bağıntısı kullanılmaktadır.

Türkiye'de karayollarında uygulanacak dever miktarının tesbitinde karayolları Genel Müdürlüğünce,

$$d = 0.00443 \frac{v_p^2}{R} \quad (2.19)$$

bağıntısı kullanılmaktadır [8].



Ayrıca uygulanacak dever miktarı da sınırlandırılmıştır. Buna göre minimum dever %2, maksimum dever %10 kar ve buzlu bölgelerde %8, kentsel yollarda %6 olarak belirtilmiştir [8].



3. GEÇİŞ EĞRİLERİ

3.1. Giriş

Merkezkaç kuvvetinin tedrici bir biçimde ortaya çıkmasını sağlamak için alıyman ile kurba arasına geçiş eğrisi yerleştirme çalışmaları demiryollarında, karayollarından daha önce başlamıştır. Bunun nedeni de 18. yüzyılda demiryol taşıt teknolojisindeki hızlı gelişmelerdir.

Demiryollarında ilk geçiş eğrisi Pressel tarafından kullanılmış, ancak eğrinin kesin bir denklemi verilmemiştir. Fransız mühendis Nördling, geçiş eğrisini daha iyi bir şekilde tarif ve formüle etmiştir. Nördling geçiş eğrisinde eğrilğin lineer olarak arttığını ve aynı zamanda lineer olarak yükselen bir dever rampası gerektirdiğini ileri sürmüştür [9]. Bu özellikleri belli sınırlarda $Y=cx^3$ kübik parabolü ile sağlamak mümkündür.

1872'de Helmert'in geçiş eğrisi üzerine yayınladığı bir kitapta kübik parabolün ilk defa kullanma şartlarını da açıklamıştır [9].

Hızların yükselmesi sonucu geçiş eğrileri hakkında araştırmalar artmış ve Petersen, Bloss, Klein gibi birçok demiryolcu kendi isimlerini taşıyan geçiş eğrilerini teklif etmişlerdir [9].



Demiryollarındaki geçiş eğrileriyle ilgili bu gelişmelere karşın, karayollarında geçiş eğrileriyle ilgili gelişmelerin kesin olarak hangi yıllarda başladığına ait, literatürden kesin bir bilgi edinilmemiştir.

Ancak, H.Kasper, W.Schürba ve H.Lorenz tarafından yayınlanan "Güzergah Elemanı Olarak Klotoid" adlı eserin önsözünde Klotoid geçiş eğrisinin 1860'da Max V. Leber incelenmiş olduğu ve 1937 yılında L.Oerley tarafından hareket dinamiği nedeni ile yol inşaatına dahil edildiği belirtilmiştir [10].

Klotoid geçiş eğrisinin karayollarında popöler olarak kullanılması, Kasper, Schürba ve Lorenzin 15 yıl gibi uzun bir süre araştırmaları sonucu 1954 yılında yayınladıkları Güzergah Elemanı olarak Klotoid ve Birim Klotoid tabloları adlı eserle olmuştur. Kübik parabol daha çok demiryollarında kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise, demiryollarında büyük kurba yarıçapı kullanılmasıdır.

Klotoid ve kübik parabolden başka, Lemniskat eğrisi de karayollarında geçiş eğrisi olarak kullanılmaktadır.

Bu eğrilerden başka G.J.Thornton-Smith 1960 yılında $l^2 = c^2 \cdot \text{tg} \frac{1}{2} \psi$ şeklinde bir eğri teklif etmiştir [11]. Yine aynı araştırmacı 1961 yılında yapmış olduğu yeni bir araştırmada $S^2 = n \cdot a^2 \cdot \frac{1}{n} \psi$ ($n=1,2,3$ durumları için) şeklinde bir geçiş eğrisi ailesi vermiştir [12].



Son yıllarda yeni geçiş eğrileri ortaya atılmamış fakat mevcut eğrilerle ilgili araştırmalarda devam etmiştir. 1980 yılında Kahler [13], 1981 yılında Hinüber ve Hermann [14], 1983 yılında Schnadelbach [15] ve 1986 yılında Schuhr [16] geçiş eğrilerinin x,y koordinatlarının bilgisayarlarla çözümü için hesap metotları üzerinde çalışmalar yapmışlar ve yayınlamışlardır.

3.2. Bugünkü Geçiş Eğrileri ve Özellikleri

Karayollarında en çok kullanılan geçiş eğrileri, kübik parabol lemniskat ve klotoid geçiş eğrileridir.

3.2.1. Kübik Parabol Geçiş Eğrisi

Geçiş eğrisi olarak en çok kullanılan eğrilerden birisi kübik paraboldür. Çok kullanılmasının nedeni basit bir formül yapısına sahip olması ve bu formül basitliğinden x ve y koordinatlarının kolayca hesaplanabilir olmasıdır. Ancak bu eğri spiral bir yapıya sahip olmadığı için sapma açısının belli bir değerine ($\alpha=12^\circ$ veya $\alpha=15^\circ$) kadar kullanılabilir. Bu değerden sonra yapılan ihmallerin değeri büyür ve eğri doğrusallaşmaya başlar [11].

Kübik parabol, kullanılan yarıçapların büyüklüğünden dolayı demiryollarında daha çok kullanılır.

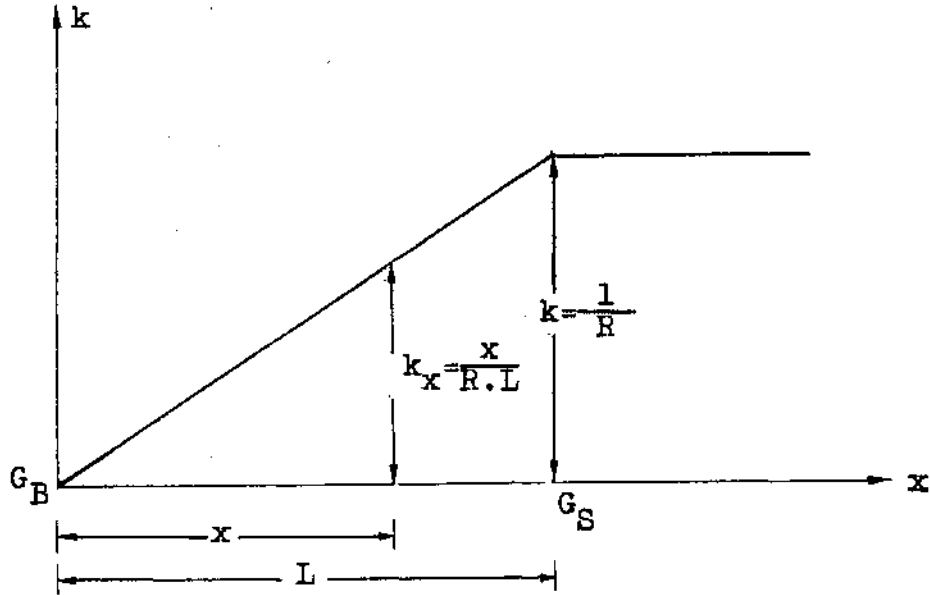


3.2.1.1. Eğri Denkleminin Elde Edilmesi

Kübik parabol geçiş eğrisinin denklemi kolayca şöyle çıkarılabilir: Dik koordinat sistemine göre ifade edilmiş bir eğrinin eğriliği,

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile belirlidir [17] [18]. Ayrıca, kübik parabol geçiş eğrisinin eğrilik değişimi Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir [9].



Şekil 3.1. Kübik parabol geçiş eğrisinin eğrilik değişimi.

Geçiş eğrisi başlangıcı (G_B)'de eğrilik $k=0$ ve geçiş eğrisinin dairesel yay ile birleştiği nokta (G_S)'de $k=\frac{1}{R}$ dir. Geçiş eğrisinin herhangi bir noktasında ise,

$$k_x = \frac{x}{RL} \quad (3.2)$$

dir. (3.1) eşitliğinde y' türevi ihmal edilip (zira



küçük sapma açılarında $y' = \tan \alpha$ ihmal edilebilir mertebededir), herhangi bir noktadaki eğriliğe eşitlenirse,

$$k = \frac{1}{R_x} = y'' = \frac{x}{R.L}$$

buradan geçiş eğrisinin diferansiyel denklemi

$$y'' = \frac{x}{R.L} \quad (3.3)$$

olarak bulunur.

Başlangıç değerlerinin yardımı ile (3.3) denklemi çözülürse;

$$y' = \frac{x^2}{2RL} + C_1$$

$$x=0 ; y'=0 \text{ için } C_1=0$$

bulunur.

$$y = \frac{x^3}{6RL} + C_2$$

$$x=0 ; y=0 \text{ için } C_2=0$$

bulunur. Buradan,

$$y = \frac{x^3}{6RL} \quad (3.4)$$

bulunur. Böylece kübik parabolün kartezyen koordinatlardaki denklemi elde edilmiş olur.

3.2.1.2. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinin Elemanlarının Hesaplanması

Kübik parabol geçiş eğrisinin elemanları Şekil 3.2'de görülmektedir [3] [4] [9].



$$\operatorname{tg} \zeta = y' = \frac{x^2}{2RL} \quad (3.7)$$

Son noktadaki sapma açısı $x=L$ alınarak

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{L}{2R} \quad (3.8)$$

olarak bulunur.

M daire merkezinin absisi x_m :

$$x_m = x_{G_S} - \overline{CG}_S \quad (3.9)$$

$$\overline{CG}_S = R \cdot \sin \zeta$$

küçük açılarda $\sin \zeta = \operatorname{tg} \zeta$ alınabilir,

$$\overline{CG}_S = R \cdot \operatorname{tg} \zeta = R \cdot \frac{L}{2R}$$

buradan,

$$\overline{CG}_S = \frac{L}{2} \quad (3.10)$$

olarak bulunur. (3.10) ifadesi (3.9) ifadesinde yerine konur ve $x=L$ alınır,

$$x_m = \frac{L}{2} \quad (3.11)$$

bulunur.

Kurbun yana kayma (öteleme) miktarı ΔR nin bulunması:

$$\Delta R = y_{G_S} - \overline{CB} \quad (3.12)$$

Şekil 3.2'den,

$$\overline{CB} = R \cdot (1 - \cos \zeta)$$

$$\overline{CB} = 2R \sin^2 \frac{\zeta}{2}$$

burada



$$\sin^2 \frac{\zeta}{2} = \operatorname{tg}^2 \frac{\zeta}{2}$$

alınır ve

$$\sin^2 \frac{\zeta}{2} = \left(\frac{L}{4R}\right)^2$$

buradan

$$\overline{CB} = 2R \cdot \left(\frac{L}{4R}\right)^2$$

$$\overline{CB} = \frac{L^2}{8R} \quad (3.13)$$

bulunur. (3.12) ifadesinde, (3.5) ve (3.13) değerleri yerlerine konursa,

$$\Delta R = \frac{L^2}{6R} - \frac{L^2}{8R}$$

buradan kurbun yana kayma miktarı,

$$\Delta R = \frac{L^2}{24R} \quad (3.14)$$

olarak bulunur.

Bazı durumlarda kübik parabol geçiş eğrisinin kutupsal koordinatları da gerekebilir. Bu durumda dik koordinatlar hesaplandıktan sonra, bu değerlerden faydalanılarak kutupsal koordinatlar,

$$\sigma = \operatorname{Arctg}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (3.15)$$

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.16)$$

veya

$$S = \frac{Y}{\sin \sigma}$$

bağıntılarından bulunur.



3.2.1.3. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinde Eğrilik Değişimi

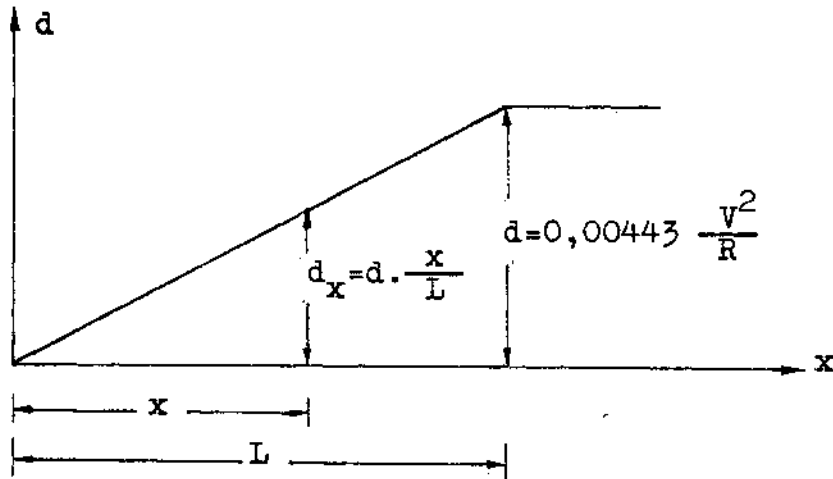
Kübik parabol geçiş eğrisinde eğrilik değişimi şekil 3.1'de gösterilmiştir. Ayrıca geçiş eğrisinin herhangi bir noktasındaki eğrilik değeri (3.2) denklemi ile verilmiştir.

$$k = \frac{x}{RL}$$

Bu denklemi incelediğimiz zaman kübik parabolun eğriliğinin x apsisine bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

3.2.1.4. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinde Dever Değişimi

Kübik parabol geçiş eğrisinde dever değişimi şekil 3.3'de gösterilmiştir.



şekil 3.3. Kübik parabol geçiş eğrisinde dever değişimi.

şekilde de görüldüğü gibi eğri başlangıcında dever miktarı $d=0$ ve eğrinin dairesel yay ile birleştiği



noktada ise (2.19) ifadesinde verilmiş olduğu gibi

$$d=0.00443 \cdot \frac{v^2}{R}$$

değerindedir. Başlangıçtan herhangi bir x mesafesinde ise

$$d_x=0,00443 \cdot \frac{v^2}{R_x} \quad (3.17)$$

değerindedir. Buradaki $\frac{1}{R_x}$ eğriliği ifade etmektedir ve

$$\frac{1}{R_x} = \frac{x}{R \cdot L} \quad (3.18)$$

dir. Bu değer (3.17) nolu ifadede yerine konursa,

$$d_x=0,00443 \cdot v^2 \cdot \frac{x}{R \cdot L}$$

bulunur. Buradan,

$$d_x=d \cdot \frac{x}{L} \quad (3.19)$$

elde edilir.

3.2.1.5. Kübik Parabol Geçiş Eğrisinde Enine İvmenin Değişimi

Deverli bir kurbada seyir halindeki bir taşıtan maruz kalacağı enine ivme (2.13) ifadesinde verildiği gibidir. Bu ifade eğrinin herhangi bir noktası için,

$$a = \frac{v^2}{12.96 R_x} - 0,0981 d_x \quad (3.20)$$

şeklinde yazılabilir. $\frac{1}{R_x}$ 'in (3.18)'deki, d_x 'in ise



(3.19)'daki ifadeleri (3.20)'de yerlerine konursa,

$$a = \frac{v^2}{12,96} \cdot \frac{x}{R.L} - 0,0981 d \cdot \frac{x}{L}$$

buradan, enine ivmenin herhangi bir noktadaki ifadesi,

$$a = \left(\frac{v^2}{12,96R} - 0,0981 d \right) \frac{x}{L} \quad (3.21)$$

olarak bulunur.

3.2.2. Lemniskat Geçiş Eğrisi

Lemniskat kübik parabole göre ideal geçiş eğrisi olarak adlandırılan klotoide daha çok yaklaşmasına rağmen, spiral bir yapıya sahip değildir [11]. Lemniskat kartezyen koordinatlardan ziyade polar koordinatlara daha uygundur. Lemniskat eğrisi, karayolları, demiryollarında geçiş eğrisi olarak kullanılması dışında yonca yaprağı şeklindeki kavşaklarda ve yarış pistlerinde de kullanılmaktadır [11].

Lemniskatın kutupsal koordinatlara göre denklemi

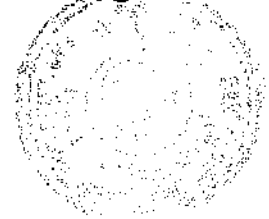
$$S^2 = A^2 \cdot \sin 2\sigma \quad (3.22)$$

şeklindedir [3]. Burada;

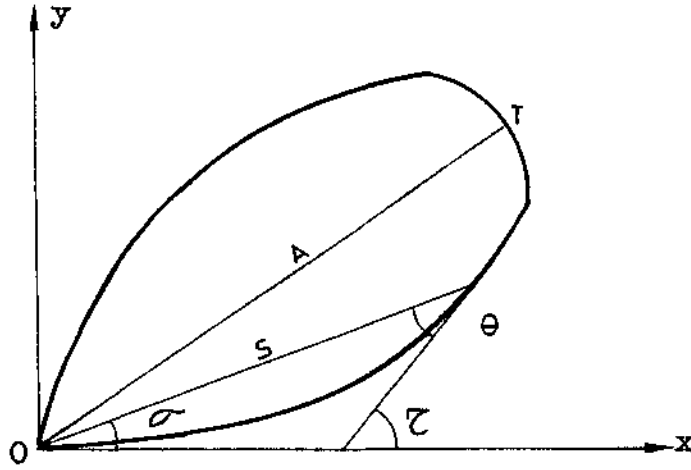
S, σ = Eğri üzerindeki bir noktanın kutupsal koordinatı

A = Eğrinin büyüklüğünü belirleyen parametre.

Şekil 3.4'de lemniskat eğrisi görülmektedir [3]. Şekilde de görüldüğü gibi A parametresi OT uzunluğuna eşittir. Kutupsal açı $\sigma = 50^\circ$ olduğunda S maksimum değerini



alır ve A'ya eşit olur.



Şekil 3.4. Lemniskat eğrisi.

(3.22) eşitliğinin diferansiyeli alınır,

$$2S \cdot \frac{dS}{d\sigma} = 2A^2 \cos 2\sigma$$

olur ve eşitliğin her iki tarafı $2S^2$ 'ye bölünürse,

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{d\sigma} = \frac{A^2 \cos 2\sigma}{S^2} = \frac{A^2 \cdot \cos 2\sigma}{A^2 \sin 2\sigma} = \cot 2\sigma \quad (3.23)$$

elde edilir. Bir eğrinin teğeti ile kirişi arasındaki açı θ ise

$$\cot \theta = \frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{d\sigma} \quad (3.24)$$

dir. (3.23) ve (3.24) eşitlikleri gözönüne alınır,

$$\cot \theta = \cot 2\sigma$$

olur. Buradan,

$$\theta = 2\sigma$$

bulunur ve dolayısıyla,



$$\zeta = 3\sigma \quad (3.25)$$

olur. Sapma açısı ζ nın, kutupsal açı σ nın tam üç katına eşit olması, lemniskat'ın en önemli özelliğidir.

3.2.2.1. Lemniskat Geçiş Eğrisinde Eğrilik Değişimi

Kutupsal koordinat takımında verilen eğrilerin, herhangi bir noktasındaki eğriligi,

$$K = \frac{S^2 + 2S'^2 - SS''}{(S^2 + S'^2)^{3/2}} \quad (3.26)$$

ifadesi ile belirlenir [18].

(3.22) denklemi ile verilen lemniskat geçiş eğrisinin herhangi bir noktasındaki eğriligi,

$$S^2 = A^2 \sin 2\sigma$$

dir. Bunun diferansiyeli,

$$2SS' = 2A^2 \cos 2\sigma$$

$$SS' = A^2 \cos 2\sigma$$

$$S = A \sqrt{\sin 2\sigma}$$

buradan,

$$S' = \frac{A^2 \cos 2\sigma}{A \sqrt{\sin 2\sigma}} = \frac{A \cos 2\sigma}{\sqrt{\sin 2\sigma}}$$

$$S'^2 = \frac{A^2 \cos^2 2\sigma}{\sin 2\sigma} \quad (3.27)$$

bulunur. Diğer taraftan,

$$SS' = A^2 \cos 2\sigma$$



ifadesinden bir daha türev alınırrsa,

$$SS'' + S'^2 = -2A^2 \sin 2\sigma$$

$$SS'' = -2A^2 \sin 2\sigma - \frac{A^2 \cos^2 2\sigma}{\sin 2\sigma} \quad (3.28)$$

bulunur. (3.22), (3.27) ve (3.28) ifadeleri (3.26) ifadesinde yerlerine yazılırsa,

$$K = \frac{A^2 \sin 2\sigma + 2 \cdot \frac{A^2 \cos^2 2\sigma}{\sin 2\sigma} + 2A^2 \sin 2\sigma + \frac{A^2 \cos^2 2\sigma}{\sin 2\sigma}}{(A^2 \sin 2\sigma + \frac{A^2 \cos^2 2\sigma}{\sin 2\sigma})^{3/2}}$$

bu ifadede gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$K = \frac{3S}{A^2} \quad (3.29)$$

bulunur. Bu ifade bize eğriliğin giriş uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

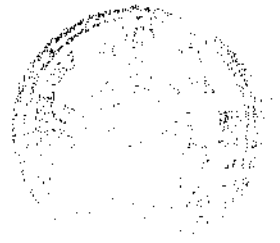
Lemniskatta minimum yarıçap $S=A$ olduğu zaman elde edilir. Bu taktirde,

$$R = \frac{A}{3} \quad (3.30)$$

olur. Bu durumda (3.22) eşitliği,

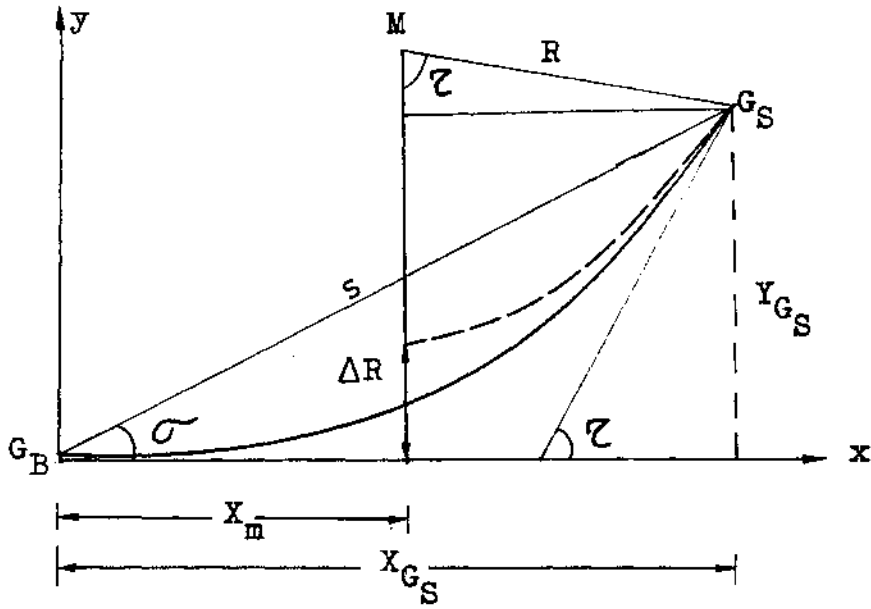
$$S = 3R \cdot \sin 2\sigma \quad (3.31)$$

şeklinde ifade edilir.



3.2.2.2. Lemniskat Geçiş Eğrisinin Elemanlarının Hesaplanması

Şekil 3.5'de lemniskat geçiş eğrisinin elemanları görülmektedir [3].



Şekil 3.5. Lemniskat geçiş eğrisinin elemanları.

Şekilde;

$$X_{G_S} = S \cdot \cos \sigma \quad (3.32)$$

ve

$$Y_{G_S} = S \cdot \sin \sigma \quad (3.33)$$

olduğu görülmektedir. M noktasının apsisi,

$$X_m = X_{G_S} - R \cdot \sin \zeta \quad (3.34)$$

dir. X_{G_S} in (3.32)'deki ifadesi (3.34)'de yerine konursa

$$X_m = S \cdot \cos \sigma - R \cdot \sin \zeta \quad (3.35)$$

olur. S'nin (3.31)'deki ve $\mathcal{Z}$ nin (3.25)'deki değerleri (3.35)'de yerlerine konursa,

$$\begin{aligned}
 X_m &= 3R\sin 2\sigma \cdot \cos \sigma - R \cdot \sin 3\sigma \\
 &= R(3\sin 2\sigma \cdot \cos \sigma - \sin 2\sigma \cdot \cos \sigma - \cos 2\sigma \sin \sigma) \\
 &= R(2\sin 2\sigma \cdot \cos \sigma - \cos 2\sigma \cdot \sin \sigma) \\
 &= R(\sin 2\sigma \cdot \cos \sigma + \sin \sigma) \\
 &= R(2\sin \sigma (1 - \sin^2 \sigma) + \sin \sigma)
 \end{aligned}$$

olur ve sonuta,

$$X_m = R(3\sin \sigma - 2\sin^3 \sigma) \quad (3.36)$$

olarak bulunur. Y_m ordinatı da aynı yol takip edilerek

$$\begin{aligned}
 Y_m &= S \cdot \sin \sigma + R \cdot \cos \mathcal{Z} \\
 &= 3R \cdot \sin 2\sigma \cdot \sin \sigma + R \cdot \cos 3\sigma
 \end{aligned}$$

olur ve burada gerekli kısaltmalar yapılırsa,

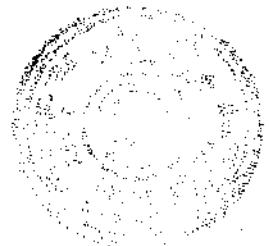
$$Y_m = R(3 \cdot \cos \sigma - 2\cos^3 \sigma) \quad (3.37)$$

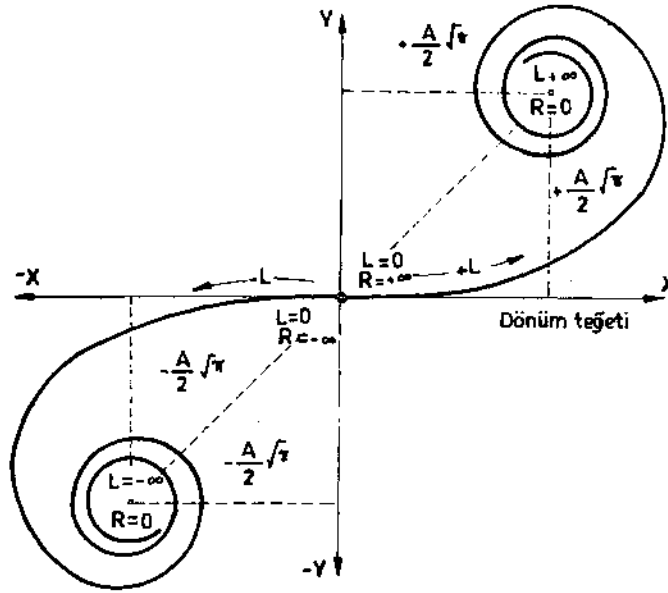
olarak bulunur.

3.3. Klotoid Geçiş Eğrisi

Klotoid karayollarında en çok ve popler olarak kullanılan geçiş eğrisidir.

Klotoid sarılma noktaları etrafında sonsuz sayıda dönme yapan bir eğridir, yani klotoid gerçek bir spiraldir şekil 3.6 [3] [10] [11] .





Şekil 3.6. Klotoid.

3.3.1. Klotoidin Özellikleri

a) Klotoid bir spiraldir. Yol, demiryolu ve kanal inşaatlarında bu spiralin başlangıcına ait çok kısa bir parça kullanıldığından, spiralin halkalı kısmı çizime girmemektedir.

b) Klotoidin her bir noktası için tabii denklem geçerlidir.

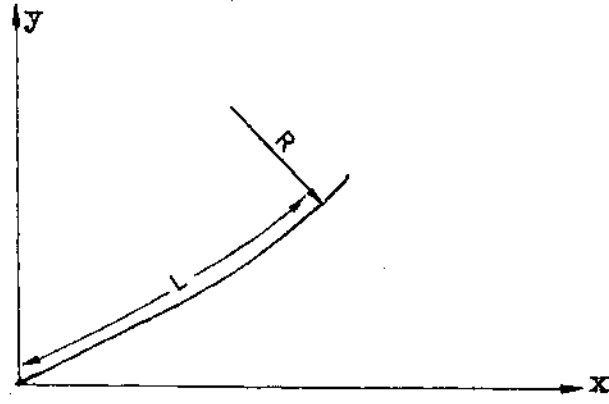
$$A^2 = R \cdot L \quad (3.38)$$

Burada,

R= Herhangi bir noktadaki eğrilik yarıçapı (m)

L= Başlangıç noktasından itibaren söz konusu noktaya kadar olan eğrinin uzunluğu (m).

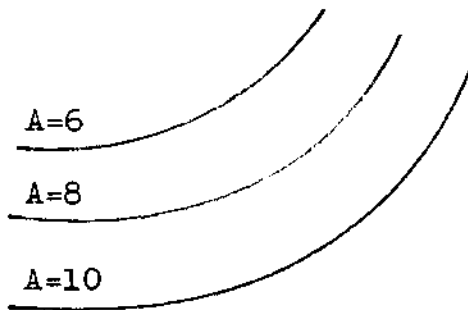
A= Parametre (m).



Şekil 3.7. Klotoidin meydana geliş şekli.

Klotoidin her noktasında R yarıçapı ve L uzunluğu değişmektedir. Ancak bu değişme, yarıçap ile uzunluk çarpımı aynı A^2 sabit değerine eşit olacak şekilde bir bağıntı içinde kalmaktadır. Bu durumda elemanlardan biri, R ya da L bilinmiyorsa, bu bilinmeyeni kolayca hesaplamak mümkündür. Böylece açık ve basit bir bağıntı klotoidi avantajlı kılmaktadır.

c) A değerine, klotoidin parametresi denir. Aynı bir klotoidde parametre değişmez. Parametre değiştirilirse, klotoidin büyüklüğü de değiştirilmiş olur. O halde parametre, bir büyütme faktörü önemindedir. Şekil 3.8. [3] [10].



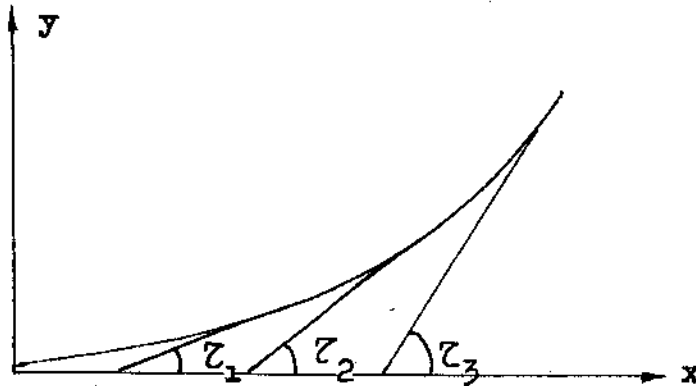
Şekil 3.8. Klotoidin parametresinin değişmesi.

d) Klotoidin bir tek şekli, fakat farklı büyüklükleri vardır. Bu farklı büyüklüklerin birinden diğerine fotografik bir büyütme veya küçültme usulü ile geçilebilir. Bir klotoidin büyütülmesi veya küçültülmesi durumunda bütün uzunluk ölçüleri A parametresi ile aynı oranda değişir. Buna karşılık açı ve oran değerleri değişmez.

e) Parametresi $A=1$ olan klotoide birim klotoid adı verilir. Birim klotoidden daha büyük klotoidler, parametrenin daha büyük değerleri ile çarpılmak suretiyle türetilir.

f) Klotoidin büyüklük kavramı, pratikte ölçek meselesidir. R, L, X, Y büyüklükleri belirli bir ölçek ile hesaplanırsa, bu ölçü parametre içinde geçerlidir. Örnek olarak R (metre), L (metre) ise A^2 'nin boyutu metrekare mertebesinde dir. $A=2$ km cinsinden hesaplanan bir klotoidle $A=2000$ m cinsinden hesaplanan bir klotoid aynıdır.

g) Klotoidin her noktasında sapma açısı başkadır Şekil 3.9.



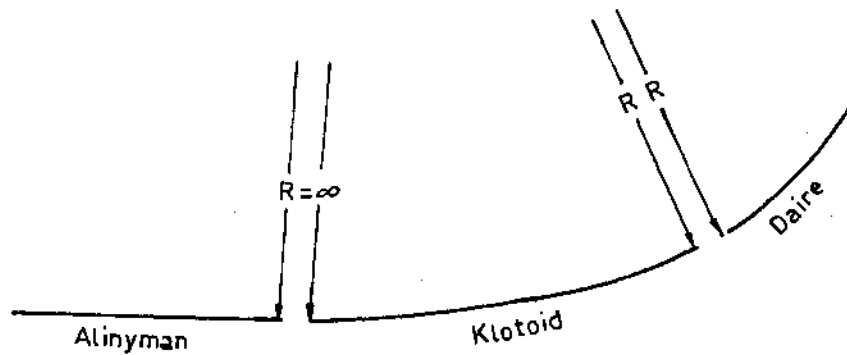
Şekil 3.9. Klotoidin sapma açılarının değişimi.



Aynı bir klotoid içinde $\angle$ sapma açısı L geçiş eğrisi uzunluğuna bağlı olarak değişir.

h) Klotoidin $R=L=A$ olan noktasına tanınma noktası veya tanınma yeri denir. Bu nokta daima $\angle$ sapma açısının $\angle = 28^\circ 38' 52'' = 31,8310^8 = 0.5$ radyan olduğu yerdir. Bir klotoidde bu nokta açı yerleştirilmesi suretiyle yeter hassasiyette tayin edilebiliyorsa, bu noktadaki yarıçap veya başlangıçtan itibaren bu noktaya kadar olan yay uzunluğu, aranılan parametreye eşittir. Ayrıca, tasarlamayı kolaylaştırmak bakımından şu özelliği bilmek yararlıdır: Bir klotoidin $L=A$ uzunluğuna tekabül eden noktasında R yarıçapı A 'ya eşittir ve bu noktadaki sapma açısı yaklaşık olarak 30° dir.

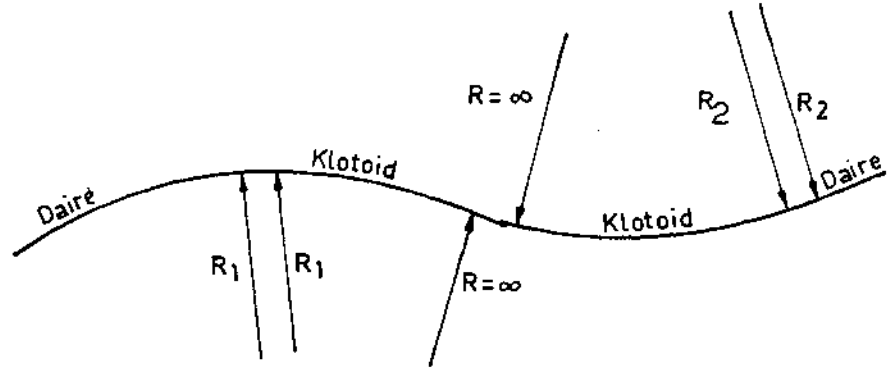
i) Bir çizgi poligonu içine bir klotoidin dahil edilmesi kolaydır. Klotoid $R=\infty$ yarıçapı ile başladığından bir alıymana doğrudan doğruya bağlanabilir Şekil 3.10.



Şekil 3.10. Alıyman ile daire arasına klotoidin yerleştirilmesi.

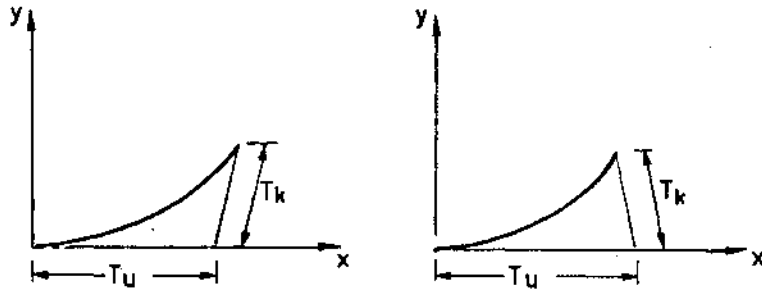
Aynı şekilde ters kurbalarda olduğu gibi, ters yönlü bir klotoid dalına, diğer bir klotoidin bağlanması da mümkündür Şekil 3.11.





Şekil 3.11. Bir ters kurbada klotoidin yerleştirilmesi.

j) Güzergâh çalışmalarında klotoidin çoğunlukla kullanılan bölgesi için (yaklaşık olarak $\alpha = 50^\circ$ ya da $\alpha = 50^\circ$ ye kadar) teğetler oranı, hemen hemen daima $1/2$ dir. α açısı ne kadar küçük olursa bu oran daha çok sağlanır. Başka bir deyişle klotoidin herhangi bir noktasına çizilen kısa teğetinin (T_k), uzun teğetine (T_u) oranı $1/2$ dir. Şekil 3.12. Bu özellik proje hesapları yapılırken yararlı bir dayanaktır.

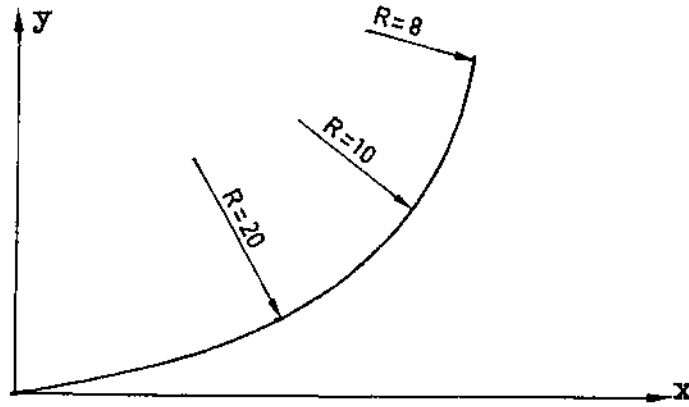


Şekil 3.12. Klotoidin uzun ve kısa teğeti.

k) Bir klotoidin herhangi bir noktasındaki eğrilik, o noktada çizilen ve yarıçapı o noktaya tekabül eden daire ile belirtilebilir. Bu eğrilik dairesi,

klotoidin esas teğetinden, belirli ΔR mesafesindedir. Kaba hesaplar için çizim esnasında, kontrol etmek amacı ile, klotoid çizgisi, eğrilik dairesinin ΔR öteleme miktarının yaklaşık olarak ortasından geçtiğini kabul etmek yeterli hassasiyeti sağlar.

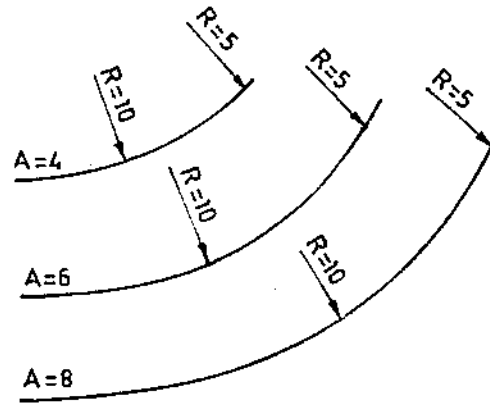
1) Aynı bir klotoidde uzunluk ve yön değişimi büyüdükçe yarıçaplar küçülür. Buna karşılık yarıçaplar büyüdükçe geçiş eğrisi uzunlukları küçülür Şekil 3.13.



Şekil 3.13. Aynı bir klotoidde yarıçap değişimleri.

m) Parametresi büyük olan klotoidlerin eğrilik artışı yavaş olduğundan, büyük trafik hızına elverişlidirler. Küçük parametrelili klotoidlerde eğrilik artışı hızlı olduğundan böyle klotoidler, düşük trafik hızı olan yol kesimlerinde uygulanır veya uygulanmasına gerek kalmaz Şekil 3.14.

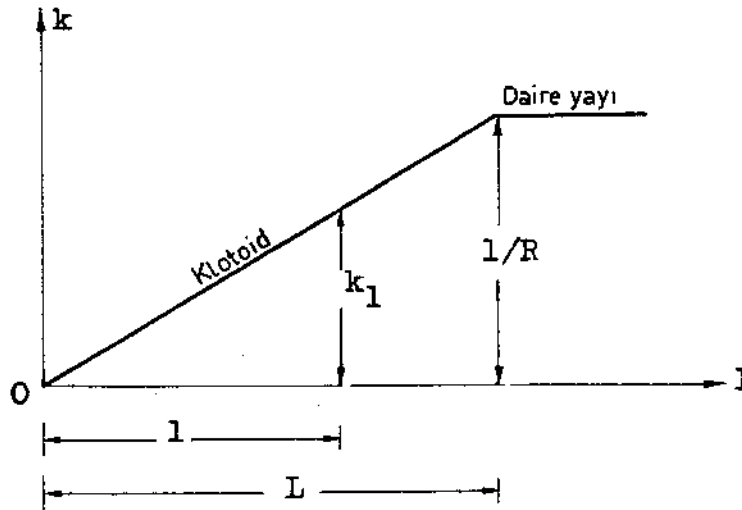




Şekil 3.14. Büyük ve küçük parametrelili klotoidlerde yarıçap değişimleri.

3.3.2. Klotoid Geçiş Eğrisinin Eğrilik Değişimi

Klotoid geçiş eğrisinde eğrilik değişiminin lineer olarak değiştiği, klotoidin özellikleri arasında belirtilmişti. Eğrilik değeri başlangıçta sıfır iken geçiş eğrisinin sonunda $1/R$ 'ye ulaşmaktadır Şekil 3.15 [10].



Şekil 3.15. Klotoid geçiş eğrisinin eğrilik değişimi.

Klotoid geçiş eğrisinin herhangi bir noktasındaki

eğriliğinin,

$$k_1 = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{L} \quad (3.39)$$

olduğu şekilden görülmektedir.

3.3.3. Klotoid Geçiş Eğrisinin Herhangi Bir Noktasında- ki Sapma Açısı ($\mathcal{Z}$)

Sapma açısı eğrilige bağlı olarak bulunur. Eğrilik diagramının alanı sapma açısına eşittir. Bu matematiksel olarak ifade edilirse,

$$\mathcal{Z} = \int_0^l k_1 \cdot dl \quad (3.40)$$

yazılabilir [16]. Bu ifadede k_1 'nin (3.39)'daki değeri yerine konursa,

$$\mathcal{Z} = \int_0^l \frac{1}{RL} \cdot dl$$

olur. Bu integral çözülürse,

$$\mathcal{Z} = \frac{l^2}{2RL} \quad (3.41)$$

Klotoid geçiş eğrisinin herhangi bir noktasındaki sapma açısını veren eşitlik elde edilmiş olur. Geçiş eğrisinin dairesel yay ile birleştiği noktadaki sapma açısının değeri (3.41) ifadesinde $l=L$ alınarak,

$$\mathcal{Z} = \frac{L}{2R} \quad (3.42)$$

bulunur. (3.41) ve (3.42) ifadelerinde $\mathcal{Z}$ radyan cinsindendir.

x_m, y_m = Daire merkezinin koordinatları

Z = Sapma açısı (G_S noktasındaki teğetin eğim açısı)

T_k = Kısa teğet (m)

T_u = Uzun teğet (m)

3.3.4.1. x, y Dik Koordinatların Hesabı

Klotoidin x,y dik koordinatlarını T_k kısa teğetin, doğrultman kosinüsleri yardımı ile bulunur. Düzlemsel bir eğrinin teğetinin doğrultman kosinüsleri,

$$\cos Z = \frac{dx}{dl} \quad (3.43)$$

$$\sin Z = \frac{dy}{dl} \quad (3.44)$$

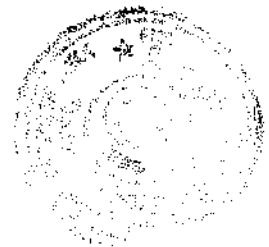
dir [17]. Buradan,

$$x = \int_0^1 \cos Z \cdot dl \quad (3.45)$$

$$y = \int_0^1 \sin Z \cdot dl \quad (3.46)$$

olarak bulunur. Bu integrallere Fresnel integrali denir [13]. Bu tip integraller direkt çözülemezler, ancak $\sin Z$ ve $\cos Z$ açı fonksiyonlarının üstel serilere açılması ve terimsel integrasyonu ile çözümler. (3.45) ve (3.46) integrallerinde Z sapma açısının (3.41)'deki ifadesi yerine konursa,

$$x = \int_0^1 \cos\left(-\frac{l^2}{2RL}\right) \cdot dl \quad (3.47)$$



$$y = \int_0^1 \sin\left(-\frac{l^2}{2RL}\right) \cdot dl \quad (3.48)$$

ifadeleri elde edilir.

$$\cos\left(-\frac{l^2}{2RL}\right) \text{ ve } \sin\left(-\frac{l^2}{2RL}\right)$$

açı fonksiyonlarını Mac Laurin serisine açıp, terimsel integralleri alınır, herhangi bir noktadaki dik koordinatlar,

$$x = l - \frac{l^5}{40A^4} + \frac{l^9}{3456A^8} \quad (3.49)$$

$$y = \frac{l^3}{6A^2} - \frac{l^7}{336A^6} + \frac{l^{11}}{42240A^{10}} \quad (3.50)$$

olarak bulunur. Eğrinin dairesel yay ile birleştiği G_S noktasının dik koordinatları $l=L$ alınarak

$$x_{G_S} = L - \frac{L^5}{40R^2} + \frac{L^9}{3456R^4} \quad (3.51)$$

$$y_{G_S} = \frac{L^3}{6R} - \frac{L^7}{336R^3} + \frac{L^{11}}{42240R^5} \quad (3.52)$$

olarak bulunur.

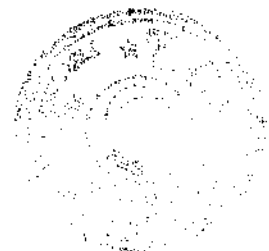
3.3.4.2. Klotoid Geçiş Eğrisinin Diğer Elemanlarının

Hesabı

Şekil 3.16'dan, daire merkezinin apsisi,

$$x_m = x_{G_S} - R \cdot \sin \zeta \quad (3.53)$$

ordinatı ise,



$$y_m = y_{G_S} + R \cdot \cos Z \quad (3.54)$$

dir. Öteleme miktarı,

$$\begin{aligned} R &= y_m - R \\ &= y_{G_S} + R \cdot \cos Z - R \end{aligned}$$

buradan,

$$\Delta R = y_{G_S} - R(1 - \cos Z) \quad (3.55)$$

bulunur. Kısa teğet,

$$T_k = \frac{y_{G_S}}{\sin Z} \quad (3.56)$$

Uzun teğet,

$$T_u = x_{G_S} - y_{G_S} \cdot \cot Z \quad (3.57)$$

Kiriş uzunluğu,

$$S = \sqrt{x_{G_S}^2 + y_{G_S}^2} \quad (3.58)$$

Polar açı,

$$\sigma = \arctan\left(\frac{y_{G_S}}{x_{G_S}}\right) \quad (3.59)$$

dir.

3.3.4.3. Klotoidin Temel Büyüklükleri (Z, A, L, R)

Arasındaki Bağlantılar

(3.38) ve (3.42) bağlantıları dikkate alındığında klotoidin temel büyüklükleri olan A, L, R, Z arasında

şu bağıntılar yazılabilir:

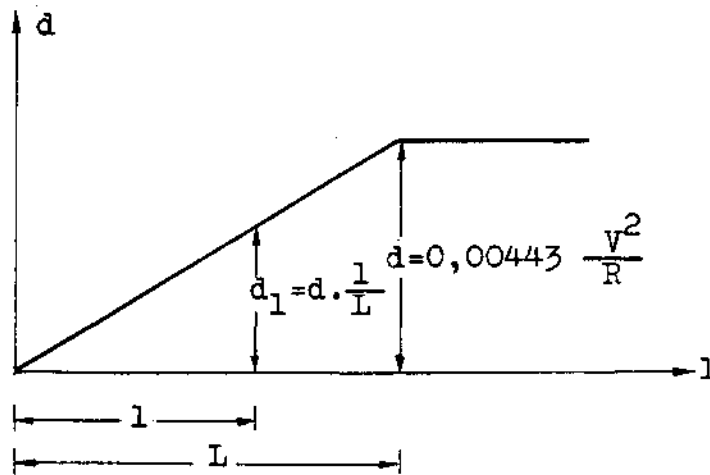
$$R = \frac{A^2}{L} = \frac{L}{2\zeta} = \frac{A}{\sqrt{2\zeta}} \quad (3.60)$$

$$L = \frac{A^2}{R} = 2\zeta R = A \sqrt{2\zeta} \quad (3.61)$$

$$\zeta = \frac{L}{2R} = \frac{L^2}{2A^2} = \frac{A^2}{2R^2} \quad (3.62)$$

$$A = \sqrt{R \cdot L} = \frac{L}{\sqrt{2\zeta}} = R \sqrt{2\zeta} \quad (3.63)$$

3.3.5. Klotoid Geçiş Eğrisinde Dever Değişimi



Şekil 3.17. Klotoid geçiş eğrisinde dever değişimi.

Şekil 3.17'de de görüldüğü gibi geçiş eğrisinin başladığı noktada dever miktarı sıfırdır. Eğrinin yarı-çapı R olan dairesel yay ile birleştiği noktada ise maksimum değere ulaşır. Ayrıca, geçiş eğrisinin başlangıç ile bitim noktaları arasında dever artışı lineer olmaktadır. Bunun için geçiş eğrisinin herhangi bir noktasında dever miktarı;



$$d_1 = d \cdot \frac{1}{L} \quad (3.64)$$

değerinde olmaktadır.

3.3.6. Klotoid Geçiş Eğrisinde Enine İvmenin Değişimi

Deverli bir kurbada seyir halindeki bir taşıtın etkileneceği enine ivme değeri,

$$a = \frac{v^2}{12,96R} - 0,0981 d$$

eşitliği ile daha önce verilmişti. Bu eşitliği klotoid geçiş eğrisinin herhangi bir noktası için,

$$a = \frac{v^2}{12,96R_1} - 0,0981 d_1 \quad (3.65)$$

şeklinde yazılabilir. (3.65) ifadesinde $1/R_1$ için (3.39), d_1 için ise (3.64)'deki değerleri yerlerine yazılırsa,

$$a = \frac{v^2}{12,96} \cdot \frac{1}{R \cdot L} - 0,0981 d \cdot \frac{1}{L}$$

buradan,

$$a = \left(\frac{v^2}{12,96R} - 0,0981 \cdot d \right) \frac{1}{L} \quad (3.66)$$

bulunur.



4. KARAYOLLARINDA YENİ BİR GEÇİŞ EĞRİSİNİN TEKLİFİ VE KLOTOİD İLE KARŞILAŞTIRMA

Karayollarında, Bölüm III'de incelemiş olduğumuz kübik parabol, lemniskat ve klotoid geçiş eğrilerinin dışında, geçiş eğrileri üzerinde pek çok araştırmalar yapılmış ve makaleler yayımlanmıştır. Bu çalışmalardan bir çoğu teorik bir çalışma olarak kalmaktan öteye geçememiştir.

Kurbalarda, sabit eğriliğe sahip olan dairesel eğri kullanmak yerine, eğriliği tedricen değişen geçiş eğrisi kullanılmasının nedeni, alıymanda yüksek hızla seyreden taşıtların bu hızlarını düşürmeden emniyetli bir şekilde, kurbalarda da devam ettirebilmelerine imkân vermek ve aynı zamanda meydana gelecek merkezkaç kuvvetinin şok etkisini yok edip onun tedrici bir biçimde ortaya çıkmasını sağlamaktır. Geçiş eğrilerinde bunu sağlayacak olan en önemli özellik eğrilik değişimidir. Eğrilik değişiminde istenen özellik ise, bu eğrilik değişiminin eğrinin doğrudan 1 boyuna bağlı olarak değişmesidir. Yani kısaca eğrinin spiral bir yapıya sahip olmasıdır. Kübik parabol, lemniskat ve klotoid geçiş eğrilerinin içinde sadece klotoid gerçek bir spiraldir. Bu nedenle klotoid geçiş eğrisi literatürde ideal geçiş eğrisi olarak adlandırılmıştır.

Klotoid geçiş eğrisinde eğrilik değişimi (3.39) eşitliği ile verilmiştir. Bu eşitliği incelediğimiz

zaman eğrilik $\frac{1}{L}$ oranına bağlı olarak lineer bir şekilde değişmektedir. Buna dayanarak yine spiral bir yapıya sahip, fakat eğrilik değişimi lineer olmayıp da ikinci dereceden bir fonksiyon olan, diğer eğrileri de bulmak mümkündür.

Eğrilik değişimi ikinci dereceden bir fonksiyon olan geçiş eğrisi araştırılacak ve bulunacak olan geçiş eğrisi klotoid ile karşılaştırılacaktır. Elde edilecek eğri klotoidten daha konforlu ve özellikle de mevcut güzergâhların iyileştirilmelerinde de daha ekonomik olduğu taktirde önerilecektir.

4.1. Yeni Bir Geçiş Eğrisinin Araştırılması ve Önerilmesi

Eğrilik değişimini karakterize eden eğriyi 2. dereceden bir fonksiyon olarak aldığımız zaman, ortaya iki durum çıkmaktadır. Birinci durumda; eğrilik değişimi yukarı doğru konkav olan bir eğri, ikinci durumda ise, eğrilik değişimi aşağı doğru konkav olan bir eğri, eğriligi karakterize etmektedir. Bu her iki durum için de eğrileri araştıralım.

4.1.1. Eğrilik Değişimi 2. Derece ve Yukarı Doğru Konkav Olan Geçiş Eğrisinin Elde Edilmesi

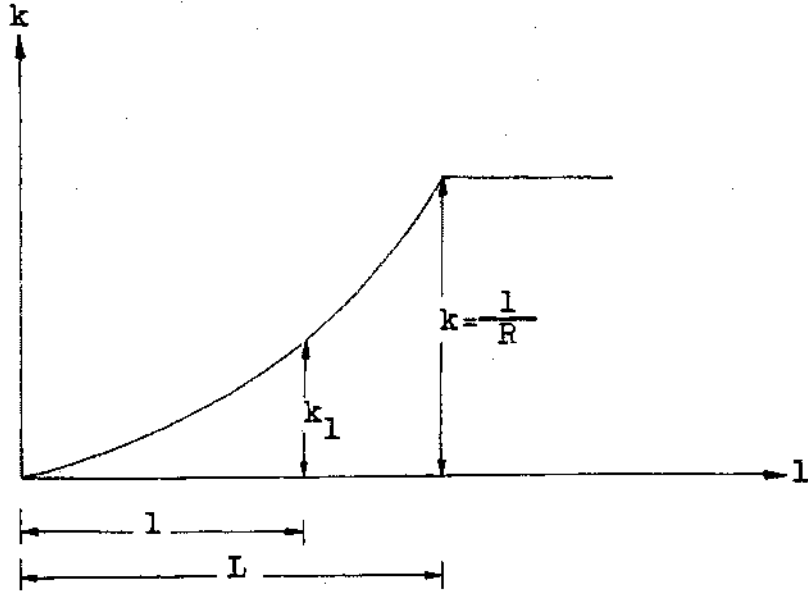
Eğriligin değişim fonksiyonu olarak,

$$k=A_1L^2+B_1L+C$$

(4.1)

şeklinde bir ifadeyi seçelim Şekil 4.1.





Şekil 4.1. 2.Dereceden eğrilik değişimi
(Yukarı doğru konkav).

(4.1) ifadesindeki A,B ve C katsayılarını sınır şartlarından yararlanarak bulabiliriz.

1. Sınır Şartı: Geçiş eğrisinin, alıymanla birleştiği noktadaki yarıçapı sonsuzdur. Bu durumda;

$$l=0 \text{ için } k=0$$

olur.

2. Sınır Şartı: Bu sınır şartında iki durum söz konusudur.

a) (4.1) ifadesinin türevi sıfırdan farklı alınabilir.

$$l=0 \text{ için } k' \neq 0$$

b) (4.1) ifadesinin türevi sıfır alınabilir

(Özel durum).

$$l=0 \text{ için } k'=0$$



3. Sınır Şartı: Geçiş eğrisinin dairesel yay ile birleştiği noktada yarıçap istediğimiz R değerinde olacaktır. Bu durumda,

$$l=L \text{ için } k= \frac{1}{R}$$

olur.

Bu sınır şartlarıyla A,B,C katsayılarını bulalım:

1. Sınır şartından $C=0$ bulunur.

2.a) sınır şartından;

$$k'=2Al+B$$

buradan

$$k'=B$$

bulunur.

3. Sınır şartından,

$$k=AL^2+BL+C$$

$$\frac{1}{R}=AL^2+BL+C \quad (4.2)$$

bulunur. (4.2) ifadesinde B ve C katsayılarının 1. ve 2.a) sınır şartından bulunan değerleri yerlerine konursa,

$$\frac{1}{R}=AL^2+k'L$$

bulunur. Buradan,

$$A=\left(\frac{1}{R} - k'L\right) \cdot \frac{1}{L^2}$$

$$A= \frac{1}{RL^2} - \frac{k}{L}$$



bulunur. Bulunan A,B ve C katsayıları (4.1) ifadesinde yerlerine konursa eğriliği karakterize eden eğrinin ifadesi, başka bir deyişle aradığımız geçiş eğrisinin herhangi bir noktasındaki eğriliğin ifadesini buluruz. Bu durumda,

$$k = \left(\frac{1}{RL^2} - \frac{k'}{L} \right) l^2 + k' l \quad (4.3)$$

bulunur.

Genel şekliyle elde etmiş olduğumuz (4.3) ifadesini sınır şartı 2.b) özel durumu için,

$$k = \frac{l^2}{RL^2} \quad (4.4)$$

şeklinde elde ederiz.

4.1.1.1. Genel Durum İçin Eğrinin İncelenmesi

Eğriliği (4.3) ifadesiyle karakterize edilen geçiş eğrisini inceleyelim.

4.1.1.1.1. Sapma Açısı

Sapma açısının değerinin, eğrilik diagramının alanına eşit olduğunu daha önce belirtilmişti. Bunun matematiksel ifadesi ise,

$$\Sigma = \int_0^1 k \cdot dl$$

dir. Bu ifadede k'nın (4.3)'teki değeri yerine yazılırsa,



$$\mathcal{Z} = \int_0^L \left[\left(\frac{1}{RL^2} - \frac{k'}{L} \right) \cdot l^2 + k' l \right] \cdot dl$$

olur. Buradan eğrinin herhangi bir noktasındaki sapma açısı,

$$\mathcal{Z} = \left(\frac{1}{RL^2} - \frac{k'}{L} \right) \frac{l^3}{3} + \frac{k' l^2}{2} \quad (4.5)$$

olarak bulunur. Eğrinin son noktasındaki sapma açısı $l=L$ alınarak,

$$\mathcal{Z} = \frac{L}{3R} + \frac{k' L^2}{6} \quad (4.6)$$

bulunur.

Özel durumda, yani $k'=0$ için eğrinin herhangi bir noktasında sapma açısı (4.5) ifadesinden,

$$\mathcal{Z} = \frac{l^3}{3RL^2} \quad (4.7)$$

olarak bulunur. Eğrinin dairesel yay ile birleştiği noktadaki sapma açısı, (4.7) ifadesinde $l=L$ alınarak,

$$\mathcal{Z} = \frac{L}{3R} \quad (4.8)$$

elde edilir. Burada L ve R metre, $\mathcal{Z}$ ise radyan cinsindedir.

Yukarıda da görüldüğü gibi k' 'nün sıfırdan farklı olarak alındığı genel durum için eğrinin incelenmesi oldukça karışıktır. Eğriligi karakterize eden (4.3) ifadesinde veya sapma açısının (4.5) ifadesinde, k' için alınan her değere karşılık yeni bir eğri elde edilecektir. Ancak k' nün de belirli sınırlar içerisinde olması

gereklidir. Bunun alt sınırı sıfır, üst sınırı ise 1' den küçüktür.

$$0 \leq k' < 1$$

Ayrıca, eğrinin genel şekliyle elemanlarının bulunması da, oldukça karışıktır. Örneğin x,y koordinatlarını bulmak için (4.5) ifadesi Fresnel integrallerinde Sin ve Cos açı fonksiyonlarındaki yerine konulacak, sonra bu fonksiyonlar Mac Laurin serisine açılacak ve bunun da terimsel integrasyonu x,y koordinatları bulunmuş olacaktır.

Bu çalışmada önerilecek eğri $k'=0$ özel durumu için elde edilecek eğridir. Amacımız, konforlu ve ekonomik olan bir eğri bulmaktır. $k'=0$ özel durumunda elde edilecek eğrinin de bu amaca hizmet edecek eğri olduğu karşılaştırmadan da açıkça görülecektir.

4.1.1.2. Özel Durum İçin Eğrinin İncelenmesi

Bu kısımda incelenecek olan, eğrilik değişimi Şekil 4.1'de gösterilen ve (4.4) ifadesiyle verilen eğridir. Bu eğri bundan böyle Geçiş Eğrisi 1 diye adlandırılacaktır.

4.1.1.2.1. Geçiş Eğrisi 1'in Elemanları

Geçiş Eğrisi 1'in elemanları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



4.1.1.2.2. Geçiş Eğrisi l'in Eğrilik Değişimi

Eğrilik değişimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sınır şartları 1.2.(b) ve 3 kullanılarak, eğrinin herhangi bir noktasındaki eğriliği,

$$k_1 = \frac{l^2}{RL^2}$$

(4.4) eşitliği olarak bulunur. Burada R geçiş eğrisinin dairesel yayla birleştiği noktadaki yarıçap, L geçiş eğrisinin toplam uzunluğu, l ise geçiş eğrisinin başlangıcından herhangi bir noktaya kadar olan uzunluğudur.

(4.4) eşitliğinde de görülmektedir ki, $R.L^2$ çarpımı eğrinin her noktası için değişmemektedir. Bu çarpım bir sabite eşitlenirse,

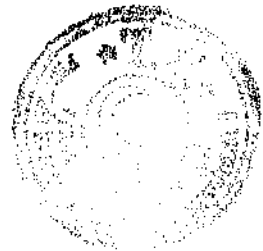
$$R.L^2 = A^3 \quad (4.9)$$

elde edilir. Burada R metre, L metre biriminde alınırsa A parametresi metreküp mertebesinde bulunur. ($R.L^2$ çarpımı eğrinin her noktası için geçerli olduğundan (4.9) ifadesine Geçiş eğrisi l'in tabi denklemi denir.)

4.1.1.2.3. Geçiş Eğrisi l'in Herhangi Bir Noktasındaki Sapma Açısı

Geçiş Eğrisi l'in herhangi bir noktasındaki sapma açısı, 1.2.(b) ve 3. sınır şartları kullanılarak kısım 4.1.1.1.1'de,

$$\zeta = \frac{l^3}{3RL^2}$$



olarak bulunmuştur. Eğrinin dairesel yay ile birleştiği noktada $l=L$ alınarak

$$\zeta = \frac{L}{3R}$$

bulunur.

4.1.1.2.4. Geçiş Eğrisi 1'in x,y Dik Koordinatlarının Hesabı

Eğrinin x,y dik koordinatları, kısa teğetin doğrultman kosinüslerinin yardımı ile bulunabileceği ve bu doğrultman kosinüslerinin de (3.43), (3.44) denklemleri ile verildiği Kısım 3.3.4.1'de belirtilmiştir.

(3.45) ve (3.46) ifadelerinde yerine, bunun (4.7)'deki değeri yerine konursa,

$$x = \int_0^1 \cos\left(\frac{l^3}{3RL^2}\right).dl \quad (4.10)$$

ve

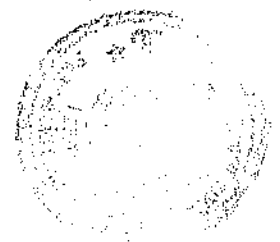
$$y = \int_0^1 \sin\left(\frac{l^3}{3RL^2}\right).dl \quad (4.11)$$

bulunur. Bu integraller Fresnel integralidir. Fresnel integralleri, $\sin \zeta$ ve $\cos \zeta$ açı fonksiyonlarının üstel serilere açılması ve açılımın terimsel integrasyonu ile çözülürler.

$\sin \zeta$ ve $\cos \zeta$ açı fonksiyonlarının Mac Laurin serisi açılımları aşağıdaki gibidir [17] [18] [19],

$$\cos \zeta = 1 - \frac{\zeta^2}{2!} + \frac{\zeta^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{\zeta^{2n}}{(2n)!} + \dots \quad (4.12)$$

ve



$$\sin Z = Z - \frac{Z^3}{3!} + \frac{Z^5}{5!} - \frac{Z^7}{7!} + \dots + (-1)^n \frac{Z^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (4.13)$$

nun gerekli değerleri (4.12) ve (4.13)'de yazılır, bunlar da (4.10) ve (4.11) ifadelerinde yerleştirilirse,

$$x = \int_0^1 \left[1 - \frac{1^6}{9R^2L^4} \cdot \frac{1}{2!} + \frac{1^{12}}{81R^4L^8} \cdot \frac{1}{4!} - \frac{1^{18}}{729R^6L^{12}} \cdot \frac{1}{6!} + \dots \right] dl \quad (4.14)$$

ve

$$y = \int_0^1 \left[\frac{1^3}{3RL^2} - \frac{1^9}{27R^3L^6} \cdot \frac{1}{3!} + \frac{1^{15}}{243R^5L^{10}} \cdot \frac{1}{5!} - \dots \right] dl \quad (4.15)$$

bulunur. (4.14) ve (4.15)'in terimsel integrasyonu ile eğrinin herhangi bir noktasının koordinatları sonuğta,

$$x = 1 - \frac{1^7}{126R^2L^4} + \frac{1^{13}}{25272R^4L^8} - \dots \quad (4.16)$$

ve

$$y = \frac{1^4}{12RL^2} - \frac{1^{10}}{1620R^3L^6} + \frac{1^{16}}{466560R^5L^{10}} - \dots \quad (4.17)$$

olarak bulunur. Bu ifadeler A parametresi cinsinden,

$$x = 1 - \frac{1^7}{126A^6} + \frac{1^{13}}{25272A^{12}} \quad (4.18)$$

ve

$$y = \frac{1^4}{12A^3} - \frac{1^{10}}{1620A^9} + \frac{1^{16}}{46656A^{15}} \quad (4.19)$$

olarak bulunur.



Geçiş eğrisinin dairesel yay ile birleştiği (G_S) noktasının koordinatlarını bulmak için $l=L$ alınır, (4.16) ifadesi,

$$X_{G_S} = L - \frac{L^3}{126R^2} + \frac{L^5}{25272R^4} - \dots \quad (4.20)$$

ve (4.17) ifadesi,

$$Y_{G_S} = \frac{L^2}{12R} - \frac{L^4}{1620R^3} + \frac{L^6}{466560R^5} - \dots \quad (4.21)$$

olarak elde edilir.

4.1.1.2.5. Geçiş Eğrisi l'in Diğer Elemanlarının Hesabı

Şekil 4.2'den Geçiş Eğrisi l'in elemanları aşağıdaki gibi bulunur.

Daire merkezinin apsisi,

$$x_m = X_{G_S} - R \cdot \sin Z \quad (4.22)$$

ordinatı ise,

$$y_m = Y_{G_S} + R \cdot \cos Z \quad (4.23)$$

olarak bulunur.

Öteleme miktarı:

$$\Delta R = y_m - R$$

y_m nin (4.23)'teki ifadesi burada yerine konursa,

$$R = Y_{G_S} - R(1 - \cos Z) \quad (4.24)$$

olarak bulunur.



Kısa teğet,

$$T_k = \frac{Y_{GS}}{\sin Z} \quad (4.25)$$

Uzun teğet,

$$T_u = X_{GS} - Y_{GS} \cotg Z \quad (4.26)$$

olarak bulunur.

Kiriş uzunluğu, herhangi bir nokta için,

$$S = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.27)$$

Son nokta için,

$$S = \sqrt{x_{GS}^2 + y_{GS}^2} \quad (4.28)$$

olarak bulunur.

Polar açı, herhangi bir nokta için,

$$\sigma = \text{Arctg}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (4.29)$$

son nokta için,

$$\sigma = \text{Arctg}\left(\frac{Y_{GS}}{X_{GS}}\right) \quad (4.30)$$

olarak bulunur.

Yukarıda da görüldüğü gibi eğrinin, gerek x,y koordinatlarının ve gerekse diğer elemanlarının el ile hesaplanmasında uzun işlemler gerekmektedir. Ancak, günümüzde bilgisayarların yaygın bir biçimde kullanılmakta olduğu düşünülürse, basit ve kısa bir programla eğrinin tüm elemanları kolayca bulunur. Bu amaçla Fortran IV



dilinde hazırlanan bir bilgisayar programı Ek.1'de verilmiş ve akış diagramı Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Bu programda eğrinin L toplam uzunluğunu ve geçiş eğrisinin dairesel yay ile birleştiği noktadaki R yarıçapını vermekle bütün elemanlar hesaplanır.

4.1.1.2.6. Geçiş Eğrisi 1'in Temel Büyüklükleri

(Z,A,L,R) Arasındaki Bağlılıklar

(4.8) ve (4.9) bağıntıları dikkate alındığında Geçiş Eğrisi 1'in temel büyüklükleri olan A,L,R,Z arasında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$R = \frac{A^3}{L^2} = \frac{L}{3Z} \quad (4.31)$$

$$L = \left(\frac{A^3}{R}\right)^{1/2} = 3Z R \quad (4.32)$$

$$Z = \frac{L}{3R} = \frac{L^3}{3A^3} \quad (4.33)$$

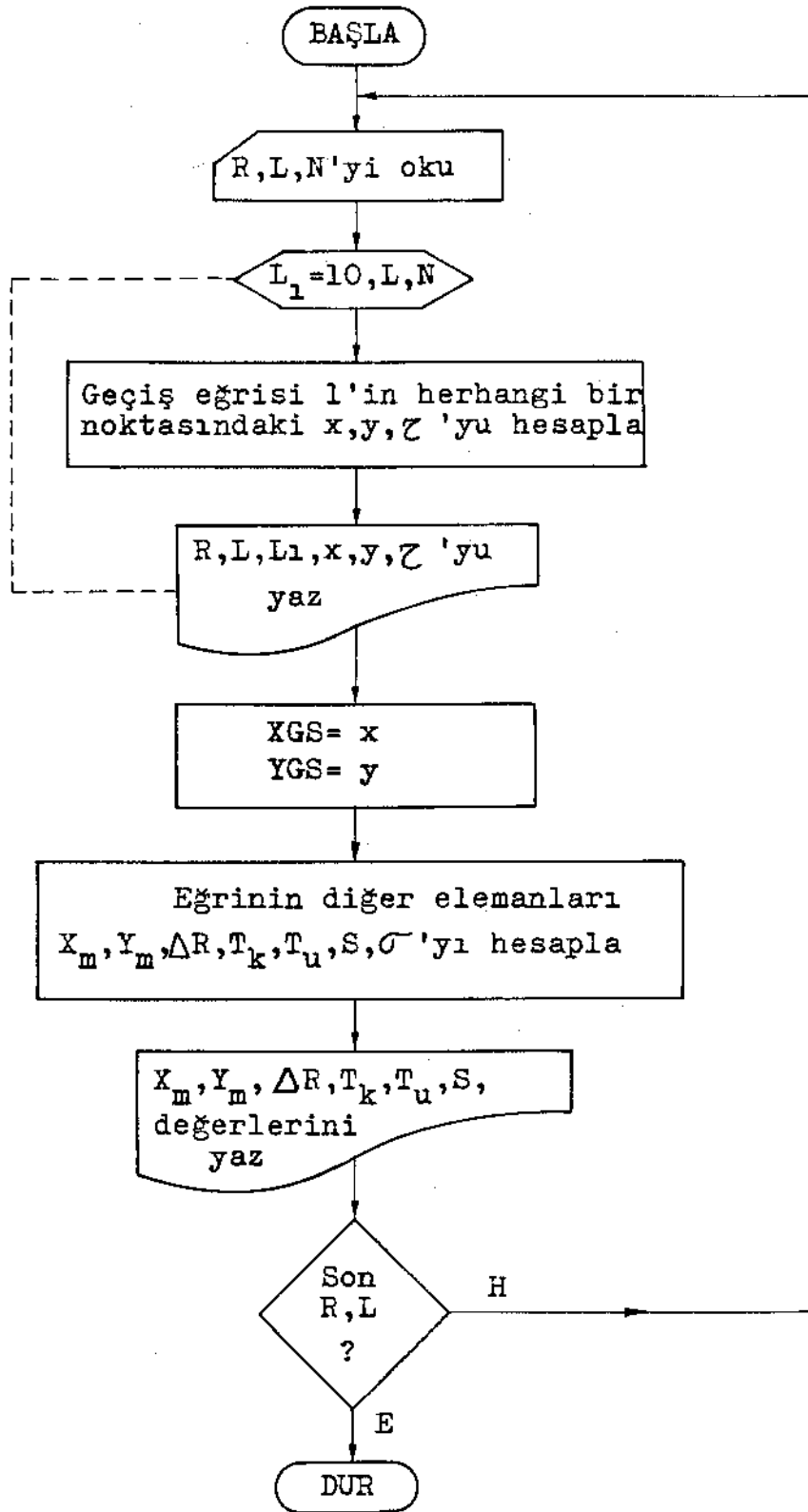
$$A = (R \cdot L^2)^{1/3} = \frac{L}{(3Z)^{1/3}} \quad (4.34)$$

4.1.1.2.7. Dever Değişimi

Eğrinin dever değişimi, eğrilik değişimine uygun olarak değişir. Geçiş eğrisi 1'in dever değişimi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

Geçiş eğrisinin başlangıç noktasında dever miktarı sıfırdır. Bu noktada yarıçap sonsuz olduğundan 1/R değeri sıfırdır. Eğrinin dairesel yay ile birleştiği

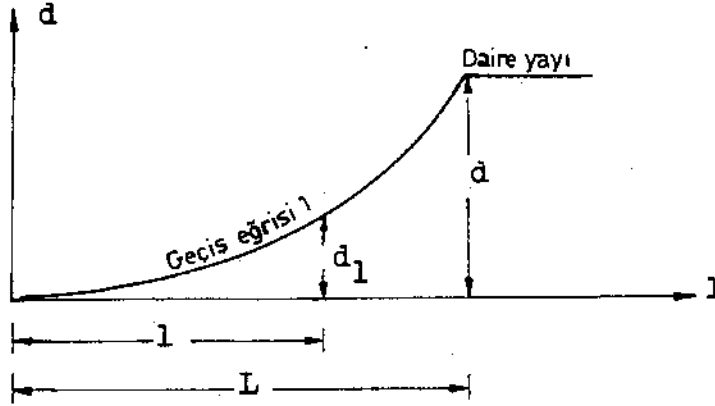




Şekil 4.3. Akış diagramı.



noktada ise deger maksimum değerini alır. Başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki değeri, l/R oranının değişimine bağlı olarak değişir.



Şekil 4.4. Geçiş Eğrisi l 'in deger değişimi.

Bu bilgiler ışığında, eğrinin herhangi bir noktasındaki deger miktarı,

$$d_1 = 0,00443 \frac{v^2}{R_1} \quad (4.35)$$

ifadesiyle bulunur. Bu ifadede l/R_1 herhangi bir noktadaki eğrilik ifadesidir. Bu durumda (4.35) ifadesi,

$$d_1 = 0,00443 \cdot v^2 \cdot k_1 \quad (4.36)$$

şekline dönüşür. k_1 nin (4.4)'deki ifadesi (4.36)'da yerine yazılırsa,

$$d_1 = 0,00443 \cdot v^2 \cdot \frac{l^2}{RL^2} \quad (4.37)$$

bulunur. Bu ifadede bulunan, $0,00443 \cdot \frac{v^2}{R}$ değeri, ifadesini (2.19)'da verdiğimiz d 'ye eşittir. Bu durumda,

$$d_1 = d \cdot \frac{l^2}{L^2} \quad (4.38)$$

elde edilir. Bu ifadeye dikkat edilirse, dever değişiminin l^2/L^2 oranına bağlı olarak değiştiği görülür.

4.1.1.2.8. Enine İvmenin Değişimi

Deverli bir kurbada enine ivmeyi veren bağıntı Kısım 2.3'de (2.19) bağıntısıyla,

$$a = \frac{v^2}{12,96R} - 0,0981.d$$

şeklinde verilmiştir. Bu ifade geçiş eğrisinin herhangi bir noktası için yazılırsa,

$$a_1 = \frac{v^2}{12,96} \cdot k - 0,0981.d_1 \quad (4.39)$$

olur. Bu ifadede, k'nın (4.4)'deki, d_1 'nin (4.38)'deki değerleri yerine yazılırsa,

$$a_1 = \frac{v^2}{12,96} \cdot \frac{l^2}{R.L^2} - 0,0981.d \cdot \frac{l^2}{L^2}$$

elde edilir. Bu ifade düzenlenirse, geçiş eğrisi l'in herhangi bir noktasındaki enine ivmeyi veren bağıntı,

$$a_1 = \left(\frac{v^2}{12,96R} - 0,0981.d \right) \cdot \frac{l^2}{L^2} \quad (4.40)$$

olarak bulunur. Burada dikkat edilirse, Geçiş Eğrisi l' de enine ivme l^2/L^2 oranına bağlı olarak değişmektedir.

4.1.2. Eğrilik Değişimi 2. Derece ve Aşağı Doğru

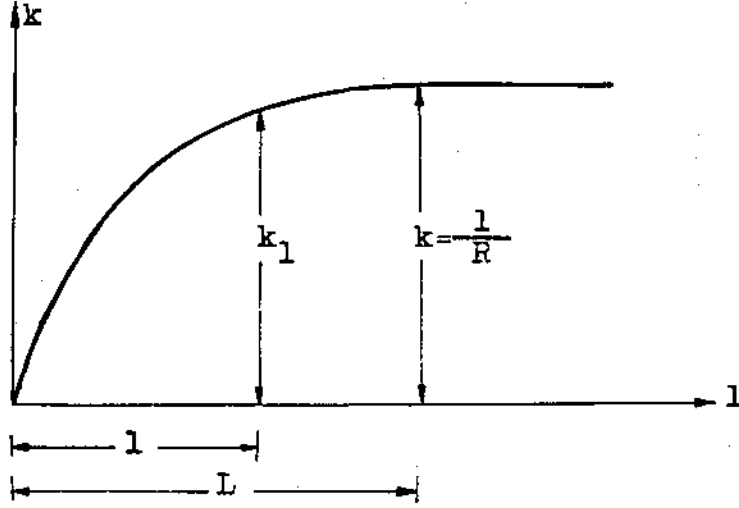
Konkav Olan Geçiş Eğrisinin Elde Edilmesi

Eğriliğin değişim fonksiyonu olarak,



$$l = Ak^2 + Bk + C \quad (4.41)$$

ifadesi şeklinde alınabilir Şekil 4.5.



Şekil 4.5. 2. Dereceden eğrilik değişimi (Aşağı doğru konkav).

Buradan da A, B ve C katsayıları sınır şartları yardımı ile bulunur.

1. Sınır Şartı:

$$k=0 \text{ için } l=0$$

2. Sınır Şartı:

$$k=0 \text{ için } l'=0$$

3. Sınır Şartı:

$$k = -\frac{1}{R} \text{ için } l=L$$

(4.41) ifadesinde, 1. 2. ve 3. sınır şartları kullanılırsa,

$$C=0, B=0, A=L.R^2 \text{ olarak bulunur.}$$

Bulunan bu katsayılar (4.41) ifadesinde yerlerine yazılırsa, eğrinin herhangi bir noktasındaki eğrilik ifadesi,



$$k = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{1}{L}} \quad (4.42)$$

olarak bulunur.

Eğriliği (4.42) ifadesiyle belirlenen eğri bundan böyle Geçiş Eğrisi 2 diye adlandırılacaktır.

4.1.2.1. Geçiş Eğrisi 2'nin Herhangi Bir Noktasındaki Sapma Açısı

Geçiş Eğrisi 2'nin herhangi bir noktasındaki sapma açısı,

$$\mathcal{Z} = \int_0^1 k \cdot dl$$

ifadesinde, k'nın (4.42)'deki değeri yerine konursa,

$$\mathcal{Z} = \int_0^1 \left(\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{L} \right) \cdot dl$$

veya

$$\mathcal{Z} = \int_0^1 \left(\frac{1}{R} \cdot \frac{1^{1/2}}{L^{1/2}} \right) \cdot dl$$

olur. Buradan,

$$\mathcal{Z} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1^{3/2}}{L^{1/2}} \quad (4.43)$$

olarak bulunur. Eğrinin dairesel yay ile birleştiği noktadaki sapma açısı $l=L$ alınarak,

$$\mathcal{Z} = \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{R} \quad (4.44)$$

olarak bulunur.



4.1.2.2. Geçiş Eğrisi 2'nin Elemanlarının Hesabı

Geçiş Eğrisi 2'nin elemanları, Geçiş Eğrisi 1'in, Şekil 4.2'de gösterilen elemanlarıyla aynıdır. Bu nedenle hesap şekli de değişmemektedir. Sadece, eğrinin x,y koordinatlarının hesabında kullanılan Fresnel integrallerinde, ζ nun (4.43)'deki ifadesi kullanılır. Bu durumda,

$$x = \int_0^1 \cos\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1^{3/2}}{L^{1/2}}\right) .dl \quad (4.45)$$

ve

$$y = \int_0^1 \sin\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1^{3/2}}{L^{1/2}}\right) .dl \quad (4.46)$$

olur. ζ nun (4.43)'deki ifadesinin karışık olması, (4.45) ve (4.46) ifadelerinin Mac Laurin serisine açıp, terimsel integrasyonu yoluyla el ile çözümünü oldukça karmaşık hale sokar. Ancak, bu integrallerin çözümü, sayısal integrasyon yöntemlerinden birisi kullanılarak kolayca çözülebilir.

4.1.2.3. Dever Değişimi

Geçiş eğrisi 2'nin dever değişimi Şekil 4.6'da görüldüğü gibidir. Dever değişimi, Kısım 4.1.1.2.7'de geçiş eğrisi 1 için izlenen yolla bulunur.

$$d_1 = 0,00443 \cdot \frac{v^2}{R_1}$$

ifadesinde $1/R_1$ yerine, k'nın (4.42)'deki değeri konursa,

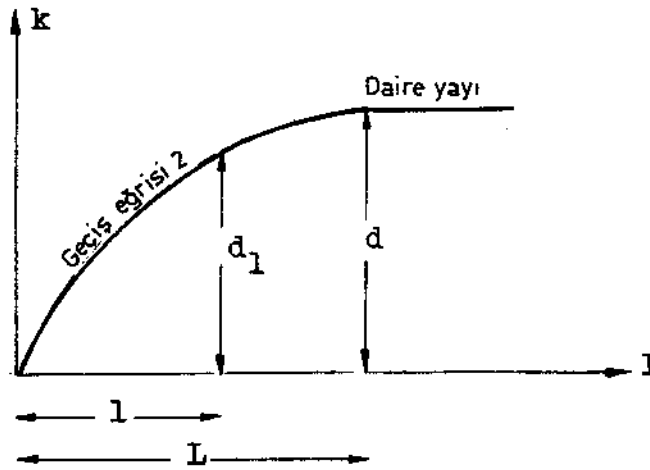


$$d_1 = 0,00443 \cdot v^2 \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{L}}$$

buradan da,

$$d_1 = d \cdot \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{L}} \quad (4.47)$$

olarak bulunur. Bu ifadeden de geçiş eğrisi 2'nin dever değişiminin $\sqrt{R}/\sqrt{L}$ oranına bağlı olarak değiştiği görülmür.



Şekil 4.6. Geçiş Eğrisi 2'nin dever değişimi.

4.1.2.4. Enine İvmenin Değişimi

Geçiş eğrisi 2'de enine ivmenin değişimini tespit etmek için, Kısım 4.1.1.2.8'deki yol izlenir. Sonuç olarak eğrinin herhangi bir noktasındaki enine ivmenin değeri,

$$a_1 = \left(\frac{v^2}{12,96 \cdot R} - 0,0981 \cdot d \right) \cdot \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{L}} \quad (4.48)$$

olarak bulunur. Dikkat edilirse, bu ifadeden geçiş eğrisi 2'de enine ivme, $\sqrt{1}/\sqrt{L}$ oranına bağlı olarak değişir.

4.2. Geçiş Eğrisi 1 ve Geçiş Eğrisi 2'nin Klotoid'le Karşılaştırılması

Karayollarında en çok kullanılan geçiş eğrilerinin klotoid, kübik parabol ve lemniskat olduğu daha önce belirtilmişti. Bunlardan kübik parabol, sapma açısının küçük olduğu (12° veya 15°) durumlarda kullanılır. Sapma açısı arttıkça eğri doğrusallaşmaya başlar ve yapılan ihmallerin değeri de büyür.

Ayrıca, eğrilik değişimi x/L oranına bağlı olarak değişmektedir. Lemniskatta ise eğrilik değişimi kiriş uzunluğuna bağlıdır ($k = -\frac{3S}{A^2}$). Klotoid'de eğrilik $1/L$ oranına bağlı olarak değişmektedir. Görüldüğü gibi söz konusu bu üç eğri içerisinde sadece klotoid geçiş eğrisinde eğrilik, eğri uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Geçiş eğrisi 1'de eğrilik $1^2/L^2$ oranına, geçiş eğrisi 2'de $\sqrt{1}/\sqrt{L}$ oranına bağlı olarak değişmektedir.

Halen, geçiş eğrileri içerisinde klotoidin popüler olarak kullanılmakta olması ve ideal geçiş eğrisi diye nitelendirilmesi, teklif edilecek geçiş eğrilerinin klotoidle karşılaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada ortaya çıkarılan geçiş eğrisi 1 ve geçiş eğrisi 2 klotoidle, eğrilik, sapma açısı, enine ivme, deyer ve öteleme miktarı yönleriyle karşılaştırılacak, karşılaştırma sonucunda ekonomik ve konforlu olan eğri teklif edilecektir.



4.2.1. Eğrilik Değişimi Yönünden Karşılaştırma

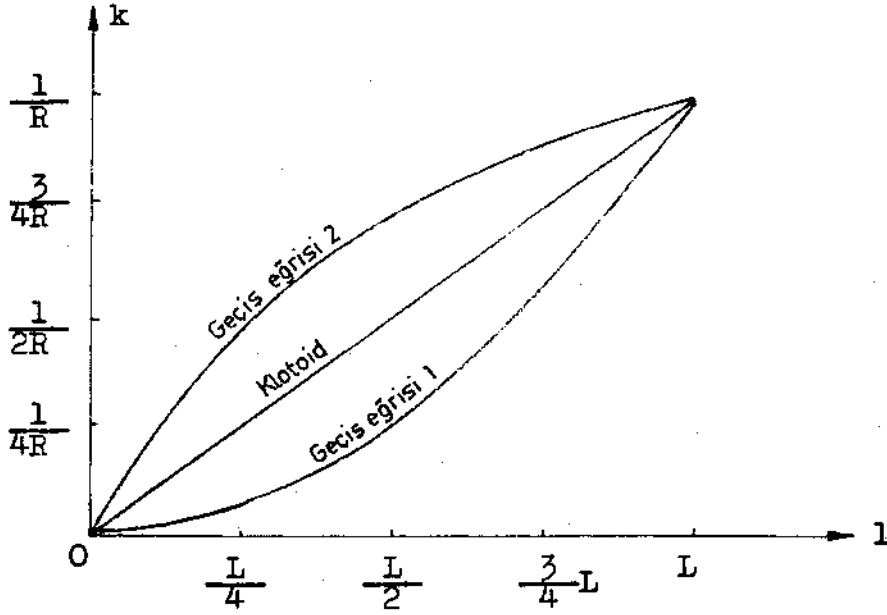
Geçiş eğrilerinin, başlangıç noktasında eğrilik sıfır, dairesel yay ile birleştikleri noktada ise $1/R$ değerindedir. Yani bütün geçiş eğrilerinde de başlangıç ve bitim noktalarındaki eğrilikleri eşittir. Ancak, bu noktalar arasında eğrilik değişimleri farklı olmaktadır. Eğri üzerindeki, belirli noktalarda bulunan eğrilik değerleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Eğrilik Değişimi Yönünden Karşılaştırma

Geçiş Eğrisi Adı	Klotoid	Geçiş Eğrisi 1	Geçiş Eğrisi 2
Eğrilik Formülü	$k = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{L}$	$k = \frac{1}{R} \cdot \frac{1^2}{L^2}$	$k = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{1}{L}}$
$l=0$	0	0	0
$l = \frac{L}{4}$	$\frac{1}{4R}$	$\frac{1}{16R}$	$\frac{1}{2R}$
$l = \frac{L}{2}$	$\frac{1}{2R}$	$\frac{1}{4R}$	$\frac{1}{\sqrt{2}R}$
$l = \frac{3}{4}L$	$\frac{3}{4} \cdot \frac{1}{R}$	$\frac{9}{16} \cdot \frac{1}{R}$	$\sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \frac{1}{R}$
$l=L$	$\frac{1}{R}$	$\frac{1}{R}$	$\frac{1}{R}$

Tabloda da görüldüğü gibi, toplam geçiş uzunluğunun $\frac{L}{4}$, $\frac{L}{2}$, $\frac{3}{4}L$ noktalarında, eğrilik değişimi, geçiş eğrisi 1'de klotoid nazaran daha az, geçiş eğrisi 2'de daha çok olmaktadır. Şekil 4.7'de eğrilik değişimleri açıkça görülmektedir.





Şekil 4.7. Karşılaştırılan eğrilerde eğrilik değişimleri.

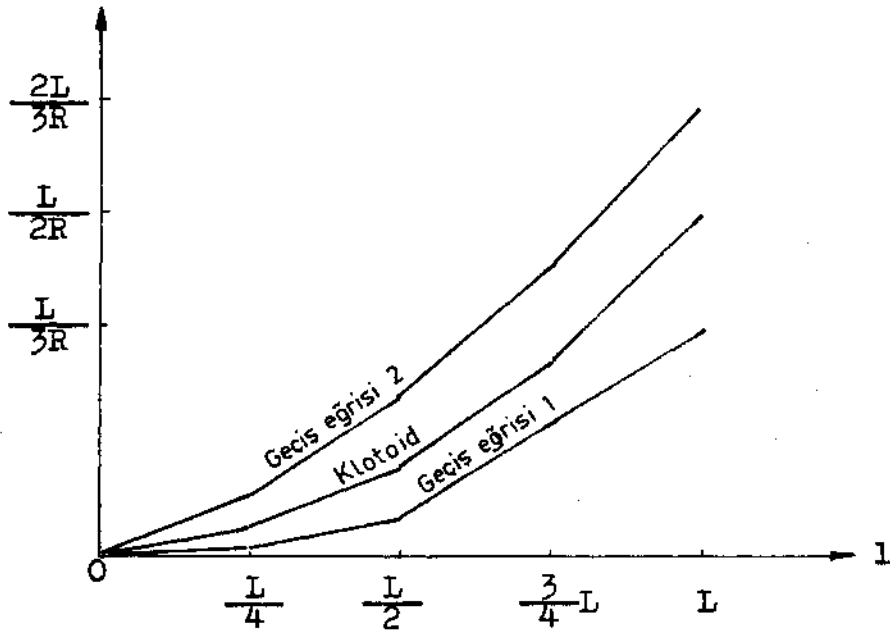
4.2.2. Sapma Açısı Yönünden Karşılaştırma

Eğrilerin başlangıcındaki sapma açıları her üç eğride de sıfır olmasına rağmen, son noktalarındaki sapma açıları farklı olmaktadır. Son noktadaki sapma açısı miktarı klotoidde $L/2R$, geçiş eğrisi 1'de $L/3R$ ve geçiş eğrisi 2'de ise $2L/3R$ değerindedir. Bu değerler radyan cinsinden olup istenildiğinde, grad veya dereceye dönüştürülmelidir. Eğri üzerindeki belirli noktadaki sapma açılarının değerleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablodan da görüldüğü gibi geçiş eğrisi 1 klotoidde daha az sapma göstermekte, geçiş eğrisi 2 ise daha fazla sapmaktadır. Eğrilerdeki sapma değişimleri daha iyi görülebilmesi için Şekil 4.8 üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Sapma Açısı Yönünden Karşılaştırma.

Geçiş Eğrisi Adı	Klotoid	Geçiş Eğrisi 1	Geçiş Eğrisi 2
Sapma Açısı Formülü	$\zeta = \frac{l^2}{2RL}$	$\zeta = \frac{l^3}{3RL^2}$	$\zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{l}{R} \cdot \frac{l^{3/2}}{L^{1/2}}$
$l=0$	0	0	0
$l=\frac{L}{4}$	$\frac{L}{32R}$	$\frac{L}{192R}$	$\frac{L}{12R}$
$l=\frac{L}{2}$	$\frac{L}{8R}$	$\frac{L}{24R}$	$\frac{L}{4,242R}$
$l=\frac{3}{4}L$	$\frac{9L}{32R}$	$\frac{27L}{192R}$	$\frac{L}{2,309R}$
$l=L$	$\frac{L}{2R}$	$\frac{L}{3R}$	$\frac{2L}{3R}$



Şekil 4.8. Sapma açısı değişimleri.

4.2.3. Enine İvmenin Değişimi Yönünden Karşılaştırma

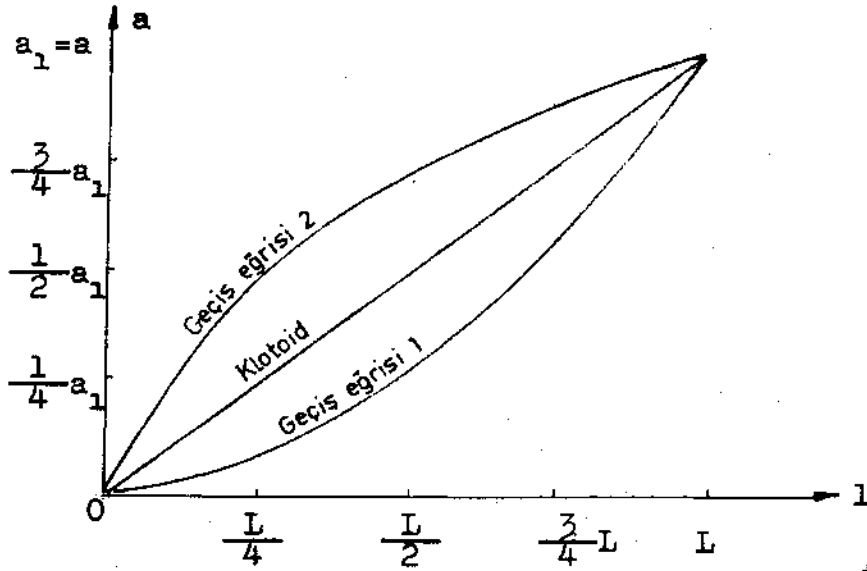
Enine ivmeyi oluşturan iki önemli faktör, hız ve eğriliktir. Eğri başlangıcından sonuna kadar seyir hızı değişmeyeceğine göre, burada enine ivmeyi etkiliyecek olan en önemli faktör eğrilik olmaktadır. Bu nedenle geçiş eğrilerinde enine ivme değişimleri, eğrilik değişimlerine uygun olarak değişir. Geçiş eğrilerinin belirli noktalarındaki enine ivme değerleri Tablo 4.3' de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Enine İvmenin Değişimi Yönünden Karşılaştırma.

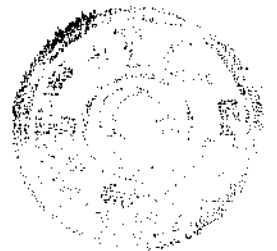
Geçiş Eğrisi Adı	Klotoid	Geçiş Eğrisi 1	Geçiş Eğrisi 2
İvme Formülü	$a=a_1 \cdot \frac{l}{L}$	$a=a_1 \cdot \frac{l^2}{L^2}$	$a=a_1 \cdot \sqrt{\frac{l}{L}}$
$l=0$	0	0	0
$l=\frac{L}{4}$	$\frac{a_1}{4}$	$\frac{a_1}{16}$	$\frac{a_1}{2}$
$l=\frac{L}{2}$	$\frac{a_1}{2}$	$\frac{a_1}{4}$	$\frac{a_1}{\sqrt{2}}$
$l=\frac{3}{4}L$	$\frac{3}{4}a_1$	$\frac{9}{16}a_1$	$\frac{\sqrt{3}}{2}a_1$
$l=L$	a_1	a_1	a_1

Not: $a_1 = \left(\frac{v^2}{12,96R} - 0,0981 \text{ d} \right)$ dir.

Tablo 4.3'de de görüldüğü gibi hangi geçiş eğrisi kullanılırsa kullanılsın enine ivmenin değeri, eğri başlangıcında sıfır, eğri bitiminde ise $(\frac{v^2}{12,96R} - 0,0981 \text{ d}) \text{ m/sn}^2$ değerinde olur. Burada önemli olan, bu enine ivme değerinin yavaş yavaş ortaya çıkması ve dolayısıyla seyahat esnasında aliymandan kurbaya geçişte yolcuların daha az rahatsız olmasını sağlamaktır. Bunu en iyi sağlayan eğrinin ise geçiş eğrisi 1 olduğu açıkça ortadadır. Bir yolcuyu ele aldığımızda bu yolcuya, eğrinin başlangıcından $\frac{L}{4}$ mesafesindeki bir noktada klotoid'de $\frac{a_1}{4} \text{ m/sn}^2$ lik yanıl ivme etki ederken, geçiş eğrisi 1'de bunun 1/4'ü kadar bir yanıl ivme etki etmektedir. Geçiş eğrisi 2'de ise klotoid'dekinin iki katı kadardır. Aynı şekilde $\frac{L}{2}$, $\frac{3}{4}L$ mesafesindeki noktalarda da geçiş eğrisi 1'de klotoid'den daha az yanıl ivmeye maruz kalmaktadır. Tablo 4.3'deki değerler Şekil 4.9'da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Enine ivmenin değişimi.



4.2.4. Dever Değişimi Yönünden Karşılaştırma

Eğrilerde dever değişimi sıfır ile d arasında eğrilik değişimlerine uygun olarak değişir. Söz konusu eğriler için, eğri üzerindeki belirli noktalarda gerekli olan dever miktarları Tablo 4.4'de hesaplanmıştır.

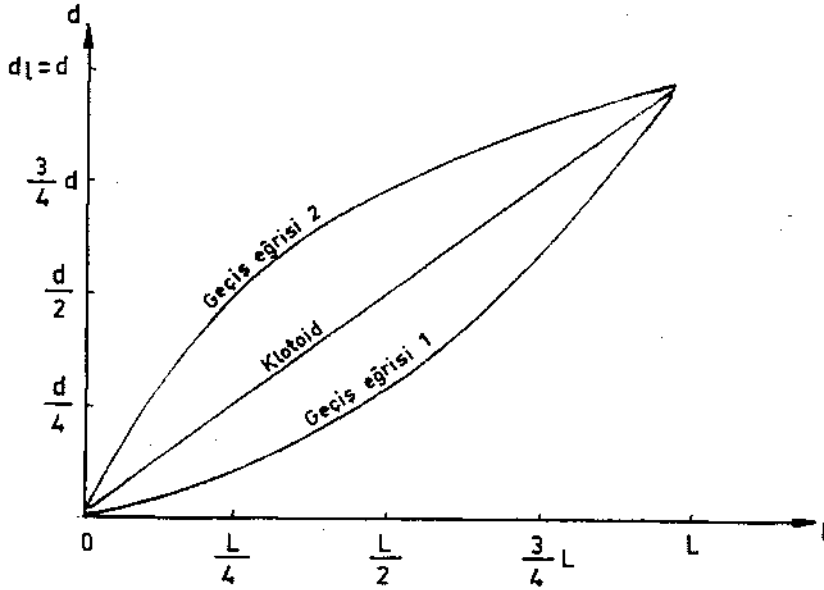
Tablo 4.4. Dever Değişimi Yönünden Karşılaştırma.

Geçiş Eğrisi Adı	Klotoid	Geçiş Eğrisi 1	Geçiş Eğrisi 2
Dever Formülü	$d_1 = d \cdot \frac{1}{L}$	$d_1 = d \cdot \frac{1^2}{L^2}$	$d_1 = d \cdot \sqrt{\frac{1}{L}}$
$l=0$	0	0	0
$l=\frac{L}{4}$	$\frac{d}{4}$	$\frac{d}{16}$	$\frac{d}{2}$
$l=\frac{L}{2}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{d}{4}$	$\frac{d}{\sqrt{2}}$
$l=\frac{3}{4}L$	$\frac{3}{4}d$	$\frac{9}{16}d$	$\sqrt{\frac{3}{4}}d$
$l=L$	d	d	d

Tablo 4.4'de bulunan dever miktarları Şekil 4.10'da grafik olarak gösterilmiştir.

Geçiş eğrisi 1'de dever değişimi lineer olmamakla birlikte, klotoidde nazaran daha az dever gerektirmiş olması geçiş eğrisi 1'i avantajlı kılmaktadır. Zira geçiş eğrilerinde dever uygulaması lineer olarak yapılmaktadır.





Şekil 4.10.Değer değişimi.

4.2.5. Öteleme Miktarı Yönünden Karşılaştırma

Bütün geçiş eğrilerinde öteleme miktarı (Rakordman payı) nı veren ifade,

$$\Delta R = Y_{G_S} - R(1 - \cos \zeta)$$

şeklindedir. Bu ifade içerisindeki, geçiş eğrisinin daireysel yay ile birleştiği noktadaki ordinatı Y_{G_S} ile, yine bu noktadaki teğetin eğim açısı ζ , her geçiş eğrisi için farklı değerdedir. Geçiş eğrisi 1, geçiş eğrisi 2 ve klotoid'in ilgili bu Y_{G_S} ve ζ değerleri yukarıdaki ifadeye yerlerine yazılıp, gerekli işlemler yapılırsa, Tablo 4.5'deki ifadeler elde edilir.

Tablo 4.5. Karşılaştırılan Eğrilerin Öteleme Miktarları.

Eğrinin Adı	Öteleme Miktarı
Klotoid	$\Delta R = \frac{L^2}{24R} - \frac{L^4}{2688R^3} + \frac{L^6}{506880R^5} - \dots (4.49)$
Geçiş Eğrisi 1	$\Delta R = \frac{L^2}{36R} - \frac{L^4}{9720R^3} + \frac{L^6}{4199040R^5} - \dots (4.50)$
Geçiş Eğrisi 2	$\Delta R = \frac{L^2}{9R} - \frac{L^4}{243R^3} + \frac{L^6}{16402,5R^5} - \dots (4.51)$

Tablo 4.5 incelendiğinde en az öteleme miktarı veren eğrinin, geçiş eğrisi 1 olduğu görülür. Öteleme miktarı mevcut güzergâhların iyileştirilmesi işleminde ekonomik açıdan büyük önem arzeder. Türkiye'de son yıllarda otoyol yapımına hız verilmiştir. Ancak otoyol maliyetinin çok yüksek olması, belirli güzergâhların dışında otoyol yapımının çok zor olduğu anlaşılmaktadır. Fakat, gerek hızlı trafik artışı ve gerekse taşıt teknolojisindeki hızlı gelişmeler, otoyol yapılamayacak güzergâhlarda yol geometrik standartlarının iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Mevcut güzergâhlardaki kurbalarda dairesel yay kullanıldığından, bu kurbalara yerleştirilecek geçiş eğrilerinin öteleme miktarı ekonomik açıdan önemli olacaktır. Bu nedenle geçiş eğrisi 1'de öteleme miktarının az olması, bu eğriyi mevcut geçiş eğrilerinden daha avantajlı kılmaktadır.



4.2.6. Kurba Uzunluğu Yönünden Karşılaştırma

Hangi geçiş eğrisi uygulanırsa uygulansın geçiş uzunluğu L değişmemektedir. Bu durumda kurba uzunluğunu etkiliyecek olan dairesel yay uzunluğudur. Dairesel yay uzunluğu,

$$b = \frac{R \cdot \pi \cdot \alpha^{\circ}}{200} \quad (4.52)$$

ifadesiyle belirlidir [3]. Burada;

R = Dairenin yarıçapı (m)

α = Daire yayını gören merkez açı (grad)

b = Geçiş eğrisi arasındaki yay uzunluğu (m)

dir. Daire yayını gören merkez açı,

$$\alpha = \Delta - 2 \cdot \zeta_{G_S} \quad (4.53)$$

dir [3]. Burada;

Δ = Some noktasındaki kesişme açısı (grad)

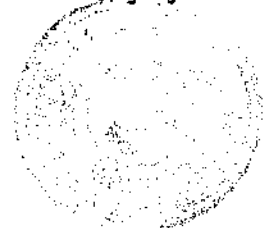
ζ_{G_S} = Geçiş eğrisinin son noktasındaki sapma açısı (grad).

Böylece kurba uzunluğu,

$$L_T = 2L + b \quad (4.54)$$

olur.

Bir yatay kurbada, klotoid, geçiş eğrisi 1 ve geçiş eğrisi 2 kullanılması durumlarında toplam kurba uzunluğunun ne kadar olacağı Tablo 4.6'da gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi toplam kurba uzunluğu bakımından önerilen geçiş eğrisi 1, klotoid ve Geçiş

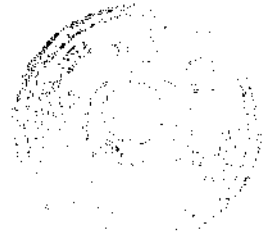


Eğrisi 2'ye göre daha fazla kurba uzunluğu gerektirmektedir.

Tablo 4.6. Toplam Kurba Uzunluğu.

	$Z_{G_S}^E$	α^E	b(m)	$L_T=2L+b$ (m)
Klotoid	$\frac{L}{2R} \cdot \rho$	$\Delta - \frac{L}{R} \cdot \rho$	$\frac{R \cdot \pi \Delta}{200} - 0,318L$	$\frac{R \cdot \pi \Delta}{200} + 1,682L$
Geçiş Eğrisi 1	$\frac{L}{3R} \cdot \rho$	$\Delta - \frac{2L}{3R} \cdot \rho$	$\frac{R \cdot \pi \Delta}{200} - 0,212L$	$\frac{R \cdot \pi \Delta}{200} + 1,788L$
Geçiş Eğrisi 2	$\frac{2L}{3R} \cdot \rho$	$\Delta - \frac{4L}{3R} \cdot \rho$	$\frac{R \cdot \pi \Delta}{200} - 0,424L$	$\frac{R \cdot \pi \Delta}{200} + 1,576L$

Not: $\rho = 63,6620$ grat'dır.

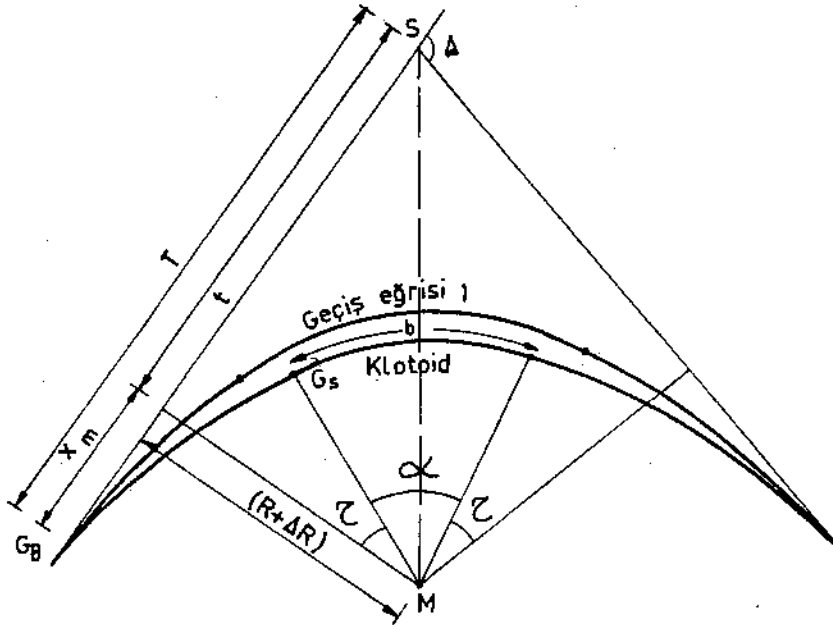


5. SAYISAL ÖRNEKLER

5.1. Giriş

Bu bölümde, yatay bir kurba ele alınarak, bu yatay kurba üzerinde, klotoid ve teklif edilen Geçiş Eğrisi 1'in nasıl bir konum alacakları, sayısal örneklerle gösterilmiştir. Bu sayısal örneklerden bir tanesi açıkça çözülüp diğerleri tablo halinde verilmiştir.

ÖRNEK-I: $\Delta=20$ grad, $R=1000$ m, $L=100$ m bilindiğine göre yatay kurbanın elemanlarını hesaplayınız.



Şekil 5.1. Geçiş eğrilerinin kurba içindeki konumları.

Klotoid elemanları:

a) Sapma açısı Z nun değeri:

$$\tau = \frac{L}{2R} = \frac{100}{2 \cdot 1000} = 0,05^{\text{rad.}}$$

veya

$$\tau = \frac{L}{2R} \cdot 63,6620 = 3,1831^{\circ}$$

b) Dairesel yay uzunluğu (b):

$$\alpha = \Delta - 2\tau$$

$$\alpha = 20 - 2 \cdot 3,1831 = 13,6338^{\circ}$$

$$b = \frac{R \cdot \pi \cdot \alpha^{\circ}}{200} = \frac{1000 \cdot \pi \cdot 13,6338}{200} = 214,16 \text{ m}$$

c) Öteleme miktarı ΔR :

$$R = \frac{L^2}{24R} - \frac{L^4}{2688R^3} + \frac{L^6}{506880R^5}$$

$$R = \frac{100^2}{24 \cdot 1000} - \frac{100^4}{2688 \cdot 1000^3} + \frac{100^6}{506880 \cdot 1000^5} = 0,42 \text{ m}$$

d) Geçiş eğrisinin daireysel yay ile birleştiği

(G_S) noktasının koordinatları:

$$X_{G_S} = L - \frac{L^3}{40R^2} + \frac{L^5}{3456R^4}$$

$$X_{G_S} = 100 - \frac{100^3}{40 \cdot 1000^2} + \frac{100^5}{3456 \cdot 1000^4} = 99,98 \text{ m}$$

$$Y_{G_S} = \frac{L^2}{6R} - \frac{L^4}{336R^3} + \frac{L^6}{42240R^5}$$

$$Y_{G_S} = \frac{100^2}{6 \cdot 1000} - \frac{100^4}{336 \cdot 1000^3} + \frac{100^6}{42240 \cdot 1000^5} = 1,67 \text{ m}$$



e) Daire merkezinin koordinatları x_m, y_m :

$$x_m = X_{G_S} - R \cdot \sin \zeta$$

$$x_m = 99,98 - 1000 \cdot \sin(3,1831)$$

$$x_m = 50,00 \text{ m}$$

$$y_m = Y_{G_S} + R \cdot \cos \zeta$$

$$y_m = 1,67 + 1000 \cdot \cos(3,1831)$$

$$y_m = 1000,42 \text{ m}$$

f) Geçiş eğrisi başlangıcından some noktasına kadar olan $G_B S$ uzunluğu:

$$t = (R + \Delta R) \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2}$$

$$t = (1000 + 0,42) \cdot \operatorname{tg} \frac{20}{2} = 158,45 \text{ m}$$

$$G_B S = T = t + x_m$$

$$T = 158,45 + 50,00 = 208,45 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{g) Toplam kurb uzunluğu } L_k &= 2 \cdot L + b = 2 \cdot 100 + 214,16 = \\ &= 414,16 \text{ m.} \end{aligned}$$

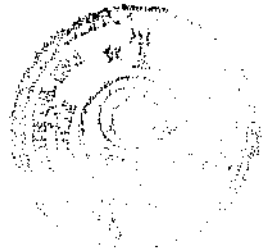
Geçiş Eğrisi l'in Elemanları :

a) Sapma açısı ζ nun değeri:

$$\zeta = \frac{L}{3R} = \frac{100}{3 \cdot 1000} = 0,033^{\text{rad}}$$

veya

$$\zeta = \frac{L}{3R} \cdot 63,6620 = 2,10^{\circ}$$



b) Dairesel yay uzunluğu b:

$$\alpha = \Delta - 2\zeta$$

$$\alpha = 20 - 2 \cdot 2,10 = 15,80^g$$

$$b = \frac{R \cdot \pi \cdot \alpha^g}{200} = \frac{1000 \cdot \pi \cdot 15,80}{200} = 248,19 \text{ m}$$

c) Öteleme miktarı ΔR :

$$\Delta R = \frac{L^2}{36R} - \frac{L^4}{9720R^3} + \frac{L^6}{4199040R^5}$$

$$\Delta R = \frac{100^2}{36 \cdot 1000} - \frac{100^4}{9720 \cdot 1000^3} + \frac{100^6}{4199040 \cdot 1000^5}$$

$$= 0,28 \text{ m}$$

d) Geçiş eğrisinin daireesel yay ile birleştiği
(G_S) noktasının koordinatları:

$$X_{G_S} = L - \frac{L^3}{126R^2} + \frac{L^5}{25272R^4}$$

$$X_{G_S} = 99,99 \text{ m}$$

$$Y_{G_S} = \frac{L^2}{12R} - \frac{L^4}{1620R^3} + \frac{L^6}{466560R^5}$$

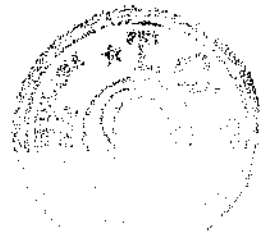
$$Y_{G_S} = 0,83 \text{ m}$$

e) Daire merkezinin koordinatları:

$$x_m = X_{G_S} - R \cdot \sin \zeta$$

$$= 99,99 - 1000 \cdot \sin(2,10)$$

$$= 67,00 \text{ m}$$



$$\begin{aligned}
 y_m &= Y_{GS} + R \cdot \cos \zeta \\
 &= 0,83 + 1000 \cdot \cos(2,10) \\
 &= 1000,29 \text{ m}
 \end{aligned}$$

f) Geçiş eğrisi başlangıcından some noktasına kadar olan $G_B S$ uzunluğu:

$$t = (R + \Delta R) \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2} = 158,43 \text{ m}$$

$$G_B S = T = t + x_m$$

$$T = 158,43 + 67,00$$

$$T = 225,43 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 \text{g) Toplam kurb uzunluğu } L_k &= 2 \cdot L + b = 200 + 248,19 \\
 &= 448,19 \text{ m}
 \end{aligned}$$

ÖRNEK-II: Δ , R ve L'nin değişik değerleri için, Örnek 1' deki hesap şekli izlenerek bilgisayarla bulunan değerler aşağıda verilmiştir.

KLOTOID EĞRİSİ

		TO	E	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LK
$\Delta = 25$	R=1000 L=100	3.18	292.70	0.42	93.96	1.27	50.00	1000.42	196.91	248.91	432.70
	R=800 L=116	4.62	198.16	0.70	115.94	2.80	57.39	600.70	159.13	217.12	430.16
	R=600 L=155	6.22	80.62	1.67	154.74	6.67	77.40	601.67	119.35	196.60	390.62
	R=1000 L=54	1.72	338.70	0.12	54.00	0.45	27.00	1036.12	198.91	225.91	446.70
	R=500 L=108	6.66	68.35	0.57	127.67	5.28	55.98	500.97	99.46	153.44	304.35
	R=400 L=134	10.66	23.03	1.27	133.62	7.47	66.34	401.67	78.56	146.50	281.08

GEÇİŞ EĞRİSİ: 1

		TO	E	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LK
$\Delta = 25$	R=1000 L=100	3.18	326.03	0.28	93.96	0.83	66.66	1003.26	196.97	255.63	526.03
	R=800 L=116	3.08	236.63	0.47	115.98	1.40	77.30	600.47	159.22	236.53	460.63
	R=600 L=155	5.49	132.29	1.11	154.92	3.34	103.32	601.11	119.57	222.68	442.29
	R=1000 L=54	1.19	356.70	0.03	54.00	0.24	36.00	1000.06	198.93	234.93	464.70
	R=500 L=108	4.55	124.05	0.63	107.86	1.94	71.99	500.63	99.59	171.58	340.35
	R=400 L=134	7.11	67.75	1.25	133.66	3.74	69.31	401.25	78.61	163.12	335.75



KLOTOLD EGRISI

		TO	E	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LT	
$\Delta = 35$	R=1000	L=100	3.18	449.78	0.42	99.99	1.67	50.00	1000.42	262.02	332.02	645.78
	R=800	L=116	4.62	323.82	0.70	115.94	2.60	57.93	800.70	225.62	263.61	555.82
	R=600	L=155	8.22	174.87	1.67	154.74	6.67	77.46	601.67	169.22	246.67	484.67
	R=1000	L=54	1.72	495.76	0.12	54.00	0.43	27.03	1000.12	262.03	303.03	603.76
	R=500	L=108	6.08	166.85	0.97	107.87	3.88	53.98	500.97	141.01	194.99	362.85
	R=400	L=134	10.66	85.91	1.87	133.62	7.47	66.94	401.87	112.81	179.75	353.91

GECIS EGRISI 1

		TO	B	DR	XGS	YGS	KM	YM	T	TU	LK	
A = 35	R=1000	L=100	2.12	483.11	0.28	99.99	0.63	66.66	1000.26	282.11	348.77	683.11
	R=800	L=116	3.08	362.49	0.47	115.96	1.40	77.33	800.47	225.76	303.06	594.49
	R=600	L=155	5.48	226.53	1.11	154.92	3.34	103.32	601.11	169.53	272.65	536.53
	R=1000	L=54	1.15	513.78	0.08	54.00	0.24	36.00	1000.06	282.05	318.05	621.76
	R=500	L=108	4.58	202.89	0.65	107.96	1.84	71.93	500.65	141.20	213.19	416.89
	R=400	L=134	7.11	130.56	1.25	133.68	3.74	89.31	401.25	113.16	202.47	398.58

KLOTOLD EGRISI

		TO	B	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LK	
$\Delta = 40$	R=1000	L=100	3.18	528.32	0.42	99.98	1.67	50.00	1000.42	324.92	374.92	728.32
	R=800	L=116	4.62	386.65	0.70	115.94	2.60	57.93	800.70	259.94	317.93	618.65
	R=600	L=155	8.22	221.99	1.67	154.74	6.67	77.46	601.67	194.95	272.41	531.89
	R=1000	L=54	1.72	574.32	0.12	54.00	0.49	27.00	1000.12	324.92	351.92	682.32
	R=500	L=108	6.88	206.16	0.97	107.87	3.68	53.98	500.97	162.46	216.44	422.16
	R=400	L=134	10.66	117.33	1.87	133.62	7.47	66.94	401.87	129.97	196.90	385.33

GECIS EGRISI 1

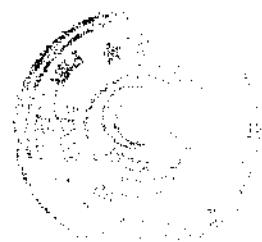
		TD	B	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LK	
$\Delta = 40$	R=1000	L=100	2.12	561.65	0.28	99.99	0.63	66.66	1000.28	325.01	381.67	761.65
	R=800	L=116	3.08	425.32	0.47	115.98	1.40	77.33	800.47	260.03	337.42	657.32
	R=600	L=155	5.48	273.66	1.11	154.92	3.34	103.32	601.11	195.31	288.63	583.66
	R=1000	L=54	1.15	532.32	0.08	54.00	0.24	36.00	1000.08	324.95	360.95	700.32
	R=500	L=108	4.58	242.16	0.65	107.96	1.84	71.93	500.65	162.67	234.66	456.16
	R=400	L=134	7.11	161.55	1.25	133.68	3.74	89.31	401.25	130.37	219.66	428.89

KLOTOLD EGRISI

			TD	B	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LK
Δ=25	R=1000	L=28	0.83	304.70	0.03	28.00	0.13	14.00	1000.03	198.91	212.91	420.70
	R=500	L=55	3.50	141.35	0.25	54.98	1.01	27.50	500.25	99.46	126.95	251.35
	R=300	L=92	9.70	25.81	1.17	91.78	4.68	45.96	301.17	59.67	105.64	209.81

GECIS EGRISI 1

			TO	B	DR	XGS	YGS	XM	YM	T	TU	LK
$\Delta=25$	R=1000	L=28	0.59	374.03	0.02	28.00	0.07	18.67	1000.02	198.92	217.58	430.03
	R=500	L=55	2.33	159.62	0.17	54.99	0.50	36.67	500.17	99.43	136.16	263.68
	R=300	L=92	6.51	56.48	0.70	91.93	2.25	61.32	302.78	59.63	121.15	240.48



6. SONUÇ

Karayolu taşıtlarının aliymandan kurbaya giriş ve kurbadan aliymana geçiş hareketleri sırasında merkezkaç kuvvetinin ani olarak ortaya çıkmasını önlemek, dolayısıyla da yolcuların daha az rahatsız olmasını sağlamak amacıyla araştırılıp teklif edilen Geçiş Eğrisi 1 diye adlandırdığımız geçiş eğrisinin, bugüne kadar popüler olarak kullanılan ve ideal geçiş eğrisi olarak nitelendirilen klotoid geçiş eğrisinden, dinamik ve ekonomik yönden üstünlükleri olduğu gösterilmiştir.

Önerilen geçiş eğrisinde, öteleme miktarının diğer geçiş eğrilerine oranla daha az olması, mevcut güzergâhların geometrik standartlarının iyileştirilmesi işleminde ekonomik bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, yeni inşa edilecek güzergâhlarda kurba uzunluğunun klotoid'e göre daha uzun olması ekonomik bakımdan bir dezavantajdır. Konfor ile ekonominin karşılaştırıldığı durumlarda, tercihin konfor lehinde kullanılması durumunda bu dezavantaj da ortadan kalkacaktır.

Türkiye gibi gelişmekte olan bir ülkenin mevcut yollarının hepsini, hızla artan trafik ve hızlı gelişen taşıt teknolojisine ayak uyduracak biçimde otoyol yapması mümkün değildir. Bu nedenle otoyol yapılan ve yapılması düşünülen belirli güzergâhlar dışındaki yol güzergâhlarının geometrik standartlarının iyileştirilmesi işleminde, daha az mali yük getirecek olan Geçiş Eğrisi 1'in kullanılması iyi bir çözüm olacaktır.



EKLER

EK-1

```

C .....
C ...   GEÇİS EGRİSİ 1'İN ELEMANLARINI HESAPLAYAN PROGRAM   ...
C .....
C ...   R       : DAİRE YARIÇAPI (M)                       ...
C ...   L       : GEÇİS EGRİSİ UZUNLUĞU (M)               ...
C ...   L1      : BAŞLANGIÇTAN HERHANGİBİR NOKTAYA OLAN EĞRİ ...
C ...           UZUNLUĞU (M)                               ...
C ...   X       : HERHANGİBİR NOKTANIN APSİSİ (M)          ...
C ...   Y       : HERHANGİBİR NOKTANIN ORDİNATI (M)        ...
C ...   TO      : HERHANGİBİR NOKTADAKİ SAPMA AÇISI (RAD)  ...
C ...   XGS     : GEÇİS EGRİSİ SON NOKTA APSİSİ (M)       ...
C ...   YGS     : GEÇİS EGRİSİ SON NOKTA ORDİNATI (M)     ...
C ...   XM      : DAİRE MERKEZİ APSİSİ (M)                ...
C ...   YM      : DAİRE MERKEZİ ORDİNATI (M)               ...
C ...   DELTAR  : İSTELEME MİKTARI (M)                    ...
C ...   TK      : KISA TEGET (M)                           ...
C ...   TU      : UZUN TEGET (M)                           ...
C ...   S,SIGMA : KUTUPSAL KOORDİNATLAR                   ...
C .....
55 READ(1,10,END=99) R,L,N
   WRITE(3,25)
   DO 20 L1=10,L,N
     TO=L1**3/(3*R*L**2)
     X=L1*L1**7/(126*R**2*L**4)+L1**13/(25272*R**4*L**8)
     Y=L1**4/(12*R*L**2)+L1**10/(1520*R**3*L**6)+L1**16/(466560*R**5
     *L**10)
     WRITE(3,30) L1,TO,X,Y
20 CONTINUE
   XGS=X
   YGS=Y
   XM=XGS*R*SIN(TO)
   YM=YGS*R*COS(TO)
   DELTAR=YM/R
   TK=YGS/SIN(TO)
   TU=XGS*YGS*COTAN(TO)
   S=SQRT(XGS**2+YGS**2)
   SIGMA=ATAN(YGS/XGS)
   WRITE(3,35)
   WRITE(3,40) XM,YM,DELTAR,TK,TU,S,SIGMA,TO
C
10  FORMAT(F5.1,2I4)
25  FORMAT(3X,'L1',5X,'TO',8X,'X',8X,'Y',/,33(' '))
30  FORMAT(I4,3F9.2)
35  FORMAT(6X,'XM',7X,'YM',5X,'DELTAR',6X,'TK',7X,'TU',7X,'S',5X,
   *SIGMA',5X,'TO',/,75(' '))
40  FORMAT(8F9.2)
   GOTO 55
99  STOP
   END

```



7. KAYNAKLAR

1. O'Flaherty, C.A., "Highways and Traffic", Vol.1, Edward Arnold, 1975, s.217-260.
2. Beer, F.P., Johnston, E.R., (Çevirenler: Tameroglu, S.S., Özbek, T.), "Dinamik", Cilt II, Uç Er, 1979, s.46-57.
3. Tüdeş, T., "Aplikasyon Özel Ölçmeler", 2.Baskı, K.T.Ü., 1985.
4. Umar, F., Yayla, N., "Yol İnşaatı", İ.T.Ü., 1981.
5. Yıldırım, B., "Yol İnşaatı", F.Ü., 1982.
6. Süttaş, İ., Öztaş, G., "Karayolu İnşaatında Uygulama ve Projelendirme", İstanbul, 1986.
7. Ashworth, A., "Highway Engineering", Heinemann Educational Books Ltd. London, 1969, s.53-103.
8. "Büro ve Arazi İşleri İçin Tip ve Tablolar", K.G.M. No.134.
9. Bıçakçı, O., "Demiryollarında Yeni Bir Birleştirme Eğrisinin Araştırılması", Doktora Tezi, İ.T.Ü., 1977.
10. Kasper, H., Schürba, W., Lorenz, H., (Çev.: Apak, D.), "Güzergâh Elemanı Olarak Klotoid", K.G.M., No.222, 1978.
11. G.J.Thornton-Smith, "A New Transition Curve", Empire Survey Review, No.117, 1960, s.303-316.
12. G.J.Thornton-Smith, "A Family of Transition Curves", Empire Survey Review, No.120, 1961, s.79-84.
13. Kahler, D., "Ein Beitrag zur Berechnung der Kartesischen Koordinaten von Klotoidenkleinpunkten", ZfV. No.5, 1980, s.232-240.
14. Hinüber, J., Herrmann, R., "Berechnung Klotoidenparalleler Übergangsbögen Eine Lösung für die Praxis", AVN., No.2, 1981, s.73-79.

15. ShnÄdelbach,K., "Zur Berechnung von Schnittpunkten mit der Klothoide", ZfV., No.3, 1983, s.112-118.
16. Schuhr,P., "Application of the Romberg Equation for the Calculation of Transition Curves from Diagrams of Curves", Rail International-January, 1986, s.17-21.
17. Süray,S., "Umumi Matematik", İstanbul, 1962.
18. Karadeniz,A., "Yüksek Matematik Problemleri", İstanbul, 1972.
19. Spiegel,M.R., (Çevirenler: Demiray,H., Sümer,M.), "Çözümlü Matematik Problemleri", İstanbul, 1975.

ÖZGEÇMİŞİ

Necati KULOĞLU, 1953 yılında Harput'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 1973 yılında E.D.M.M.A. girdi ve 1977 yılında İnş.Müh. olarak bitirdi. Mayıs 1979'a kadar Karayolları 8. Bölge Müdürlüğünde Köp.Kont.Müh. olarak çalıştı. Askerliğini Aralık 1980'de Hv.K.K.İs.İnş.D.Bşk.'da tamamladı. Aynı tarihte E.D.M.M.A.'de lisans üstü öğrenimine başladı. Mayıs 1981'de aynı okula asistan olarak girdi. Ocak 1983 yılında Yük.Müh. oldu.

KULOĞLU, halen F.Ü.Müh.Fak. İnş.Müh.Bölümünde Öğretim görevlisi olarak çalışmakta olup, evli ve iki çocukludur.