

66387

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEÇKİ TASARIMINDA YENİ EĞRİ YAKLAŞIMLARI

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Ergin TARI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Ağustos 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan BAYKAL 08.09.97

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Güngör EVREN 08.09.97

Prof. Dr. Ergun GEDİZLİOĞLU 8/9/97

Prof. Dr. Turgut UZEL 8.9.1997

Prof. Dr. Semih DEDEOĞLU 9/9/97

AĞUSTOS 1997

ÖNSÖZ

Geçki tasarımı da bilgisayarların da devreye girmesinden sonra yol-araç dinamiği özellikleri daha üstün olan geçiş eğrisi araştırmaları yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, önerilen iki yeni geçiş eğrisinin yol-araç dinamiği özellikleri açısından varolan geçiş eğrileri ile karşılaştırılmaları sonucunda daha üstün oldukları kanıtlanmaktadır. İki yeni geçiş eğrisinin ortaya konulması yanında, bu çalışmanın geçki tasarımları için bilgisayar olanaklarından yararlanarak yeni geçiş eğrilerinin tasarlanabilmesi konusunda yeni bir ufuk açacağını umut ediyorum.

Çalışmamın başından sonuna kadar her konuda bana bilgisi ve özverisi ile destek olan hocam Sayın Prof. Dr. Orhan Baykal'a teşekkür ederim. Ayrıca üniversite hayatımın ilk yıllarımdan başlayarak bana her alanda yol göstermiş, ne yazık ki zamansız bir şekilde aramızdan ayrılmış olan hocam Prof. Dr. Olcay Öztan'ı en derin saygılarımla anıyorum.

Destekleri ile yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma ve Almanca kaynaklardan yararlanmam sırasında göstermiş oldukları yardımlarından dolayı bir kez daha hocam Sayın Prof. Dr. Orhan Baykal'a ve Sayın Y.Müh. Cengizhan İpbüker'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, doktora tezi projesine verdikleri destekten dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü 17. Bölge Müdürlüğüne, Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş. Teknik Bölüm Müdürlüğüne ve Erk Harita Mühendislik ve Danışmanlık Ltd. Şti. yetkililerine teşekkür ederim.

Bu çalışmam sırasında manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim annem, babam ve kardeşlerime, büyük desteklerini hep yanımda hissettiğim sevgili eşim ve ailesi ile ne yazık ki yeterli ilgiyi gösteremediğim sevgili oğlum Doğa'ya minnet borçluyum.

Mayıs 1997

Ergin TARI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
ÖZET	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. YANAL SADEME.....	4
BÖLÜM 3. BİLİNER GEÇİŞ EĞRİLERİNDE EĞRİLİK VE DEVER FONKSİYONLARI	8
3.1. Klotoit Bileşik Eğrisi.....	9
3.1.1. Klotoit bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları.....	9
3.2. Bloss Bileşik Eğrisi.....	12
3.2.1. Bloss bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları	12
3.3. Sinüzoid Bileşik Eğrisi.....	14
3.3.1. Sinüzoid bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları.....	14
BÖLÜM 4. YENİ GEÇİŞ EĞRİSİ ÖNERİLERİ	18
4.1. Eğri I Bileşik Eğrisi	18
4.1.1. Eğri I bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları.....	18
4.1.2. Eğri I bileşik eğrisinin aplikasyon elemanlarının hesabına ilişkin formülasyon	21
4.2. Eğri II	24
4.2.1. Eğri II'nin eğrilik ve dever fonksiyonları.....	25
4.2.2. Eğri II'nin aplikasyon elemanlarının hesabına ilişkin formülasyon	28
BÖLÜM 5. HAREKET MODELLERİ ve YANAL SADEME FONKSİYONLARI.....	30
5.1. Sabit Hızlı Hareket Modelinde Yanal Sademe Fonksiyonları	30
5.1.1. Sabit hızlı hareket modelinde klotoit bileşik eğrisinin yanıl sademe fonksiyonları.....	30
5.1.2. Sabit hızlı hareket modelinde Bloss bileşik eğrisinin yanıl sademe fonksiyonları	32

5.1.3. Sabit hızlı hareket modelinde sinüzoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları	33
5.1.4. Sabit hızlı hareket modelinde Eğri I bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları	35
5.1.5. Sabit hızlı hareket modelinde Eğri II'nin yanal sademe fonksiyonu	36
5.2. Sabit Pozitif ve Sabit Negatif İvmeli Hareket Modellerinde Yanal Sademe Fonksiyonları	39
5.2.1. Sabit ivmeli hareket modelinde klotoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları	39
5.2.2. Sabit ivmeli hareket modelinde Bloss bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları	40
5.2.3. Sabit ivmeli hareket modelinde sinüzoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları	41
5.2.4. Sabit ivmeli hareket modelinde Eğri I bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları	41
5.2.5. Sabit ivmeli hareket modelinde Eğri II'nin yanal sademe fonksiyonu	42
BÖLÜM 6. EĞRİLERİN YANAL SADEME AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI	46
6.1. Kriter 1'e Göre Eğrilerin Karşılaştırılması	47
6.1.1. Sabit hızlı hareket modelinde eğrilerin Kriter-1'e göre karşılaştırılması	48
6.1.2. Sabit ivmeli hareket modellerinde eğrilerin Kriter-1'e göre karşılaştırılması	51
6.2. Kriter 2'ye Göre Eğrilerin Karşılaştırılması	54
6.3. Kriter 3'e Göre Eğrilerin Karşılaştırılması	56
6.4. Genel Değerlendirme ve Karşılaştırma	60
BÖLÜM 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	71

SEMBOL LİSTESİ

z	: Yanal sademe
Δz	: Yanal sademe fonksiyonunun sıçrama süreksizliğinin büyüklüğü
$\Delta z'$	: Yanal sademe fonksiyonunun kırılma süreksizliğinin büyüklüğü
Gz	: Yanal sademe fonksiyonunun genliği
a	: Serbest kuvvetlere ait bileşke ivme
T	: Zaman
$\bar{n}$	: Eğri normalı doğrultusundaki birim vektör
$\bar{t}$	: Eğri teğeti doğrultusundaki birim vektör
$\bar{a}_n$	: Eğik yol platformu düzlemine paralel radyal ivme, yanal ivme
$\bar{a}_t$	: Motor kuvvetinin doğurduğu teğetsel ivme
$k=1/r$	: Yatay düzlemde tanımlanan yörünge eğrisinin eğriliği
v	: Taşıtın ani hızı
v_0	: Eğri başlangıç noktasındaki hız
v_e	: Eğri bitim noktasındaki hız
g	: Gravite sabiti
b	: Yol platformunun yatay genişliği
u	: Yol platformu dış kenarının, iç kenara göre yükseltilme miktarı, dever
l	: Seçilen bir başlangıç noktasına göre yörünge eğrisinin yatay uzunluğu, yol uzunluğu, doğal parametre
l_M	: Eğri II için eğriliğin maksimum olduğu M noktasının başlangıç noktasına olan uzaklığı
u_{max}	: Bileşik eğrilerde dairesel kurb boyunca geçerli olan maksimum dever, Eğri II'de eğriliğin maksimum olduğu noktada geçerli olan maksimum dever

- $v(l)$: Hızın yola bağlı değişim fonksiyonu,
 $k(l)$: Eğriliğin yola bağlı değişim fonksiyonu,
 $u(l)$: Deverin yola bağlı değişim fonksiyonu,
 L_1 : Bileşik eğrilerde 1. geçiş eğrisinin uzunluğu
 L_2 : Bileşik eğrilerde dairesel kurbun uzunluğu
 L_3 : Bileşik eğrilerde 2. geçiş eğrisinin uzunluğu
 L : Bileşik eğriler ve Eğri II için toplam eğri uzunluğu
 t : Doğal parametrenin toplam eğri uzunluğuna oranı (boyutsuz parametre)
 τ : Teğet açısı
 x,y : Lokal dik koordinatlar
 Δ : Sapma açısı
 R : Dairesel kurbun eğrilik yarıçapı, Eğri II için eğriliğin maksimum olduğu noktadaki eğrilik yarıçapı

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Deverli Bir Yolda Hareket Eden Taşıta Etki Eden Kuvvetler	5
Şekil 3.1. Bileşik Eğrilerin Genel Geometrisi	8
Şekil 3.2. Klotoid Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı	11
Şekil 3.3. Klotoid Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı	11
Şekil 3.4. Bloss Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı	13
Şekil 3.5. Bloss Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı	14
Şekil 3.6. Sintüzoid Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı	16
Şekil 3.7. Sintüzoid Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı	16
Şekil 4.1. Eğri I Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı	20
Şekil 4.2. Eğri I Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı	20
Şekil 4.3. Eğri I Bileşik Eğrisinde τ Teget Açılar ve x,y Lokal Dik Koordinatları	22
Şekil 4.4. Eğri II'nin Yatay Geometrisi	24
Şekil 4.5. Eğri II'nin Model Eğrilik Diyagramı	27
Şekil 4.6. Eğri II'nin Model Dever Diyagramı	28
Şekil 5.1. Eğrilerin Sabit Hızlı Hareket Modelinde Yanal Sademe Diyagramları	38
Şekil 5.2. Eğrilerin Sabit Pozitif İvmeli Hareket Modelinde Yanal Sademe Diyagramları	44
Şekil 5.3. Eğrilerin Sabit Negatif İvmeli Hareket Modelinde Yanal Sademe Diyagramları	45

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Eğri I Bileşik Eğrisinin τ Teğet Açıları ve x,y Lokal Dik Koordinatları	24
Tablo 4.2. Eğri II'nin τ Teğet Açıları ve x,y Lokal Dik Koordinatları	29
Tablo 6.1. Sabit Hızlı Hareket Modelinde Kriter 2'ye İlişkin Değerler	55
Tablo 6.2. Sabit Pozitif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 2'ye İlişkin Değerler	55
Tablo 6.3. Sabit Negatif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 2'ye İlişkin Değerler	55
Tablo 6.4. Sabit Hızlı Hareket Modelinde Kriter 3'e İlişkin Değerler ve Puanlandırma	57
Tablo 6.5. Sabit Pozitif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 3'e İlişkin Değerler ve Puanlandırma	58
Tablo 6.6. Sabit Negatif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 3'e İlişkin Değerler ve Puanlandırma	59
Tablo 6.7. Eğrilerin Kriterlerden Aldıkları Puanlar ve Toplam Puanları	60

ÖZET

Günümüzde demiryollarında ve karayollarında yüksek hızların gerçekleştirilmesi ve daha yüksek hızlara erişmek için uğraşılması, yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri daha üstün geçiş eğrisi araştırmalarını gündeme getirmiştir. Yeni geçiş eğrisi önerileri yapılırken önerilen eğri, başka eğrilerle yol-araç dinamiği açısından karşılaştırılmakta ve yol-araç dinamiğini belirleyen en uygun kriterin “yanal sademe” olduğu vurgulanmaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle tüm taşıt hareketi ve yol geometrisi özelliklerini kapsayan bir yanal sademe bağıntısı verilerek geçki elemanı olarak kullanılabilecek iki yeni eğri önerilmiştir. Birinci eğri alinyiman ile dairesel kurbu ikinci dereceden değme koşullarını sağlayarak birleştirmektedir. Böylece farklı iki alinyimanın birleştirilmesi ana problemi, geçiş eğrisi-dairesel kurb-geçiş eğrisi yapısına sahip bileşik bir eğri ile çözülmüştür.

Önerilen ikinci eğri, ikinci dereceden değme koşullarını sağlayarak iki alinyimanı tek bir eğri ile birleştirmekte, böylece üç elemandan oluşan bileşik eğriler yerine tek bir elemanla geçki tasarımı olanağını vermektedir.

Yeni geçiş eğrilerini, bilinen bileşik eğriler ile yanal sademe açısından karşılaştırmak için öncelikle bilinen ve önerilen eğrilerin eğrilik ve dever fonksiyonları, yanal sademe fonksiyonunda kullanılabilecek şekilde türetilmiştir. Önerilen her iki eğri için, eğrilik ve dever fonksiyonları yanında aplikasyon elemanları ile ilgili bilgiler de verilmektedir. Önerilen her iki eğriyi bilinen eğriler ile yanal sademe açısından karşılaştırmak için, üç farklı hareket modeli (sabit hızlı, sabit pozitif ivmeli, sabit negatif ivmeli) dikkate alınarak yanal sademe fonksiyonları çıkarılmış ve diyagramları çizilmiştir. Eğrilerin karşılaştırılması amacıyla yanal sademe diyagramlarında sıçrama biçiminde yanal sademe süreksizlikleri, yanal sademenin genliği ve kırılma biçiminde yanal sademe süreksizliklerini dikkate alan üç karşılaştırma kriteri ve bir puanlama sistemi önerilmiş ve uygulanmıştır.

Bu çalışmada önerilen Eğri II, hem ayrı ayrı kriterlere göre hem de genel değerlendirmede açık farkla birinci sırayı almıştır. Diğer bir deyişle, Eğri II'nin yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri, karşılaştırma kapsamına alınan dört bileşik eğriye oranla çok üstündür. Bu çalışmada önerilen diğer eğri olan Eğri I, genel değerlendirmede tüm eğriler arasında Eğri II'den sonra ikinci gelmiş, bileşik eğriler arasında ise birinci olmuştur.

SUMMARY

NEW CURVE TRENDS IN ALIGNMENT DESIGN

One of the main problems in the design of route alignment is to join two straight lines with a curve. This problem was simply solved by using an arc of circular curve with a radius R . However, this solution failed as the speed increased, and it causes significant troubles related to vehicle-road dynamics. Therefore, it was necessary to find out new solutions to increase the traveling safety and comfort and to reduce the cost for maintenance and repair, especially on railways.

Better solutions to the vehicle-road dynamics, can be summarized as:

- changes made on vertical geometry of roads (e.g. superelevation)
- changes made on horizontal geometry of roads (e.g. transition curve).

Transition curves are used for joining a straight line with a circle or for joining a circle of a radius, R_1 with a circle of a radius R_2 . The task of these curves is to provide a regular transition by removing (or minimizing) the effects of instantaneous centrifugal force due to the reasons of sudden changes in curvature. Thus, horizontal geometry of a route becomes more suitable for vehicle-road dynamics. The conformity between horizontal and vertical geometry of route is also satisfied due to the use of superelevation along the transition curve.

In the past, circle with a radius $2R$ and cubic parabola were used as transition curves. As the speed increases it was seen that these curves were insufficient and more suitable new curves theoretically developed were not able to be applied due to the difficulties in the calculation techniques.

Spiral curve (clothoid), which has better characteristics for vehicle-road dynamics, has been used widely, due to the developments in the computer technology.

The ideal case regarding the vehicle-road dynamics is that there is no breaking points on the diagrams of curvature belongs to the curved sections (formed by the arcs of transition curves and/or circular curves) and diagrams of superelevation which should have the same functional structure with curvature, and lateral change of acceleration should have a continuous diagram. There are discontinuities due to the breaking points on the diagrams of curvature and superelevation of combined curves in which spiral is used. In addition, the diagrams of lateral change of acceleration have discontinuities as jumps. As the speed increases, these discontinuities reduce travel comfort and cause wear and tear on vehicle wheels and rails on railways. The discontinuities also change horizontal geometry of rails.

In the recent years, considerations of 400 km/h speeds on railways and extremely high speeds on motorways have improved the importance of relationship between horizontal and vertical geometry of roads with respect to road dynamics. Therefore many investigations have been carried out on developing new curves, which can be

used for the design of horizontal geometry of roads. The advantages of these new curves related to road dynamics are more than spiral curves. In those investigations, different curves are generally compared with each other and the following criteria are considered:

- difficulties on computational techniques,
- possibility of any discontinuation caused by breaking point on the diagrams of curvature and superelevation,
- lateral change of acceleration.

Developments in computer technology have resolved most of the difficulties regarding the computational techniques. Computations, which were not imagined to be done 15-20 years ago, can now easily be carried out. Discontinuities in the diagrams of curvature are eliminated by the conformity of the functions of curvature being selected. In addition, superelevation that has the same functional structure with the curvature is applied to the roads. In this way, breaking points on the diagrams of superelevation are also controlled. In conclusion, lateral change of acceleration becomes important as a criteria in the comparisons of curves.

Lateral change of acceleration is the change of the resultant acceleration occurring along the curve normal with respect to the time. The resultant acceleration is formed by the free forces (unbalanced) acting on a vehicle with a mass (m) and an instantaneous velocity (v), moving on a curved orbit. It can be expressed as

$$z = \frac{da}{dT} \bar{n} \quad (1)$$

Where,

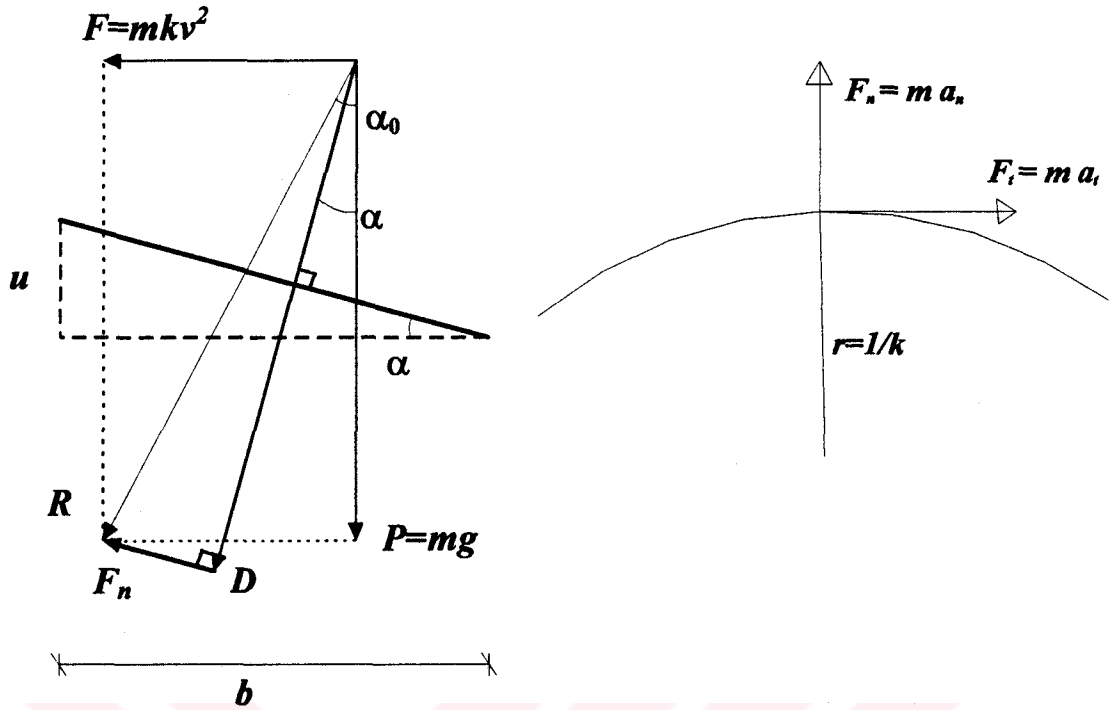
- z : lateral change of acceleration (m/s^3),
 a : resultant acceleration formed by free forces (m/s^2),
 T : time (s),
 $\bar{n}$: unit vector along the curve normal.

Forces acting on a vehicle moving on a superelevated road are the gravitational force ($P=mg$), the centrifugal force ($F=mkv^2$) and the motor force ($F_t=ma_t$) (Fig. 1a, 1b). According to Fig 1a, the resultant force (R) of the gravitational and centrifugal forces can be divided into two: D and F_n perpendicular and parallel to the road platform respectively. D component is balanced with the reaction of the road platform and becomes effective in only vertical change of acceleration. F_n and F_t are the forces which form the lateral change of acceleration (Fig 1b).

From Fig 1a,

$$F_n = m(kv^2 - g \tan \alpha) \cos \alpha \quad (2)$$

can be derived.



(a) Cross Section (b) Plane View
Figure 1. Forces acting on vehicle moving on superelevated road.

Introducing

$$\tan \alpha = \frac{u}{b} \quad \text{and} \quad \cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}}$$

into (2)

$$\bar{a}_n = \left\{ (kv^2 - \frac{g}{b}u) \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} \right\} \bar{n} \quad (3)$$

can be derived.

Where,

$\bar{a}_n$: acceleration along the direction of the curve normal on an inclined road platform (m/s^2),

$k = \frac{1}{r}$: curvature of orbiting curve defined on a horizontal plane ($1/\text{m}$),

g : gravitational acceleration (9.81 m/s^2),

b : horizontal width of the road platform (m),

u : superelevation, inclination of the outer edge of the road with respect to the inner edge (m).

Tangential acceleration caused by the motor force is

$$\bar{a}_t = \frac{dv}{dT} \bar{t} \quad (4)$$

where, $\vec{t}$ is the unit vector along the direction of the tangent of the curve, and the resultant acceleration of the motion is

$$\vec{a} = \frac{dv}{dT} \vec{t} + \left\{ (kv^2 - \frac{g}{b}u) \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} \right\} \vec{n} \quad (5)$$

If

$v = v(l)$ = function of velocity related to the road,

$k = k(l)$ = function of curvature related to the road

$u = u(l)$ = function of super elevation related to the road, and

g, b = constant values

are known, lateral change of acceleration function given by (1) can be derived.

The equation of lateral change of acceleration is obtained as follows:

$$z = \frac{da}{dT} \vec{n} = \frac{bv}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left(3ka_l + v^2 \frac{dk}{dl} - \frac{kv^2 u + gb}{u^2 + b^2} \frac{du}{dl} \right) \quad (6)$$

This equation (6) of lateral change of acceleration can be used for all conditions related to road geometry and vehicle motion. In the literature, it is suggested that this equation should be used when comparing curves based on the lateral change of acceleration. Thus, all the curves taken into account in this thesis are compared with a manner that based on lateral change of acceleration function given by (6).

Clothoid (spiral), Bloss and sinusoidal curves, which are located in combined curves formed by straight line-1st transition curve-circular curve-2nd transition curve-straight line (Figure 2), are examined by their functions used in lateral change of acceleration. Three motion models (motion with constant velocity, motion with positive acceleration and motion with negative acceleration) are taken into account.

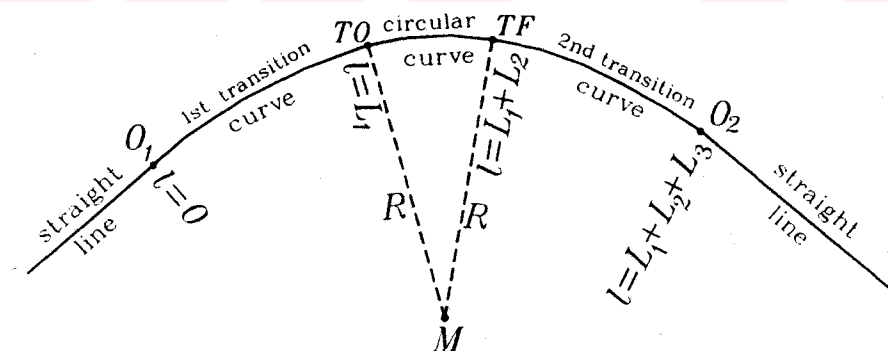


Figure 2. Horizontal Geometry of The Combined Curves

Two new transition curves are suggested in this thesis and they are named as curve I and curve II. The curve I which is located in combined curves (Figure 2) and curve II which joins two straight lines with only one curve (Figure 3) are examined by their functions used in lateral change of acceleration as well as their setting out parameters. Three motion models which are the same as the above mentioned models are taken into account.

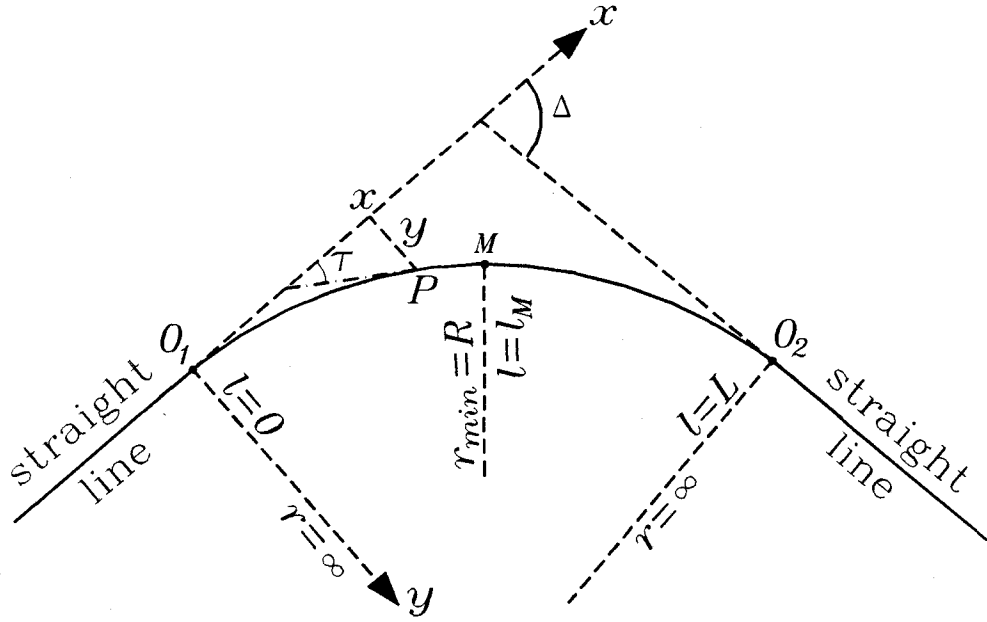


Figure 3. Horizontal Geometry of The Curve II

The curvature and superelevation functions of the curve I are as follows:

$$k_I(t) = \frac{t^3}{R} (6t^2 - 15t + 10) \quad (7)$$

$$u_I(t) = u_{\max} t^3 (6t^2 - 15t + 10) \quad (8)$$

The curvature and superelevation functions of the curve II are as follows:

$$k_{II}(t) = \frac{823543}{6912R} (t^7 - 4t^6 + 6t^5 - 4t^4 + t^3) \quad (9)$$

$$u_{II}(t) = \frac{823543u_{\max}}{6912} (t^7 - 4t^6 + 6t^5 - 4t^4 + t^3) \quad (10)$$

In order to compare the known curves with the suggested curves, I and II, the diagrams of lateral change of acceleration in three motion models are illustrated. Then, these diagrams are examined by means of three criteria.

Criterion 1: Continuity of diagram of lateral change of acceleration is the most important criterion in the comparisons of curves because discontinuities in the form of jumps

- affect travel comfort in railways and motorways.
- cause change of horizontal geometry of rail
- cause wear on vehicle wheels and rails in railways.

Therefore, it is clear that any curve, which does not have discontinuities in the form of jumps in the diagrams of lateral change of acceleration, is superior to the others which have discontinuities. In order to compare the curves according to the criterion 1, curve which has discontinuities is given a rank of -50 for each discontinuity point, and given 100 times of negative remark of sum of the absolute values of the discontinuities.

Criterion 2: The amplitudes of lateral change of acceleration function can be considered as a second criterion.

In the literature, only transition from straight line to circular curve with spiral curve and motion model with constant velocity are examined. The values given in the literature (0.3 m/sec^3 - 0.6m/sec^3) are the maximum values of lateral change of acceleration with respect to the travel comfort. Whichever curve is used, it is possible to be successful not to exceed the boundary values by selecting geometric parameters (L , R , $u_{\max}$ etc.) properly or by velocity limitations. It should be noticed that discontinuities of lateral change of acceleration in the form of jumps have more effects on travel comfort than the values of large amount and continuous lateral change of acceleration. In order to compare the curves, “the amplitude of the lateral change of acceleration function” is suggested as the second criterion. The amplitude of the lateral change of acceleration function is defined as “the difference between the maximum and minimum lateral change of acceleration function values”. All curves are given 100 times of negative remark of the amplitude of the lateral change of acceleration function.

Criterion 3: The discontinuities in the form of break affect the traveling comfort and cause irregular change of the lateral change of acceleration, even though they do not cause as much as the ones in the form of jump. These type of discontinuities occur at the points on which two different alignment elements join by means of the structures of the functions of the curvature, superelevation and motion models. The discontinuity in the form of break is defined as the difference between the slope values of the two tangents on the diagram of lateral change of acceleration at the points mentioned above. In order to compare the curves according to the criterion 3, curve which has discontinuities in the form of break is given a rank of -5 for each discontinuity point, and given 10 times of negative remark of sum of the absolute values of the discontinuities.

When the different criteria are taken into account, different orders are obtained. When the curves are sorted according to the criterion 1, all curves place in the same order except the clothoid. When the sequence according to the criterion 2 is obtained, the best curve is the curve II, the second curve is the clothoid and the third curve is the Bloss, the fourth curve is the curve I and the fifth curve is sinusoidal curve. When the sequence without clothoid according to the criterion 3 are obtained, all curves place in the same order except the Bloss. Therefore, a general evaluation in which all criteria are taken into account should be done in order to obtain the optimal sequence of curves. The ranks of all curves according to the each criterion and total ranks of all curves according to the all criteria are summarized in Table 1.

Table 1. Individual and Total Ranks of All Curves According to The Each Criteria

Curve	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3	Total Rank
Clothoid Combined Curve	-840	-164.4	-	-1004.4
Bloss Combined Curve	0	-185.0	-493.1	-678.1
Sinusoidal Combined Curve	0	-240.0	0	-240
Curve I Combined Curve	0	-226.2	0	-226.2
Curve II	0	-149.7	0	-149.7

When evaluations related with the criteria are taken into consideration, it can be easily stated that the curve II is extremely suitable curve on the base of road-vehicle dynamics. Using the curve II in rail transportation system gives an opportunity to design routes with only two elements and using it consecutively in highways gives an opportunity to design routes with a single transition curve. The curve I takes place in the second order among all curves. The combined curve I, formed by the curve I and circular arc (Figure 2), can be used as an appropriate alternative to the known combined curves in highways and rail systems.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ulaştırma yapıları, bir ülkenin ekonomik ve sosyal gelişmesi yanında ulusal savunmasının da temel taşlarından birisidir. Günümüzde ulusal kara ve demiryolu ağlarını geliştirme ve standardını yükseltme çabaları, ülkelerin en önemli yatırım alanlarından birini oluşturmaktadır.

Ulaştırma yapılarının standardını belirleyen başlıca kriterler güvenlik, konfor, kapasite ve işletme verimliliğidir (MÜLLER 1984, s.8-9). Raylı ulaşım sistemleri ve otoyollar gibi önemli mühendislik yapılarının tasarımındaki güncel yaklaşım, kriterlerin hiçbirinden ödün vermeksizin standardın yükseltilmesidir.

Bir ulaşım yapısının standardının oluşmasında birçok etkenin rolü vardır ve bunların en önemlilerinden biri geçki yatay geometrisinin tasarımıdır (TRIETSCH 1987, CHEW ve diğ. 1989). Yol-araç dinamiğine uygun geçki elemanlarının kullanımıyla güvenlik, konfor ve kapasite sorunu yaratmaksızın daha yüksek işletme hızlarına ulaşmak, son yılların önde gelen araştırma konularından biridir. Demiryollarında 300km/h'i aşan hızların gerçekleştirilmesi ÇORBALIOĞLU (1996) ve daha yüksek hızların amaçlanması PHELAN ve SUSSMAN (1991, s.194), uygun geçki elemanı araştırmalarını yoğunlaştırmıştır. Bu araştırmalardan elde edilen bulgular, doğal olarak yüksek standartlı karayollarında da uygulanacaktır.

Geçki yatay geometrisinin tasarımında çözülmesi gereken ana problemlerden biri, geçkide yer alan farklı doğrultuya sahip iki doğru parçasının(alinyimanın) eğri bir çizgi ile birleştirilmesidir. Bilindiği gibi bu problem, en basit şekilde, R yarıçaplı bir daire yayı (dairesel kurb) yardımıyla çözülmüştür. Ancak, dairesel kurbun alinyimanlara teğet olduğu noktalarda ortaya çıkan ani merkezkaç kuvvet etkisinin, başta güvenlik olmak üzere POLUS ve DAGAN (1987), DESIGNING (1987, s.89) standarda ilişkin tüm kriterleri olumsuz yönde etkilediği ve işletme hızının artmasıyla bu olumsuz etkinin tehlikeli boyutlara ulaştığı bilinmektedir. Yol platformuna, kurbun eğrilik

merkezine doğru negatif eğim verilmesi (dever) de soruna doyurucu çözüm getirmemiştir. Çünkü, dever uygulamasıyla merkezkaç kuvvetin şiddeti azaltılmakla birlikte ani merkezkaç kuvvet etkisi giderilememekte ve alinyimanda yapay merkezcil kuvvet oluşmaktadır.

Demiryollarının yaygınlaşması ile iyiden iyiye önem kazanan bu sorunun çözümü zorunlu hale gelmiş ve demiryolu geçkilerinde “geçiş eğrisi” uygulanmaya başlamıştır (EVREN 1979, s.35-36, BOZKURT 1988, s.66). Geçiş eğrilerinin görevi:

- ani eğrilik değişimlerini ortadan kaldırarak bu değişimleri düzenli kılmak,
- geçki yatay geometrisi ile dever uygulaması arasında uyum sağlamak,
- demiryollarında eğriliğe bağlı aks daralmalarının değişimini düzenli hale getirerek araçlardaki ve raylardaki aşınma ve bozulmaları azaltmak,
- yolculuk güvenliğini ve konforunu arttırmaktır (JACOBS 1987).

Otoyolların gündeme gelmesi ile birlikte karayolu geçkilerinde de kullanılmaya başlanan geçiş eğrileri alinyimanla dairesel kurb arasına yerleştirilmektedir. Bu uygulama biçimi, ana problem olan iki alinyimanın birleştirilmesini geri plana itmiş ve araştırmalar, alinyimanı dairesel kurb ile birleştirme üzerinde yoğunlaşmıştır. Literatürde, problemi bu biçimi ile ele alan birçok geçiş eğrisi önerisine rastlanmaktadır. Bunların başlıcaları 2R yarıçaplı dairesel kurb (UMAR ve YAYLA 1994, s.155), üslü fonksiyonlu birleştirme eğrisi (BIÇAKCI 1977, s.78), Searles eğrisi (IVES ve KISSAM 1966, s.111), kübik parabol (SHEPHERD 1968, s.636, BOZKURT 1969, s.55), lemniskat (JENKINS 1961, s.67, LORENZ 1971, s.25), bikuadratik parabol (JACOBS 1987), klotoid (KASPER ve diğ. 1968), Bloss eğrisi (KAHLER 1990a, KOBRYN 1991a), sinüzoid (EVREN 1979, s.36, JACOBS 1987) ve cosinüzoiddir (INGWERSEN ve RICKERT, 1990).

Bilgisayarların kullanım alanına girmesinden önceki yıllarda tüm uygulayıcıların yaşamış olduğu hesap yapma darboğazı, geçiş eğrilerine ilişkin hesapların kolay yapılabilir olmasını önemli kılmıştır. Bu yıllarda demiryollarında kübik parabol, karayollarında 2R yarıçaplı dairesel kurb ve Searles eğrisi yaygın olarak kullanılmıştır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte hesap yapma darboğazı tümüyle ortadan kalkmış, yol-arac dinamiğine ilişkin nitelikleri daha üstün olan ve bu nedenle yüksek

hız isteklerine daha iyi yanıt veren klotoid, uygulamada kullanılan tek geçiş eğrisi durumuna gelmiştir (JACOBS 1987).

Günümüzde demiryollarında 300 km/h'i aşan hızların gerçekleştirilmesi ve daha yüksek hızlar için uğraşılması, geçiş eğrisi olarak mevcut eğrilerin yetersiz kalması sonucunu doğurmuş ve yol-arac dinamiğine ilişkin özellikleri daha üstün, ancak hesap açısından daha karmaşık olan Bloss eğrisi, sinüzoid gibi geçiş eğrilerini gündeme getirmiştir. Bunların yanında değişik spline fonksiyonlarının geçki elemanı olarak kullanılması CREMER (1978), WALTON, (1989), WALTON ve MEEK (1990), MEEK ve WALTON, (1992), TARI (1996) ve iki alinyimanın tek bir eğri ile birleştirilmesi önerileri ile de karşılaşılmaktadır (KOBRYN 1993, BAYKAL ve diğ. 1997). Sözkonusu yayınların tümünde önerilen eğri, başka eğrilerle yol-arac dinamiği açısından karşılaştırılmakta ve yol-arac dinamiğini belirleyen en uygun kriterin “yanal sademe” olduğu vurgulanmaktadır (JACOBS 1987, KAHLER 1989, KAHLER 1990b, KOBRYN 1991b, KOBRYN 1993, TARI ve BAYKAL 1995, BAYKAL 1996, BAYKAL ve diğ. 1997).

Bu çalışmada, geçki elemanı olarak kullanılabilecek iki yeni eğri önerilmiştir. Birinci eğri alinyiman ile dairesel kurbu ikinci dereceden değme koşullarını sağlayarak birleştirmektedir. Böylece farklı iki alinyimanın birleştirilmesi ana problemi, geçiş eğrisi-dairesel kurb-geçiş eğrisi yapısına sahip bileşik bir eğri ile çözülmüştür. Bilindiği gibi kübik parabol, klotoid, Bloss eğrisi, sinüzoid gibi geçiş eğrilerinin kullanılması durumunda da benzer yapıda birleşik eğriler elde edilmektedir.

Önerilen ikinci eğri, ikinci dereceden değme koşullarını sağlayarak iki alinyimanı tek bir eğri ile birleştirmekte, böylece üç elemandan oluşan bileşik eğriler yerine tek bir elemanla geçki tasarımı olanağını vermektedir. Ayrıca, önerilen her iki eğri, bilinen bileşik eğrilerle, yanal sademe kriterine ve farklı hız modellerine göre karşılaştırılmış ve önerilen eğrilerin üstünlüğü kanıtlanmıştır. Bilinen bileşik eğrilerde geçiş eğrisi olarak klotoid, Bloss eğrisi ve sinüzoid kullanılmıştır.

BÖLÜM 2. YANAL SADEME

Geçki elemanı olarak kullanılan eğrilerin, yol-aracı dinamiği açısından karşılaştırılmasında en uygun kriter yanal sademedir (JACOBS 1987, KAHLER 1989, KAHLER 1990b, KOBRYN 1991b, KOBRYN 1993, TARI ve BAYKAL 1995, BAYKAL 1996, BAYKAL ve diğ. 1997). Bu bölümde yanal sademe kavramı, geniş bir biçimde ele alındığı BAYKAL (1996)'dan yararlanarak açıklanacaktır.

Eğrisel bir yörünge üzerinde hareket eden bir cisme, hızı sabit olsa bile, hızının doğrultusundaki değişim nedeni ile bir merkezci ivme etki eder. İvme, hızın zamana göre değişim oranı olarak tanımlandığına göre hızın gerek doğrultusunda gerekse büyüklüğündeki bir değişim bir ivmeye neden olur. Yörünge boyunca hızının büyüklüğü değişen bir cisim merkezci ivmeden başka teğetsel bir ivmeye de sahiptir (HAUSMANN ve SLACK 1980, s.85-88)

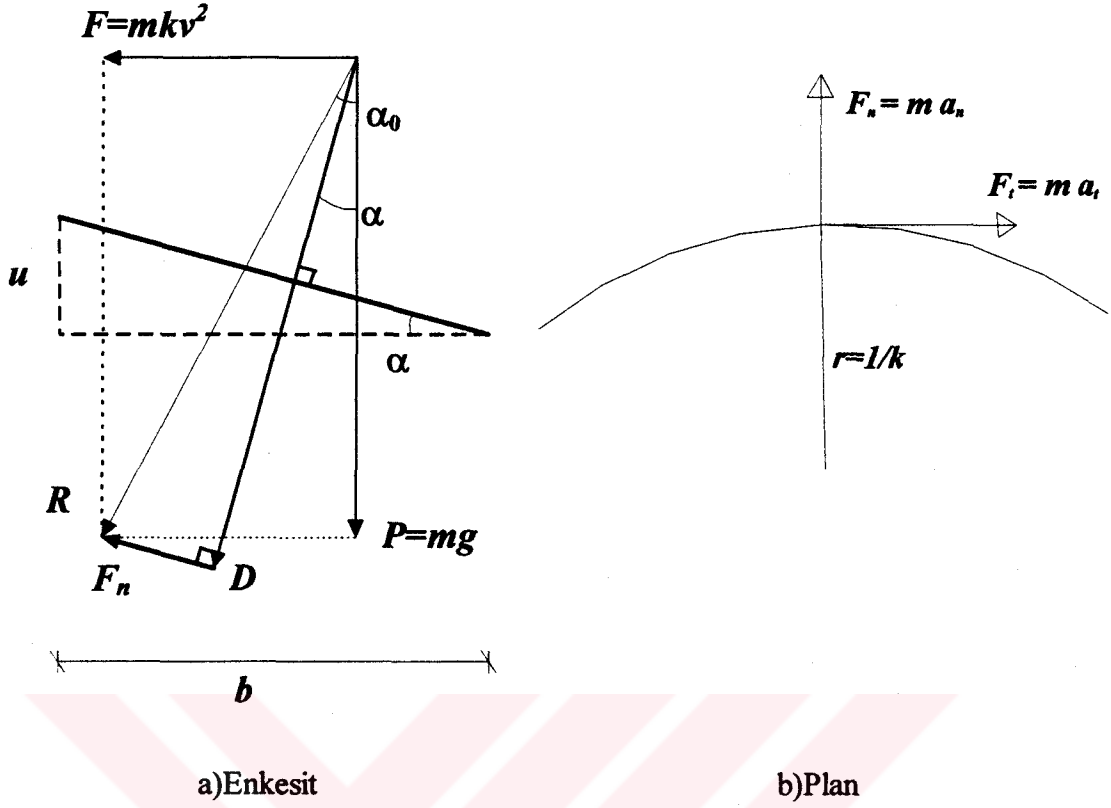
Yanal sademe, eğrisel yörünge üzerinde v ani hızıyla hareket eden m kütleli bir araca etki eden serbest (dengelenemeyen) kuvvetlerin doğurduğu bileşke ivmenin, yörünge eğrisinin normali doğrultusunda zamana göre değişimi olarak tanımlanır (BAYKAL 1996).

$$z = \frac{da}{dT} \bar{n} \quad (2.1)$$

(2.1) bağıntısında

- z :yanal (radyal) sademe (m/sn^3)
- a :serbest kuvvetlere ait bileşke ivme (m/sn^2)
- T :zaman (sn)
- $\bar{n}$:eğri normali doğrultusundaki birim vektördür.

Serbest kuvvetlere ait bileşke ivmenin $\bar{a}$, ve $\bar{a}_n$ şeklinde iki bileşeni vardır (AYRES 1979, s.95, THOMAS ve FINNEY 1992, s.797-798).



Şekil 2.1. Deverli Yolda Hareket Eden Taşıta Etki Eden Kuvvetler

Dever uygulanmış bir yolda hareket eden araca etki eden kuvvetler, ağırlık kuvveti ($P=mg$), merkezkaç kuvvet ($F=mkv^2$) ve motor kuvvetidir ($F_t=ma_t$) (Şekil 2.1). Şekil 2.1a'ya göre P ve F kuvvetlerinin R bileşkesi yol platformuna dik D ve yol platformuna paralel F_n bileşenlerine ayrılabilir. D bileşeni yol platformunun tepkisi ile dengelenir ve araca etkiyen serbest kuvvet olarak F_n ve F_t kalır (Şekil 2.1b).

Şekil 2.1a'dan

$$F_n = R \sin(\alpha_0 - \alpha) = (R \sin \alpha_0 - R \cos \alpha_0 \tan \alpha) \cos \alpha$$

yazılabilir. Burada

$$R \sin \alpha_0 = F = mkv^2, \quad R \cos \alpha_0 = P = mg$$

olduğu gözönüne alınırsa

$$F_n = m(kv^2 - g \tan \alpha) \cos \alpha \quad (2.2)$$

elde edilir.

Şekil 2.1a'ya göre

$$\tan \alpha = \frac{u}{b} \text{ ve } \cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}}$$

(2.2)'de yerine konarak

$$\vec{a}_n = \left\{ \left(kv^2 - \frac{g}{b}u \right) \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} \right\} \vec{n} \quad (2.3a)$$

elde edilir. Burada

$\vec{a}_n$: Eğik yol platformu düzlemine paralel radyal ivme, yanal ivme(m/sn²)

$\vec{a}_t$:motor kuvvetinin doğurduğu teğetsel ivme (m/sn²)

$k=1/r$:yatay düzlemde tanımlanan yörünge eğrisinin eğriliği (1/m)

v :taşıtın ani hızı (m/sn)

g :gravite (9.81m/sn²)

b :yol platformunun yatay genişliği (m)

u :yol platformu dış kenarının, iç kenara göre yükseltirme miktarı, dever(m)

Motor kuvvetinin doğurduğu teğetsel ivme, $\vec{t}$ eğri teğeti doğrultusundaki birim vektörü göstermek üzere

$$\vec{a}_t = \frac{dv}{dT} \vec{t} \quad (2.3b)$$

dir (SOKOLNIKOFF ve REDHEFFER 1966, s.281, THOMAS ve FINNEY 1992, s.797)

Serbest kuvvetlerin doğurduğu bileşke ivme (2.3a) ve (2.3b) yardımıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\vec{a} = \frac{dv}{dT} \vec{t} + \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left(kv^2 - g \frac{u}{b} \right) \vec{n} \quad (2.4)$$

(2.4)'ün yola göre türevi

$$\frac{d\vec{a}}{dl} = \frac{dv}{dT} \frac{d\vec{t}}{dl} + \frac{d}{dl} \left\{ \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left(kv^2 - \frac{gu}{b} \right) \vec{n} \right\} \quad (2.5)$$

olup

$$\frac{d\vec{l}}{dl} = k_e \vec{n} \quad (2.6)$$

geçerlidir SOKOLNIKOFF ve REDHEFFER (1966, s.279) ve k_e , yol platformu eğik düzlemindeki eğriliktir. Yatay düzlemde tanımlanmış olan yörünge eğrisinin k eğriliği, sözkonusu eğik düzleme iz düşürülmelidir;

$$k_e = k \cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} k \quad (2.7)$$

(2.7) ve (2.6) eşitlikleri (2.5)'de yerine konur ve eşitliğin her iki yanı $\vec{n}$ ile çarpılırsa $\vec{n} \cdot \vec{n} = 1$ olacağından

$$\frac{da}{dl} \vec{n} = \frac{b}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left(k \frac{dv}{dT} + v^2 \frac{dk}{dl} + 2kv \frac{dv}{dl} - \frac{kv^2 u + gb}{u^2 + b^2} \frac{du}{dl} \right) \quad (2.8)$$

elde edilir. Ayrıca

$$\frac{da}{dT} = \frac{da}{dl} \frac{dl}{dT} = \frac{da}{dl} v \rightarrow \frac{da}{dl} = \frac{1}{v} \frac{da}{dT} \quad (2.9)$$

$$\frac{dv}{dT} = \frac{dv}{dl} \frac{dl}{dT} = \frac{dv}{dl} v \rightarrow \frac{dv}{dl} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT} = \frac{a_t}{v} \quad (2.10)$$

yazılarak (2.8) bağıntısında (2.9) ve (2.10) yerine konursa

$$z = \frac{da}{dT} \vec{n} = \frac{bv}{\sqrt{u^2 + b^2}} \left(3ka_t + v^2 \frac{dk}{dl} - \frac{kv^2 u + gb}{u^2 + b^2} \frac{du}{dl} \right) \quad (2.11)$$

sonucuna varılır. Bu eşitlik her türlü yol geometrisi ve taşıt hareketi koşullarını kapsayan yanal sademe bağıntısıdır (BAYKAL 1996). (2.11)'de

l :seçilen bir başlangıç noktasına göre yörünge eğrisinin yatay uzunluğu, yol uzunluğu, doğal parametre (m)'dir.

Yanal sademe hesabında (2.11) bağıntısının kullanılabilmesi için

$v=v(l)$:hızın yola bağlı değişim fonksiyonu,

$k=k(l)$:eğriliğin yola bağlı değişim fonksiyonu,

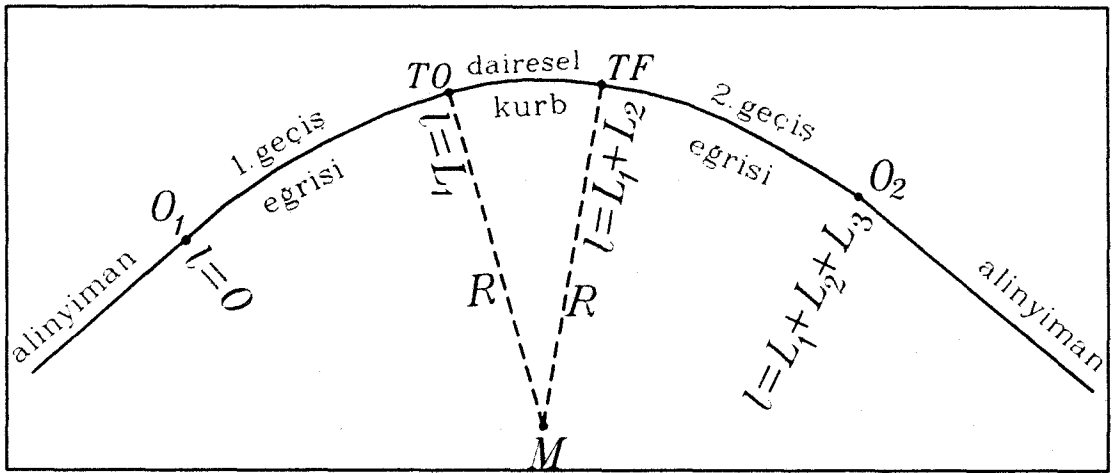
$u=u(l)$:deverin yola bağlı değişim fonksiyonu,

bilinmelidir.

BÖLÜM 3. BİLİLEN GEÇİŞ EĞRİLERİNDE EĞRİLİK VE DEVER FONKSİYONLARI

Bu çalışmada önerilen geçiş eğrilerini, bilinen eğrilerle yanal sademe kriterine göre karşılaştırabilmek için tüm eğrilerin $k=k(l)$ eğrilik fonksiyonları ve $u=u(l)$ dever fonksiyonları bilinmelidir (bkz. (2.11) eşitliği). Bilinen tüm eğrilerin dikkate alınması durumunda araştırmanın kapsamı çok büyüyeceğinden, günümüzde büyük çoğunlukla kullanılan klotoid yanında yüksek hızlarda uygulanması önerilen Bloss eğrisi ve sinüzoid, bilinen geçiş eğrilerine örnek olarak seçilmiştir. İzleyen başlıklar altında, bu eğriler kullanılarak oluşturulan bileşik eğrilere ait eğrilik ve dever fonksiyonları açıklanacaktır.

Söz konusu bileşik eğrilerin genel geometrisi Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu eğriler, 1. geçiş eğrisi (yay uzunluğu L_1), R yarıçaplı dairesel kurb (yay uzunluğu L_2) ve 2. geçiş eğrisinden (yay uzunluğu L_3) oluşmaktadır. Eğrinin toplam yay uzunluğu $L_1+L_2+L_3=L'$ dir.



Şekil 3.1. Bileşik Eğrilerin Genel Geometrisi

3.1.Klotoid Bileşik Eğrisi

Yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri kübik parabolde üstün olan klotoid, İkinci Dünya Savaşı yıllarında uygulanmaya başlamıştır. Yüksek hızlarda yetersiz kaldığı bilinmesine karşın JACOBS (1987), KAHLER (1990b), KOBRYN (1991a), günümüzde hemen hemen tüm geçki tasarımlarında geçiş eğrisi olarak klotoid kullanılmaktadır. Son 15 yıl içinde, klotoidle ilgili değişik problemleri ele alan çok sayıda araştırma yapılmıştır. Klotoidin uygulamalarda kullanılması HINUBER ve HERRMANN (1981), HUBENY (1981), BENDER (1981), BAAS (1984), KAHLER (1985), SCHUHR (1987), NDUKWE VE OJINNAKA (1991), KOBRYN (1991c), KAHLER (1993) değişik parametrelili olanlarının ortaya konması KAHLER (1989), WALTON (1989), WALTON ve MEEK (1990), MEEK ve THOMAS (1991), MEEK ve WALTON (1992) ve bilgisayarda hesap tekniği ile ilgili araştırmalar sürdürülmektedir (KAHLER 1980, SCHNÄDELBACH 1983, REIMER 1985, BENDER 1986, STAFFELDT 1986, SCHUHR 1986, GURSCHKE 1987, WALTON ve MEEK 1989, MEEK ve WALTON 1989, AHRENS 1989, HECKMANN 1990, FISCH ve diğ. 1990, FRÖHLICH ve HARNEID 1990, ÖZTAN ve BAYKAL 1991, SCHMIDT 1991, GURSCHKE 1992, KAHLER 1992, ÖZTAN ve diğ. 1995).

3.1.1.Klotoid bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları

Klotoid, lineer eğrilik fonksiyonu düşüncesinden yola çıkılarak türetilmiş bir eğridir;

$$k(l)=a+bl \quad (3.1)$$

Şekil 3.1'e göre, 1.klotoidin eğrilik fonksiyonu aşağıdaki sınır koşullarını sağlamalıdır,

$$l=0 \Rightarrow k=0 \quad (3.2)$$

$$l=L_1 \Rightarrow k=1/R \quad (3.3)$$

(3.1), (3.2) ve (3.3)'den bulunan $a=0$ ve $b=1/LR$ katsayıları (3.1)'de yerine konarak 1. klotoidin eğrilik fonksiyonu elde edilir

$$k_{k,1}(l) = \frac{l}{L_1 R} \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (3.4)$$

Uygulamada, $L_1 R = A_1^2 = \text{sabit}$ eşitliği ile tanımlanan A parametresi kullanılmaktadır (KASPER ve diğ.1968, s.14, LORENZ 1971, s.27).

1. klotoidi izleyen dairesel kurbun eğrilik fonksiyonu

$$k_{k,2}(l) = \frac{1}{R} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (3.5)$$

dir.

2. klotoidin eğrilik fonksiyonunun sağlaması gereken sınır koşulları şunlardır (Şekil 3.1),

$$l = L_1 + L_2 \Rightarrow k = 1/R \quad (3.6)$$

$$l = L_1 + L_2 + L_3 = L \Rightarrow k = 0 \quad (3.7)$$

(3.1), (3.6) ve (3.7)'den 2. klotoidin eğrilik fonksiyonu için

$$k_{k,3}(l) = \frac{1}{RL_3} (L - l) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (3.8)$$

eşitliğine ulaşılır.

Dever fonksiyonlarının, kural olarak eğrilik fonksiyonlarıyla benzer yapıya sahip olmaları öngörülmektedir (ESVELD 1989, s.22, JACOBS 1987). Bu kuraldan yola çıkılarak klotoid bileşik eğrisinin dever fonksiyonları

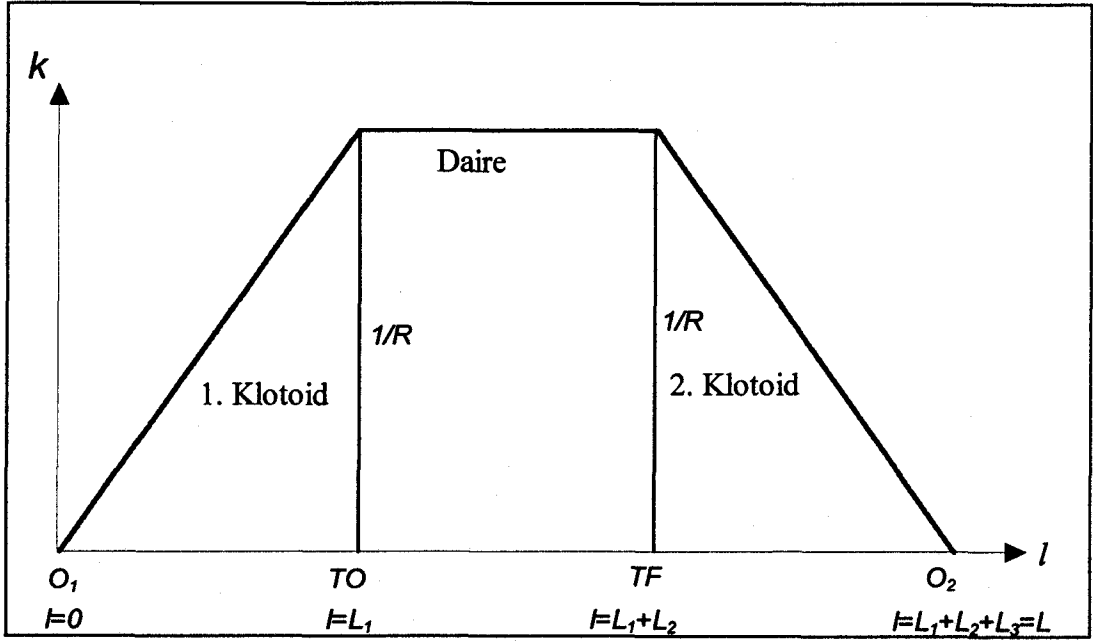
$$u_{k,1}(l) = \frac{u_{\max} l}{L_1} \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (3.9)$$

$$u_{k,2}(l) = u_{\max} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (3.10)$$

$$u_{k,3}(l) = \frac{u_{\max}}{L_3} (L - l) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (3.11)$$

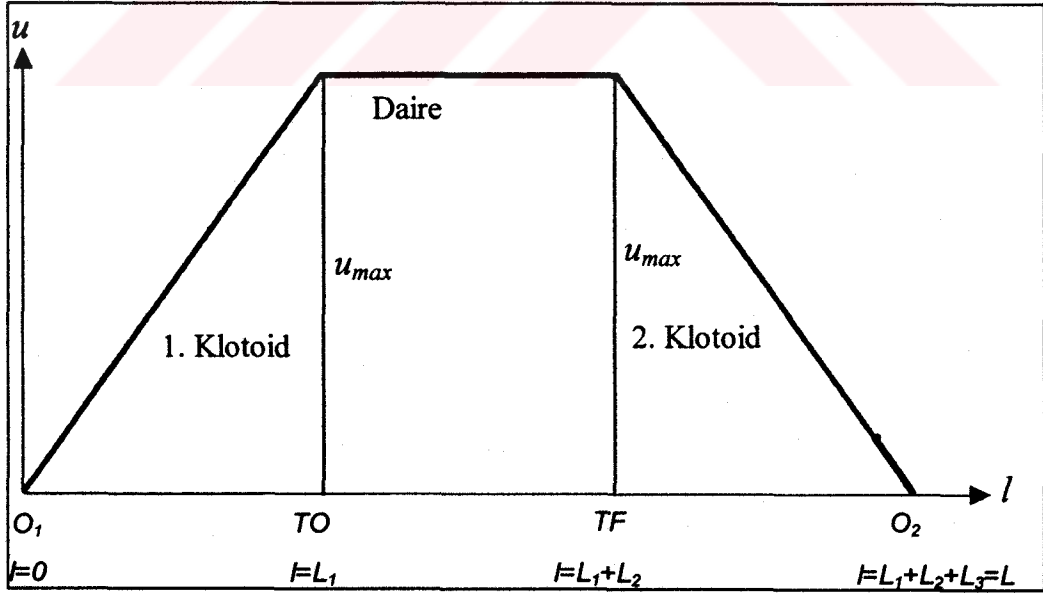
eşitlikleri ile ifade edilir.

Bu eşitliklerde $u_{\max}$, dairesel kurb boyunca geçerli olan maksimum deveri göstermektedir.



Şekil 3.2. Klotoid Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı

Klotoid bileşik eğrisinin model eğrilik ve deyer diyagramları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Klotoid Bileşik Eğrisinin Model Değer Diyagramı

Aplikasyon elemanlarının hesabı için gerekli olan τ teğet açısı ve x,y lokal dik koordinatlarına ilişkin formülasyon KASPER ve diğ. (1968)'de verilmektedir.

3.2. Bloss Bileşik Eğrisi

Demiryollarında ve karayollarında kullanılmasının yararlı olacağı ileri sürülen Bloss eğrisi yol dinamiğine uygun özelliklere sahiptir (SCHUHR 1987, KAHLER 1990a, SCHMIDT 1991). Eğri, kübik eğrilik diyagramına sahip olup eğrilik diyagramının her noktasında teğet doğrultusu sürekli olarak değişmektedir (KOBRYN 1991a).

3.2.1. Bloss bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları

Bloss eğrisinin eğrilik fonksiyonu

$$t=l/L \quad (3.12)$$

olmak üzere

$$k_b(t) = \frac{1}{R}(3t^2 - 2t^3) \quad (3.13)$$

bağıntısıyla verilmektedir (KOBRYN 1991a). Bloss eğrisinin bileşik eğri içinde kullanılması durumunda 1. Bloss eğrisinin eğrilik fonksiyonu aşağıdaki koşulları sağlamalıdır,

$$l=0 \Rightarrow k=0 \text{ ve } k'=0 \quad (3.14)$$

$$l=L_1 \Rightarrow k=1/R \text{ ve } k'=0 \quad (3.15)$$

(3.12), (3.13), (3.14) ve (3.15)'den yararlanarak 1. Bloss eğrisinin eğrilik fonksiyonu için

$$k_{b,1}(l) = \frac{1}{R} \left(3 \frac{l^2}{L_1^2} - 2 \frac{l^3}{L_1^3} \right) \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (3.16)$$

elde edilir.

1. Bloss eğrisini izleyen dairesel kurbun eğrilik fonksiyonu

$$k_{b,2}(l) = \frac{1}{R} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (3.17)$$

dir.

2. Bloss eğrisinin eğrilik fonksiyonunun sağlaması gereken sınır koşulları

$$l=L_1+L_2 \Rightarrow k=1/R \text{ ve } k'=0 \quad (3.18)$$

$$l=L_1+L_2+L_3=L \Rightarrow k=0 \text{ ve } k'=0 \quad (3.19)$$

dir. 2. Bloss eğrisinin eğrilik fonksiyonu için (3.12), (3.13), (3.18) ve (3.19)'dan

$$k_{b,3}(l) = \frac{1}{R} \left(3 \frac{(L-l)^2}{L_3^2} - 2 \frac{(L-l)^3}{L_3^3} \right) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilir.

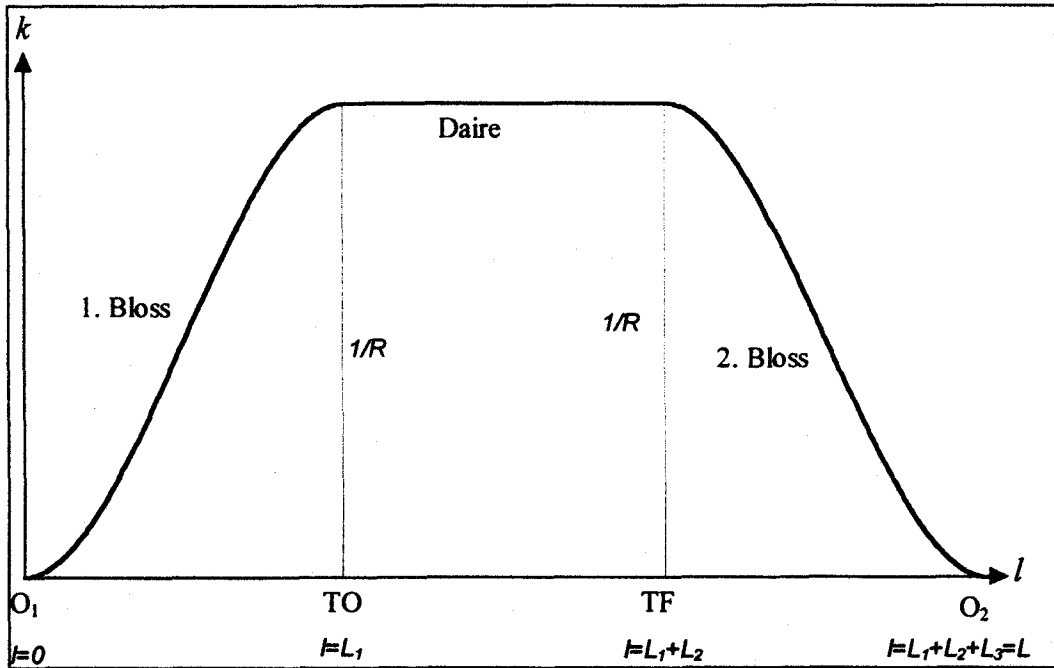
Eğrilik fonksiyonlarıyla benzer fonksiyonel yapıya sahip olmaları öngörülen dever fonksiyonları, Bloss bileşik eğrisi için

$$u_{b,1}(l) = u_{\max} \left(3 \frac{l^2}{L_1^2} - 2 \frac{l^3}{L_1^3} \right) \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (3.21)$$

$$u_{b,2}(l) = u_{\max} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (3.22)$$

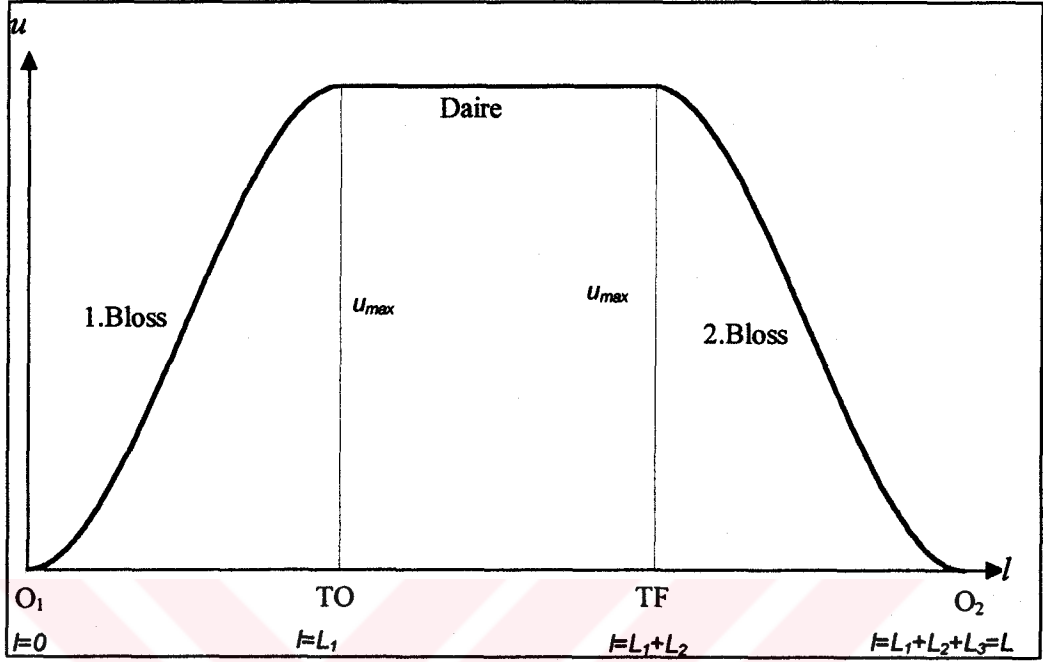
$$u_{b,3}(l) = u_{\max} \left(3 \frac{(L-l)^2}{L_3^2} - 2 \frac{(L-l)^3}{L_3^3} \right) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (3.23)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.



Şekil 3.4. Bloss Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı

Bloss bileşik eğrisinin model eğrilik ve dever diyagramları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5. Bloss Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı

Aplikasyon elemanlarının hesabı için gerekli olan τ teğet açısı ve x, y lokal dik koordinatlarına ilişkin formülasyon KOBRYN (1991a)'da verilmektedir.

3.3. Sinüzoid Bileşik Eğrisi

Yanal sademenin sürekliliğini sağlamak için, eğrilerin başlangıç ve bitim noktalarında alinyiman ve dairesel kurba yalnızca birinci dereceden değil ikinci dereceden de teğet olmaları gerekli görülmektedir (JACOBS 1987). Bu düşünceden hareketle sinüzoid güncel bir geçki elemanı olarak ortaya konmuştur. Sinüzoid günümüzde yol-araç dinamiğine ilişkin uygun özellikleri nedeni ile yüksek hızlı demiryollarında kullanılması benimsenen bir eğridir (EVREN 1979, s.36).

3.3.1. Sinüzoid bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları

Sinüzoidal eğrilik fonksiyonu düşüncesinden yola çıkılarak elde edilen sinüzoidin eğrilik fonksiyonu

$$k_s(l) = \frac{1}{R} \left(\frac{l}{L} - \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi \frac{l}{L}) \right) \quad (3.24)$$

olarak verilmektedir (JACOBS 1987). Şekil 3.1'e göre 1.sinüzoidin eğrilik fonksiyonu aşağıdaki sınır koşullarını sağlamalıdır.

$$l=0 \Rightarrow k=0 \text{ ve } k'=0 \quad (3.25)$$

$$l=L_1 \Rightarrow k=1/R \text{ ve } k'=0 \quad (3.26)$$

(3.24), (3.25) ve (3.26)'dan 1. sinüzoidin eğrilik fonksiyonu

$$k_{s,1}(l) = \frac{1}{R} \left(\frac{l}{L_1} - \frac{1}{2\pi} \sin(\frac{l}{L_1} 2\pi) \right) \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (3.27)$$

olarak elde edilir.

1. sinüzoidi izleyen dairesel kurbun eğrilik fonksiyonu

$$k_{s,2}(l) = \frac{1}{R} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (3.28)$$

dir.

2. sinüzoidin eğrilik fonksiyonunun sağlaması gereken sınır koşulları şunlardır,

$$l=L_1+L_2 \Rightarrow k=1/R \text{ ve } k'=0 \quad (3.29)$$

$$l=L_1+L_2+L_3 \Rightarrow k=0 \text{ ve } k'=0 \quad (3.30)$$

(3.24), (3.29) ve (3.30)'dan 2. sinüzoidin eğrilik fonksiyonu için

$$k_{s,3}(l) = \frac{1}{R} \left(\frac{(L-l)}{L_3} - \frac{1}{2\pi} \sin(\frac{(L-l)}{L_3} 2\pi) \right) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L \quad (3.31)$$

eşitliğine ulaşılır.

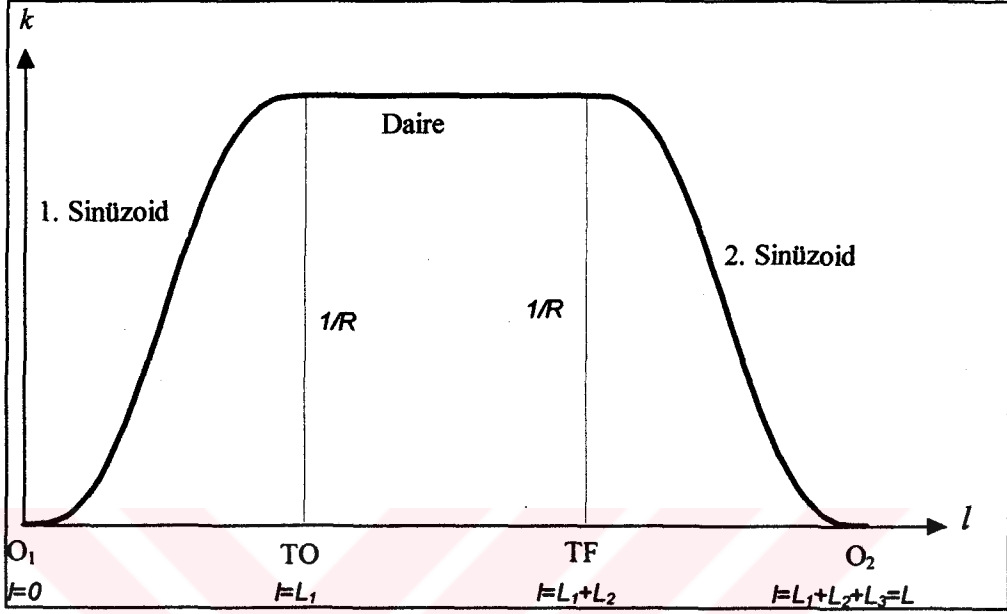
Eğrilik fonksiyonlarıyla benzer fonksiyonel yapıya sahip olmaları öngörülen dever fonksiyonları sinüzoid bileşik eğrisi için

$$u_{s,1}(l) = u_{\max} \left(\frac{l}{L_1} - \frac{1}{2\pi} \sin(\frac{l}{L_1} 2\pi) \right) \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (3.32)$$

$$u_{s,2}(l) = u_{\max} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (3.33)$$

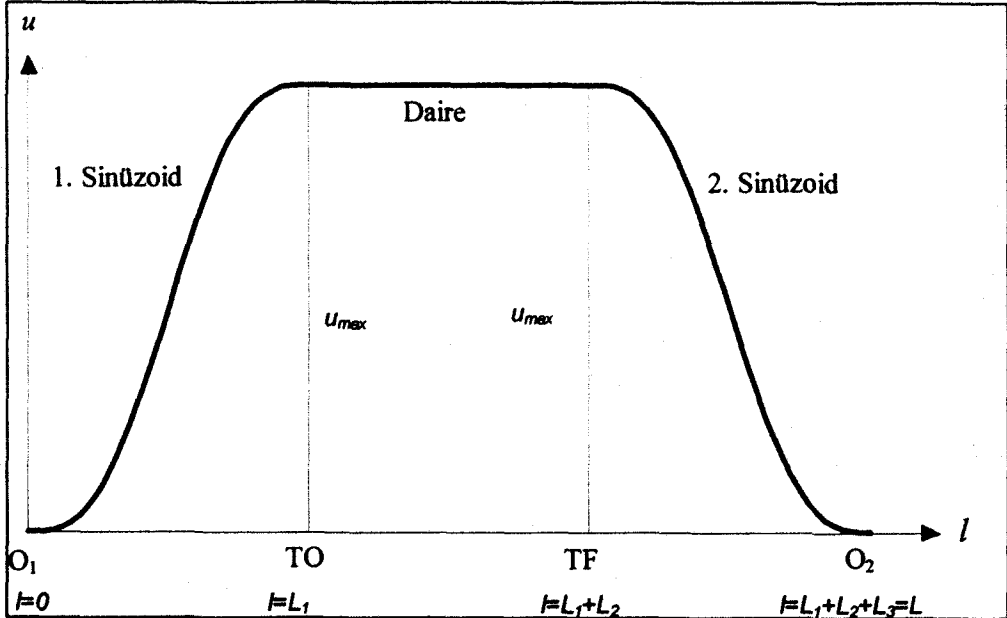
$$u_{s,3}(l) = u_{\max} \left(\frac{(L-l)}{L_3} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{(L-l)}{L_3} 2\pi\right) \right) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L \quad (3.34)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.



Şekil 3.6. Sinüzoid Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı

Sinüzoid bileşik eğrisinin model eğrilik ve dever diyagramları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Sinüzoid Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı

Aplikasyon elemanlarının hesabı için gerekli olan τ teğet açısı ve x,y lokal dik koordinatlarına ilişkin formülasyon JACOBS (1987)'de verilmektedir.



BÖLÜM 4. YENİ GEÇİŞ EĞRİSİ ÖNERİLERİ

Bu bölüm, tez çalışmasının ana konusu olan iki yeni geçiş eğrisi önerisini kapsamaktadır.

Önerilen birinci eğri, alinyiman ile dairesel kurbu birleştirmektedir. İzleyen bölümlerde bu eğri “Eğri I” olarak adlandırılacaktır.

Önerilen ikinci eğri, iki alinyimanı tek bir eğri ile birleştirme olanağını vermektedir. İzleyen bölümlerde bu eğri “Eğri II” olarak adlandırılacaktır.

4.1.Eğri I Bileşik Eğrisi

Eğri I bileşik eğrisi Şekil 3.1’deki geometrik yapıya sahiptir. Dairesel kurbu alinyimanlara birleştiren iki adet eğri I, daire ve alinyimana bağlandığı teğet noktalarında güncel bir geçki elemanının sahip olması gereken ikinci dereceden değme koşullarını JACOBS (1987) sağlamaktadır.

4.1.1.Eğri I bileşik eğrisinin eğrilik ve dever fonksiyonları

Eğri I’in model eğrilik fonksiyonu olarak 5. derece parabolü seçilmiştir;

$$k(l) = al^5 + bl^4 + cl^3 + dl^2 + el + f \quad (4.1)$$

Eğri I bileşik eğrisi içinde yer alan 1. eğri I’in eğrilik fonksiyonu aşağıdaki sınır koşullarını sağlamaktadır (bkz. Şekil 3.1),

$$\begin{aligned} l = 0 &\Rightarrow k = 0, k' = 0, k'' = 0 \\ l = L_1 &\Rightarrow k = 1/R, k' = 0, k'' = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

(4.2) ve (4.1)’den aşağıdaki eğrilik fonksiyonu elde edilir,

$$k_{1,1}(l) = \frac{1}{R} \left\{ a \left(\frac{l}{L_1} \right)^5 + b \left(\frac{l}{L_1} \right)^4 + c \left(\frac{l}{L_1} \right)^3 \right\} \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (4.3)$$

(4.3) eğrilik fonksiyonu yalnızca

$$a = 6, \quad b = -15, \quad c = 10 \quad (4.4)$$

değerleri için geçerli olmakta, diğer bir deyişle (4.2) sınır koşullarını yalnızca bu değerler için sağlamaktadır. (4.4) değerleri (4.3)'de yerine konursa 1. Eğri I'in eğrilik fonksiyonu

$$k_{1,1}(l) = \frac{l^3}{RL_1^3} \left(\frac{6l^2}{L_1^2} - \frac{15l}{L_1} + 10 \right) \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (4.5)$$

olur.

R yarıçaplı dairesel kurbun eğrilik fonksiyonu

$$k_{1,2}(l) = \frac{1}{R} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (4.6)$$

2. eğri I'in eğrilik fonksiyonu, Şekil 3.1'e göre aşağıdaki sınır koşullarını sağlayacaktır,

$$\begin{aligned} l = L_1 + L_2 + L_3 = L &\Rightarrow k = 0, \quad k' = 0, \quad k'' = 0 \\ l = L_1 + L_2 &\Rightarrow k = 1/R, \quad k' = 0, \quad k'' = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

(4.1), (4.7) ve (4.4)'den 2. eğri I'in eğrilik fonksiyonuna ulaşılır,

$$k_{1,3}(l) = \frac{(L-l)^3}{RL_3^3} \left(\frac{6(L-l)^2}{L_3^2} - \frac{15(L-l)}{L_3} + 10 \right) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (4.8)$$

Eğri I bileşik eğrisinin dever fonksiyonları, (4.1)'e benzer model dever fonksiyonu ve (4.2) ve (4.7)'ye benzer sınır koşulları dikkate alınarak türetilir. 1. eğri I'in dever fonksiyonu

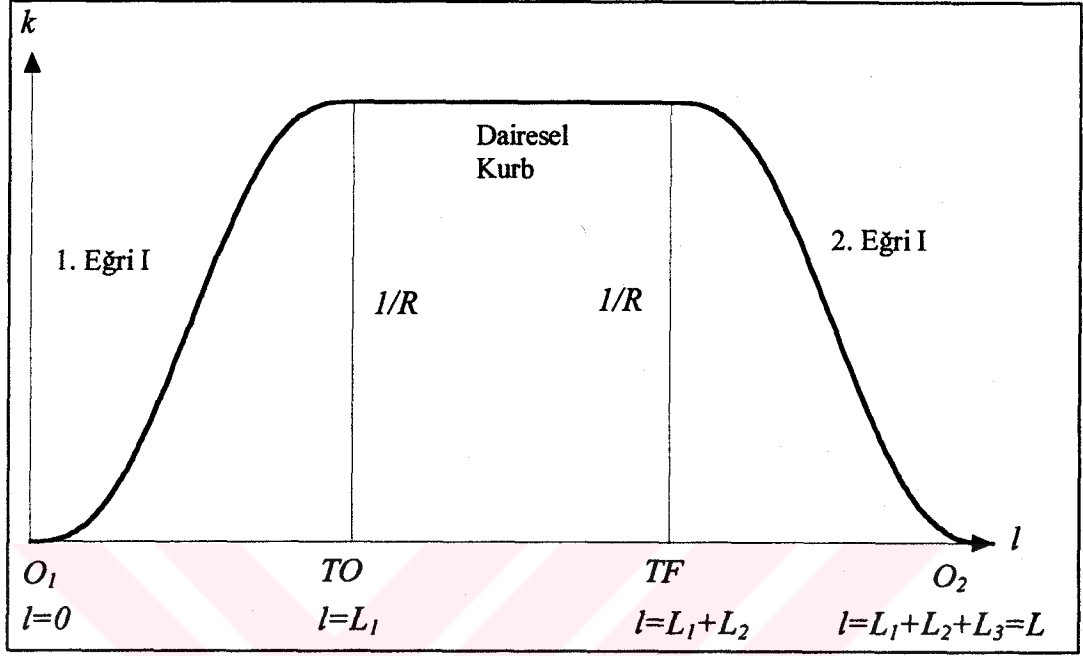
$$u_{1,1}(l) = \frac{u_{\max}}{L_1^3} l^3 \left(\frac{6l^2}{L_1^2} - \frac{15l}{L_1} + 10 \right) \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (4.9)$$

dairesel kurbun dever fonksiyonu,

$$u_{1,2}(l) = u_{\max} = \text{sabit} \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (4.10)$$

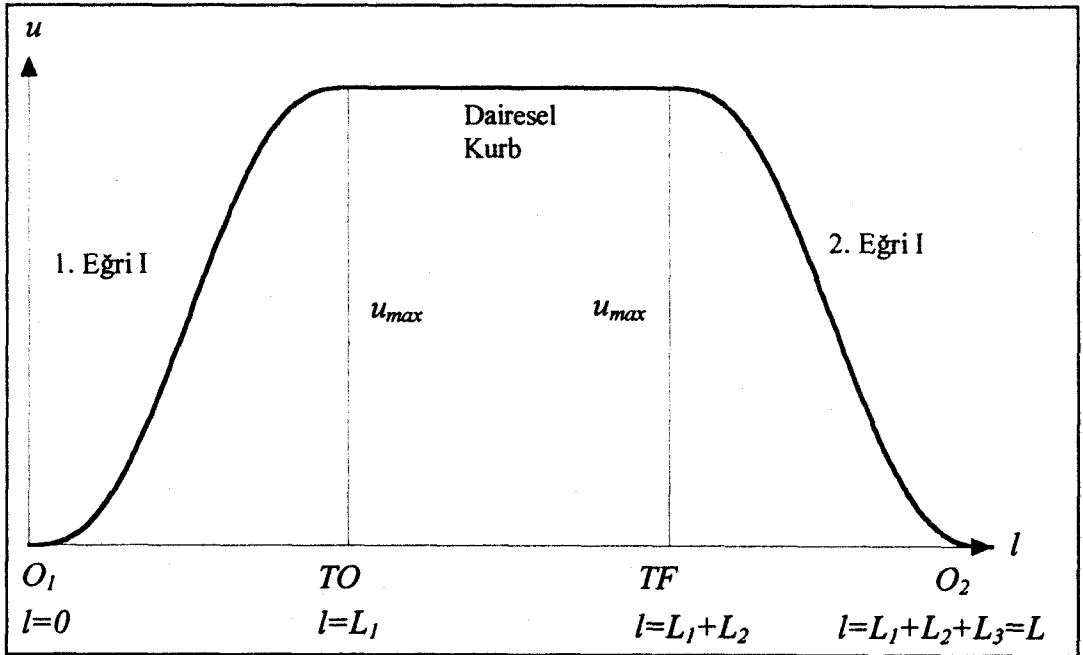
2. eğri I'in dever fonksiyonu

$$u_{1,3}(l) = \frac{u_{\max}(L-l)^3}{L_3^3} \left(\frac{6(L-l)^2}{L_3^2} - \frac{15(L-l)}{L_3} + 10 \right) \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (4.11)$$



Şekil 4.1. Eğri I Bileşik Eğrisinin Model Eğrilik Diyagramı

Eğri I bileşik eğrisinin model eğrilik ve dever diyagramları Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

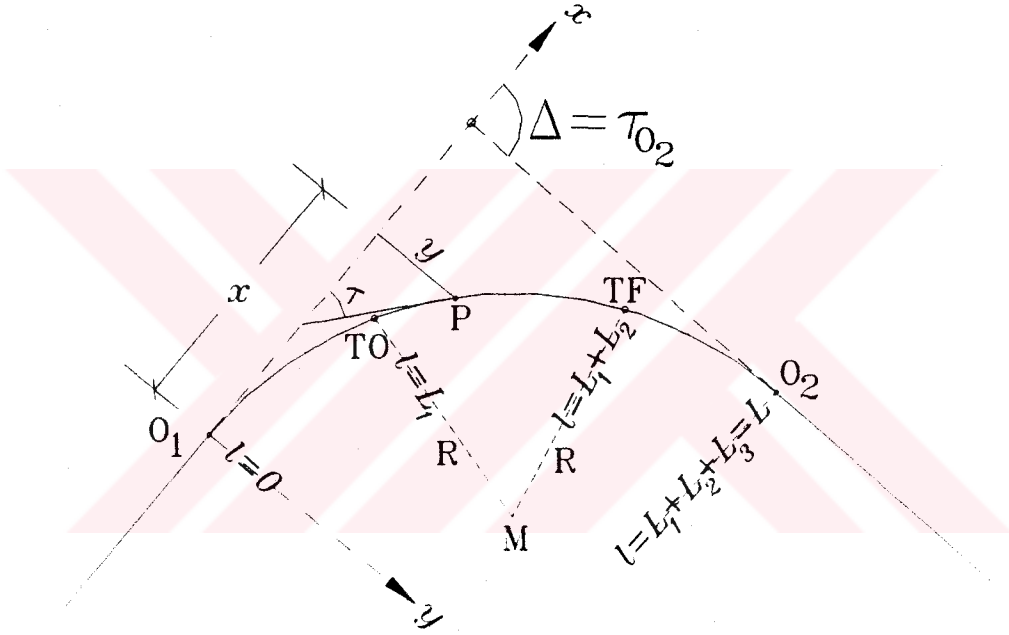


Şekil 4.2. Eğri I Bileşik Eğrisinin Model Dever Diyagramı

4.1.2. Eğri I bileşik eğrisinin aplikasyon elemanlarının hesabına ilişkin formülasyon

Eğri I bileşik eğrisinin aplikasyon elemanlarının hesaplanabilmesi için τ teğet açılarına ve x, y lokal dik koordinatlarına ilişkin hesap bağıntılarının bilinmesi zorunludur.

Bu çalışmada τ teğet açısı, l eğri uzunluğuna sahip herhangi bir bileşik eğri noktasına ait teğetin, O_1 noktasındaki ($l=0$) ana teğetle yaptığı açı olarak tanımlanacaktır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Eğri I Bileşik Eğrisinde τ Teğet Açıları ve x, y Lokal Dik Koordinatları

Sürekli tüm eğriler için

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau = \int_{l_1}^{l_2} k(l) dl \quad (4.12)$$

eşitliği geçerlidir (SCHUHR 1986, GURSCHKE 1992). Bu eşitlik eğri I bileşik eğrisine uygulanırsa aşağıdaki τ teğet açısı bağıntıları elde edilir.

1. eğri I için: Şekil 4.3 ve (4.5)'den

$$\int_0^l d\tau = \int_0^l k_{1,1}(l)dl, \quad \tau_{1,1}(l) = \frac{l^4}{RL_1^3} \left(\frac{l^2}{L_1^2} - \frac{3l}{L_1} + \frac{5}{2} \right), \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (4.13)$$

(4.13), $l=L_1$ için TO noktasına ait teğet açısını verir,

$$\tau_{TO} = \frac{L_1}{2R} \quad (4.14)$$

dairesel kurb için: Şekil 4.3 ve (4.6)'dan

$$\int_0^l d\tau = \int_0^{L_1} k_{1,1}(l)dl + \int_{L_1}^l k_{1,2}(l)dl, \quad \tau_{1,2}(l) = \frac{2l - L_1}{2R}, \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (4.15)$$

(4.15)'de $l=L_1+L_2$ konarak TF noktasına ait teğet açısı bulunur,

$$\tau_{TF} = \frac{L_1 + 2L_2}{2R} \quad (4.16)$$

2. eğri I için: Şekil 4.3 ve (4.8)'den

$$\int_0^l d\tau = \int_0^{L_1} k_{1,1}(l)dl + \int_{L_1}^{L_1+L_2} k_{1,2}(l)dl + \int_{L_1+L_2}^l k_{1,3}(l)dl, \quad (4.17)$$

$$\tau_{1,3}(l) = \frac{L_1 + 2L_2 + L_3}{2R} + \frac{(L-l)^4}{RL_3^3} \left(-\frac{(L-l)^2}{L_3^2} + \frac{3(L-l)}{L_3} - \frac{5}{2} \right), \quad L_1 + L_2 \leq l \leq L$$

(4.17)'den $l=L_1+L_2+L_3=L$ için O_2 noktasının teğet açısı elde edilir. Bu açı, Şekil 4.3'e göre Δ sapma açısına eşittir,

$$\tau_{O_2} = \Delta = \frac{L_1 + 2L_2 + L_3}{2R} = \frac{L + L_2}{2R} \quad (4.18)$$

(4.18) bağıntısı, Δ , L_1 , L_2 , L_3 , R ana büyüklükleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Aplikasyon elamanlarının hesaplanabilmesi için söz konusu ana büyüklüklerden herhangi dördünün tasarım sırasında belirlenmesi zorunludur.

Türetilen τ teğet açısı bağıntılarında açılar birimsiz (radyan) olarak ifade edilmiştir. Alışılmış grad birimine dönüştürmek için bağıntılardan hesaplanan değerler $\rho=200/\pi$ ile çarpılmalıdır.

Aplikasyon elemanlarına ilişkin hesaplar, l yay uzunluğu bilinen eğri noktalarının x, y lokal dik koordinatları bilinmeksizin yapılamaz. Bu çalışmada lokal koordinatların tümü Şekil 4.3'te gösterilmiş olan O_1 orijinli x, y koordinat sisteminde tanımlanacaktır.

Sürekli her eğri için geçerli olan

$$\int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{l_1}^{l_2} \cos \tau(l) dl, \quad \int_{y_1}^{y_2} dy = \int_{l_1}^{l_2} \sin \tau(l) dl, \quad (4.19)$$

eşitlikleri (MORLOK 1978, s.657-658, SCHUHR 1986, GURSCHKE 1992) eğri I bileşik eğrisine uygulanırsa aşağıdaki lokal dik koordinat denklemleri elde edilir.

1. eğri I için: (4.13) ve Şekil 4.3'den

$$x = \int_0^l \cos \left(\frac{l^6}{RL_1^5} - \frac{3l^5}{RL_1^4} + \frac{5l^4}{2RL_1^3} \right) dl, \quad y = \int_0^l \sin \left(\frac{l^6}{RL_1^5} - \frac{3l^5}{RL_1^4} + \frac{5l^4}{2RL_1^3} \right) dl, \quad 0 \leq l \leq L_1 \quad (4.20)$$

(4.20), $l=L_1$ sınır değeri için TO noktasının x_{TO}, y_{TO} koordinatlarını verir (Şekil 4.3).

Dairesel kurb için: (4.15) ve Şekil 4.3'den

$$x = x_{TO} + \int_{L_1}^l \cos \frac{2l - L_1}{2R} dl, \quad y = y_{TO} + \int_{L_1}^l \sin \frac{2l - L_1}{2R} dl, \quad L_1 \leq l \leq L_1 + L_2 \quad (4.21)$$

(4.21)'den $l=L_1+L_2$ sınır değeri için TF noktasının x_{TF}, y_{TF} koordinatları bulunur (Şekil 4.3).

2. eğri I için: (4.17) ve Şekil 4.3'den

$$x = x_{TF} + \int_{L_1+L_2}^l \cos \left(\frac{L_1 + 2L_2 + L_3}{2R} + \frac{1}{R} \left[-\frac{(L-l)^6}{L_3^5} + \frac{3(L-l)^5}{L_3^4} - \frac{5(L-l)^4}{2L_3^3} \right] \right) dl$$

$$y = y_{TF} + \int_{L_1+L_2}^l \sin \left(\frac{L_1 + 2L_2 + L_3}{2R} + \frac{1}{R} \left[-\frac{(L-l)^6}{L_3^5} + \frac{3(L-l)^5}{L_3^4} - \frac{5(L-l)^4}{2L_3^3} \right] \right) dl$$

$L_1 + L_2 \leq l \leq L$

(4.22)

(4.22)'den $l=L_1+L_2+L_3=L$ sınır değeri ile O_2 noktasının x_{O2}, y_{O2} koordinatları elde edilir (Şekil 4.3).

(4.20), (4.21) ve (4.22) integrallerinin elemanter çözümü yoktur (Fresnel İntegrali). Mc Laurin serisine açarak sonuca ulaşma olanağı varsa da en uygun çözüm sayısal integrasyon yöntemlerinden birinin uygulanmasıdır. Bu tür integrallerin hesabında Romberg integrasyon yöntemi salık verilmektedir (SHARPE ve THORNE 1982, SHOUP 1984, s.196, SCHUHR 1986, PRESS ve diğ. 1988, s.112, TARI 1996).

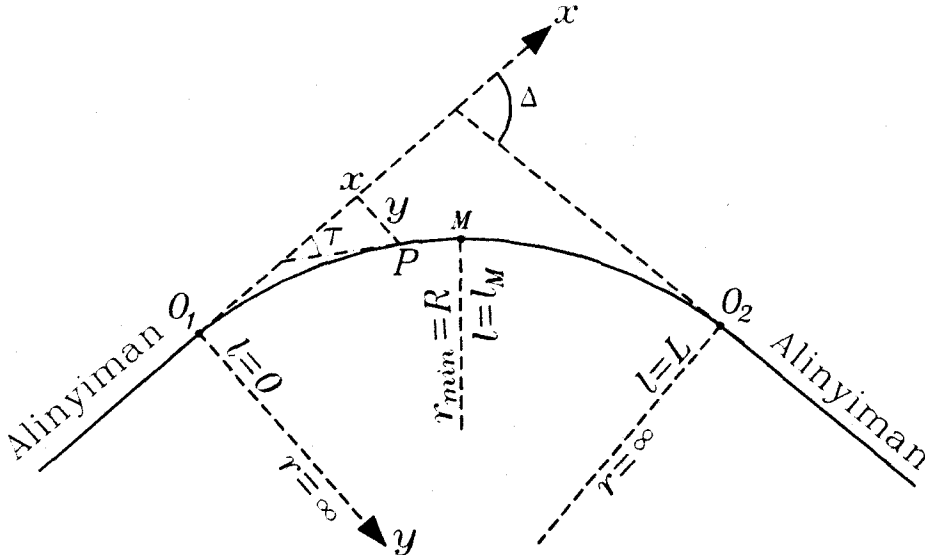
$L_1=600$ m, $L_2=600$ m, $L_3=600$ m, $R=1850$ m ana değerleri ve $\Delta l=200$ m için hesaplanan τ teğet açıları ve x,y lokal dik koordinatları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Eğri I Bileşik Eğrisinin τ Teğet Açıları ve x,y Lokal Dik Koordinatları

Km	τ (gon)	x (m)	y (m)
0	0.00000	0.000	0.000
200	0.41068	199.999	0.280
400	3.85186	399.896	5.896
600	10.32356	598.610	27.744
800	17.20594	793.858	70.631
1000	24.08832	983.339	134.333
1200	30.97069	1164.841	218.108
1400	37.44239	1336.395	320.743
1600	40.88358	1499.086	437.027
1800	41.29426	1658.635	557.626

4.2.Eğri II

Bu araştırmada önerilen ikinci eğri olan “Eğri II”, iki alinymanı tek bir elemanla birleştirmekte ve alinymanlara teğet olduğu noktalarda ikinci dereceden değme koşulunu sağlamaktadır. Böylece bir yandan geçki yatay geometrisi, yol-arac dinamiği



Şekil 4.4. Eğri II’nin Yatay Geometrisi

açısından iyileştirilirken diğer yandan geçki yatay geometrisinin tasarımı kolaylaştırılmaktadır. Eğri II'nin yatay geometrisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

4.2.1. Eğri II'nin eğrilik ve deyer fonksiyonları

Eğri II'nin model eğrilik fonksiyonunun

$$k(l) = al^7 + bl^6 + cl^5 + dl^4 + el^3 + fl^2 + gl + h \quad (4.23)$$

aşağıdaki sınır koşullarını sağlaması öngörülmüştür (Şekil 4.4).

$$l = 0 \Rightarrow k = 0, k' = 0, k'' = 0$$

$$l = L \Rightarrow k = 0, k' = 0, k'' = 0 \quad (4.24)$$

$$l = l_M \Rightarrow k = 1/R, k' = 0$$

(4.24)'de

l : O_1 başlangıç noktasına göre herhangi bir eğri noktasına ait eğri uzunluğu-doğal değişken,

L : O_1 ve O_2 noktaları arasındaki toplam eğri uzunluğu,

l_M : Maximum eğrilige sahip M noktası ile O_1 noktası arasındaki eğri uzunluğu,

R : M noktasındaki minimum eğrilik yarıçapıdır.

(4.24) sınır koşulları ve (4.23)'den aşağıdaki Eğri II eğrilik fonksiyonu elde edilir,

$$k_{II}(l) = \frac{1}{R} \left[a \left(\frac{l}{L} \right)^7 + b \left(\frac{l}{L} \right)^6 + c \left(\frac{l}{L} \right)^5 + d \left(\frac{l}{L} \right)^4 + e \left(\frac{l}{L} \right)^3 \right], \quad 0 \leq l \leq L \quad (4.25)$$

(4.25)'de

$$t = \frac{l}{L}, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.26)$$

değişken dönüşümü yapılırsa eğrilik fonksiyonu

$$k_{II}(t) = \frac{t^3}{R} (at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.27)$$

olur. (4.27)'nin katsayıları için

$$a = \frac{3(1-2q)}{(q-1)^4 q^4} \quad (4.28a)$$

$$b = \frac{7q^2 + 14q - 9}{(q-1)^4 q^4} \quad (4.28b)$$

$$c = \frac{(-7q^2 - 2q + 3)3}{(q-1)^4 q^4} \quad (4.28c)$$

$$d = \frac{3(7q^2 - 2q - 1)}{(q-1)^4 q^4} \quad (4.28d)$$

$$e = \frac{4-7q}{(q-1)^4 q^3} \quad (4.28e)$$

geçerli olup

$$q = \frac{l_M}{L} \quad (4.29)$$

dir. (4.28) katsayıları (4.27)'de yerine konursa Eğri II'nin eğrilik fonksiyonu

$$k_{II}(t, q) = \frac{(1-t)^3 t^3 (4q - 7q^2 - 3t + 6qt)}{R(q-1)^4 q^4}, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.30)$$

biçimini alır ve t değişkenine göre türevleri

$$k'(t) = \frac{3(1-t)^2 t^2 (4q - 7q^2 - 4t + 14q^2 t + 7t^2 - 14qt^2)}{R(q-1)^4 q^4} \quad (4.31)$$

$$k''(t) = \frac{6(t-1)t(-4q + 7q^2 + 6t + 8qt - 35q^2 t - 24t^2 + 28qt^2 + 35q^2 t^2 + 21t^3 - 42qt^3)}{R(q-1)^4 q^4} \quad (4.32)$$

olur. (4.24) değerleri (4.30), (4.31) ya da (4.32)'de yerine konarak tüm sınır koşullarının sağlandığı kolaylıkla kanıtlanabilir. Ancak bu sonuç yalnızca $0 \leq t \leq 1$ tanım aralığında t değişkeni için geçerlidir. Buna karşılık (4.30) eğrilik fonksiyonu iki değişkene sahiptir. İkinci değişken q, (4.29)'a göre maksimum eğriliğe sahip M noktasının konumunu belirlemektedir. Bu nedenle $0 \leq t \leq 1$ tanım aralığında kalan ve (4.24) sınır koşullarını sağlayan q değerlerinin de araştırılması zorunludur (iki değişkenli fonksiyonlarda minimum ve maksimum problemi). SOKOLNIKOFF ve REDHEFFER (1966, s.339) ve THOMAS ve FINNEY (1992, s.882-883)'e göre (4.27) eğrilik fonksiyonu, yalnızca

$$q = \frac{l_M}{L} = \frac{3}{7} \cong 0.4285714286 \quad (4.33)$$

değeri için geçerlidir.

(4.33) değeri (4.28)'de yerine konarak

$$a = e = \frac{823543}{6912} \quad (4.34a)$$

$$b = d = -\frac{823543}{1728} \quad (4.34b)$$

$$c = \frac{823543}{1152} \quad (4.34c)$$

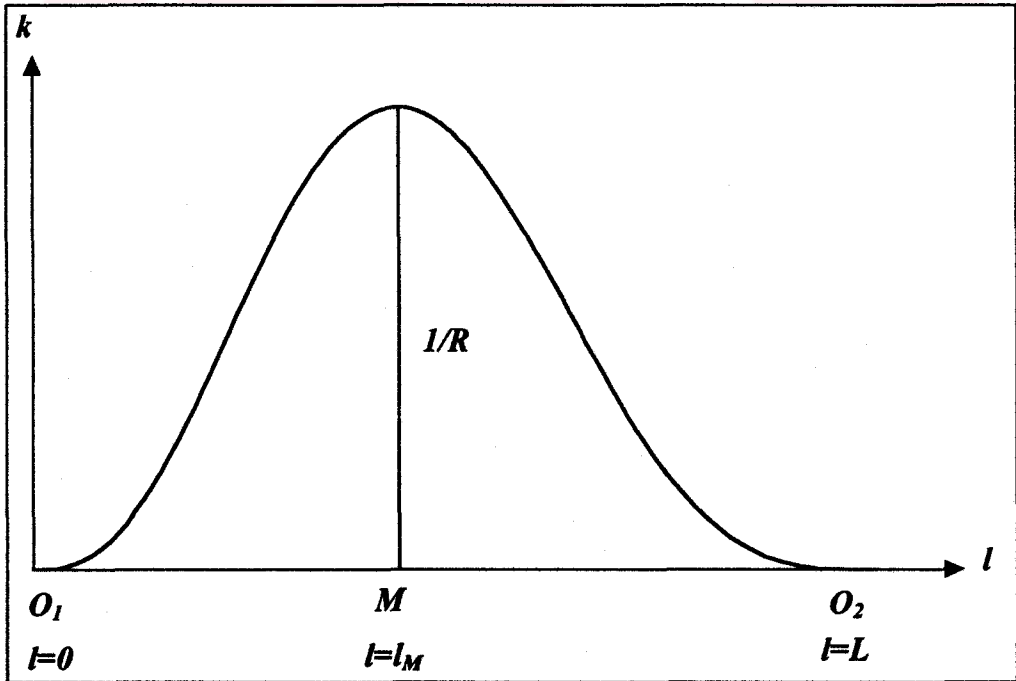
katsayıları elde edilir. (4.27) ve (4.34)'den eğri II'nin eğrilik fonksiyonu elde edilir,

$$k_{II}(t) = \frac{823543}{6912R} (t^7 - 4t^6 + 6t^5 - 4t^4 + t^3), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.35)$$

Eğri II'nin dever fonksiyonu, (4.23)'e benzer model dever fonksiyonu ve (4.24)'e benzer sınır koşullarından yola çıkılarak türetilir,

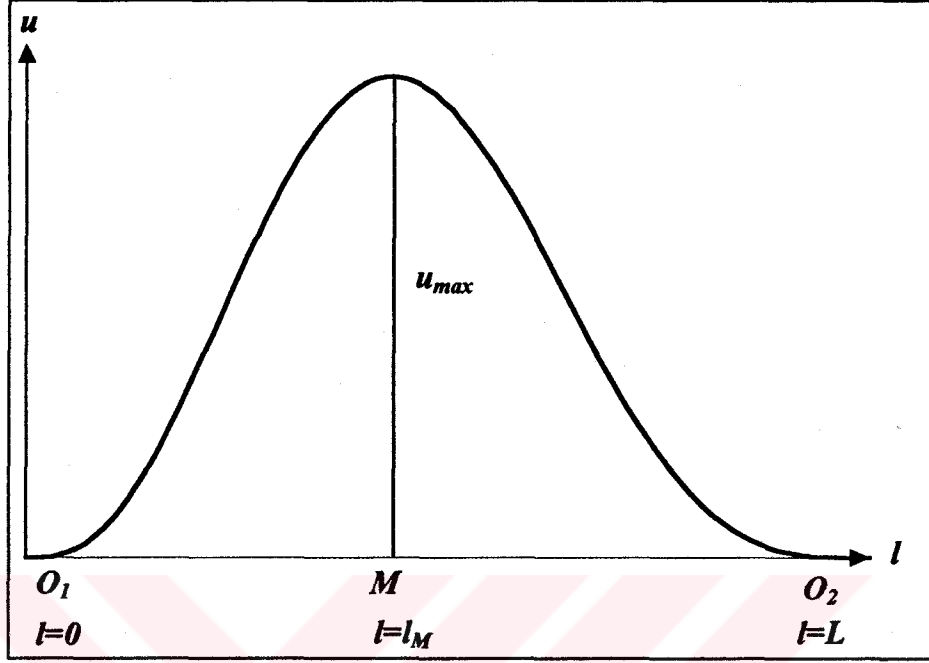
$$u_{II}(t) = \frac{823543u_{\max}}{6912} (t^7 - 4t^6 + 6t^5 - 4t^4 + t^3), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.36)$$

Burada $u_{\max}$, M noktasındaki maksimum deverdir.



Şekil 4.5. Eğri II'nin Model Eğrilik Diyagramı

Eğri II'nin model eğrilik ve dever diyagramları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6. Eğri II'nin Model Dever Diyagramı

4.2.2. Eğri II'nin aplikasyon elemanlarının hesabına ilişkin formülasyon

Eğri II'nin aplikasyon elemanlarının hesaplanabilmesi için istenen her eğri noktasında τ teğet açısının ve x, y lokal dik koordinatlarının hesaplanması zorunludur.

Eğri I'de olduğu gibi eğri II'de de τ teğet açıları, O_1 noktasına ait ana teğete göre tanımlanacaktır (Şekil 4.4). (4.26) değişken dönüşümü dikkate alınarak (4.12) ve (4.35)'den

$$\tau_{II}(t) = \frac{823543L}{6912R} \left(\frac{t^8}{8} - \frac{4t^7}{7} + t^6 - \frac{4t^5}{5} + \frac{t^4}{4} \right), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.37)$$

bulunur. (4.37) bağıntısı, $t=1$ ($l=L$) için Δ sapma açısını verir (Şekil 4.4),

$$\Delta = \frac{117649}{276480} \frac{L}{R} \cong 0.42552444502 \frac{L}{R} \quad (4.38)$$

(4.38) bağıntısı, eğri II'nin ana büyüklükleri olan L , R , Δ arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Aplikasyon hesaplarının yapılabilmesi için bu ana büyüklüklerden herhangi ikisi tasarım sırasında belirlenmelidir.

Aplikasyon elemanlarının hesaplanabilmesi için l yay uzunluğu bilinen eğri noktalarının x,y lokal dik koordinatlarının bilinmesi gerekir. x,y lokal dik koordinatları için Şekil 4.4'te tanımlanmış olan dik koordinat sistemi geçerlidir.

(4.19) ve (4.37)'den (4.26) değişken dönüşümü dikkate alınarak

$$\begin{aligned} x &= L \int_0^t \cos \left[\frac{823543L}{6912R} \left(\frac{t^8}{8} - \frac{4t^7}{7} + t^6 - \frac{4t^5}{5} + \frac{t^4}{4} \right) \right] dt \\ y &= L \int_0^t \sin \left[\frac{823543L}{6912R} \left(\frac{t^8}{8} - \frac{4t^7}{7} + t^6 - \frac{4t^5}{5} + \frac{t^4}{4} \right) \right] dt \end{aligned} \quad (4.39)$$

yazılabilir. Fresnel integrali yapısındaki bu eşitliklerin çözümünde en uygun yol Romberg integrasyon yöntemidir (SHARPE ve THORNE 1982, SCHUHR 1986, PRESS ve diğ. 1988, s.112, TARI 1996).

$L=1800$ m, $R=1850$ m, $\Delta l=200$ m için hesaplanan τ teğet açıları ve x,y lokal dik koordinatları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Eğri II'nin τ Teğet Açıları ve x,y Lokal Dik Koordinatları

Km	τ (gon)	x (m)	y (m)
0	0.00000	0.000	0.000
200	0.19425	200.000	0.130
400	2.08122	399.972	3.016
600	6.81738	599.486	16.263
800	13.44375	796.904	47.717
1000	19.77160	989.963	99.633
1200	24.03958	1177.980	167.708
1400	25.92291	1362.563	244.688
1600	26.33888	1545.861	324.697
1800	26.35757	1728.967	405.147

BÖLÜM 5. HAREKET MODELLERİ VE YANAL SADEME FONKSİYONLARI

(2.11) yanal sademe genel bağıntısından yararlanarak Bölüm 3 ve Bölüm 4'te açıklanan eğrilerin yanal sademe fonksiyonlarını türetebilmek için taşıt hareketinin de modellenmesi gerekmektedir. Literatürdeki eğri karşılaştırmaları çoğunlukla, sabit hızlı hareket modeline göre yapılmaktadır (O'FLAHERTY 1986, s.387, ESVELD 1989, s.23).

Bu çalışmanın izleyen bölümlerinde ise

- a) sabit hızlı hareket modeli,
- b) sabit pozitif ivmeli hareket modeli,
- c) sabit negatif ivmeli hareket modeli,

formüle edildikten sonra eğrilerin yanal sademe fonksiyonları türetilecektir.

5.1.Sabit Hızlı Hareket Modelinde Yanal Sademe Fonksiyonları

Sabit hızlı hareket modeli için

$$v = v(l) = \text{sabit}, \quad a_t = 0 \quad (5.1)$$

geçerlidir.

5.1.1.Sabit hızlı hareket modelinde klotoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. klotoid: (4.26) değişken dönüşümü yapılırsa (3.4) ve (3.9)'dan

$$k_{k,1}(t) = \frac{L}{L_1 R} t, \quad u_{k,1}(t) = \frac{L u_{\max}}{L_1} t, \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.2)$$

bulunur. Bunların l değişkenine göre türevleri

$$\frac{dk}{dl} = \frac{dk}{dt} \frac{dt}{dl} = \frac{1}{L_1 R}, \quad \frac{du}{dl} = \frac{du}{dt} \frac{dt}{dl} = \frac{u_{\max}}{L_1} \quad (5.3)$$

olur. (5.1), (5.2) ve (5.3) eşitlikleri (2.11)'de yerine konarak 1. klotoidin yanal sademe fonksiyonu elde edilir,

$$z_{k,1}(t) = \frac{L_1^2 v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{L^3 R(t^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_1^2}{L^2})^{3/2}}, \quad 0 \leq t < \frac{L_1}{L} \quad (5.4)$$

Burada

$$\tan \alpha_m = \frac{u_{\max}}{b} \quad (5.5)$$

dir.

Dairesel kurb: (3.5) ve (3.10)'a (4.26) değişken dönüşümü uygulanarak

$$k_{k,2}(t) = \frac{1}{R} = \text{sabit}, \quad u_{k,2}(t) = u_{\max} = \text{sabit} \quad (5.6)$$

elde edilir. (5.6)'nın l değişkenine göre türevleri

$$k' = 0, \quad u' = 0 \quad (5.7)$$

dir. (5.1), (5.6) ve (5.7) eşitlikleri (2.11)'de yerine konursa daireysel kurbun yanal sademe fonksiyonu

$$z_{k,2}(t) = 0, \quad \frac{L_1}{L} \leq t < \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.8)$$

olur.

2. klotoid: (3.8) ve (3.11)'den (4.26) değişken dönüşümü ile

$$k_{k,3}(t) = \frac{L(1-t)}{RL_3}, \quad u_{k,3}(t) = \frac{u_{\max} L(1-t)}{L_3}, \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.9)$$

bulunur. (5.9) eşitliklerinin l değişkenine göre türevleri

$$\frac{dk}{dl} = -\frac{1}{RL_3}, \quad \frac{du}{dl} = -\frac{u_{\max}}{L_3} \quad (5.10)$$

olur. (5.1), (5.9) ve (5.10) ile (2.11) ve (5.5)'den 2. klotoide ait yanal sademe fonksiyonuna ulaşılır,

$$z_{k,3}(t) = -\frac{L_3^2 v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{L^3 R \{(1-t)^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_3^2}{L^2}\}^{3/2}}, \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t < 1 \quad (5.11)$$

5.1.2. Sabit hızlı hareket modelinde Bloss bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. Bloss eğrisi: (3.16) ve (3.21)'de (4.26) değişken dönüşümü yapılarak

$$k_{b,1}(t) = \frac{1}{R} \left(\frac{3L^2 t^2}{L_1^2} - \frac{2L^3 t^3}{L_1^3} \right), \quad u_{b,1}(t) = u_{\max} \left(\frac{3L^2 t^2}{L_1^2} - \frac{2L^3 t^3}{L_1^3} \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.12)$$

ve (5.12)'nin l değişkenine göre türevleri alınarak

$$\frac{dk}{dl} = \frac{6}{R} \left(\frac{Lt}{L_1^2} - \frac{L^2 t^2}{L_1^3} \right), \quad \frac{du}{dl} = 6u_{\max} \left(\frac{Lt}{L_1^2} - \frac{L^2 t^2}{L_1^3} \right) \quad (5.13)$$

eşitlikleri elde edilir. (5.1), (5.12) ve (5.13) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) dikkate alınırsa 1. Bloss eğrisinin yanal sademe fonksiyonu

$$z_{b,1}(t) = \frac{N_{b,1} v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{R(1 + Q_{b,1}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.14)$$

olur. Burada

$$Q_{b,1} = \frac{3L^2 t^2}{L_1^2} - \frac{2L^3 t^3}{L_1^3}, \quad N_{b,1} = \frac{6Lt}{L_1^2} - \frac{6L^2 t^2}{L_1^3} \quad (5.15)$$

dir.

Dairesel kurb: (5.1), (5.6) ve (5.7) eşitlikleri geçerli olduğundan

$$z_{b,2}(t) = 0 \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.16)$$

bulunur.

2. Bloss eğrisi: (4.26) değişken dönüşümünün (3.20) ve (3.23)'e uygulanmasından

$$k_{b,3}(t) = \frac{1}{R} \left(\frac{3L^2(1-t)^2}{L_3^2} - \frac{2L^3(1-t)^3}{L_3^3} \right),$$

$$u_{b,3}(t) = u_{\max} \left(\frac{3L^2(1-t)^2}{L_3^2} - \frac{2L^3(1-t)^3}{L_3^3} \right) \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.17)$$

ve (5.17)'nin türevlerinden

$$\frac{dk}{dl} = \frac{1}{R} \left(-\frac{6L(1-t)}{L_3^2} + \frac{6L^2(1-t)^2}{L_3^3} \right), \quad \frac{du}{dl} = u_{\max} \left(-\frac{6L(1-t)}{L_3^2} + \frac{6L^2(1-t)^2}{L_3^3} \right) \quad (5.18)$$

elde edilir. (5.1), (5.17) ve (5.18) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) uygulanırsa 2. Bloss eğrisinin yanal sademe fonksiyonu

$$z_{b,3}(t) = \frac{N_{b,2} v (v^2 - gR \tan \alpha_m)}{R(1 + Q_{b,2}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.19)$$

olur. (5.19)'da

$$Q_{b,2} = \frac{3L^2(1-t)^2}{L_3^2} - \frac{2L^3(1-t)^3}{L_3^3}, \quad N_{b,2} = \frac{6L^2(1-t)^2}{L_3^3} - \frac{6L(1-t)}{L_3^2} \quad (5.20)$$

geçerlidir.

5.1.3. Sabit hızlı hareket modelinde sinüzoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. sinüzoid eğrisi: (3.27) ve (3.32)'de (4.26) değişken dönüşümü

$$k_{s,1}(t) = \frac{1}{R} \left(\frac{Lt}{L_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{Lt}{L_1} 2\pi\right) \right), \quad u_{s,1}(t) = u_{\max} \left(\frac{Lt}{L_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{Lt}{L_1} 2\pi\right) \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.21)$$

sonucunu verir. (5.21)'in l değişkenine göre türevleri

$$\frac{dk}{dl} = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_1} \cos\left(\frac{Lt}{L_1} 2\pi\right) \right], \quad \frac{du}{dl} = u_{\max} \left[\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_1} \cos\left(\frac{Lt}{L_1} 2\pi\right) \right] \quad (5.22)$$

olur. (5.1), (5.21) ve (5.22) ile (2.11) ve (5.5)'den 1. sinüzoid eğrisinin yanal sademe fonksiyonuna ulaşılır,

$$z_{s,1}(t) = \frac{N_{s,1} v (v^2 - gR \tan \alpha_m)}{R(1 + Q_{s,1}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.23)$$

Burada

$$\begin{aligned} Q_{s,1} &= \frac{Lt}{L_1} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{Lt}{L_1} 2\pi\right) \\ N_{s,1} &= \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_1} \cos\left(\frac{Lt}{L_1} 2\pi\right) \end{aligned} \quad (5.24)$$

kısaltmaları yapılmıştır.

Dairesel kurb: (5.1), (5.6) ve (5.7) geçerli olduğundan

$$z_{s,2}(t) = 0 \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.25)$$

olur.

2. sinüzoid eğrisi: (3.31) ve (3.34)'te yapılan (4.26) değişken dönüşümü ile

$$\begin{aligned} k_{s,3}(t) &= \frac{1}{R} \left[\frac{L - Lt}{L_3} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{L - Lt}{L_3} 2\pi\right) \right], \\ u_{s,3}(t) &= u_{\max} \left[\frac{L - Lt}{L_3} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{L - Lt}{L_3} 2\pi\right) \right] \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \end{aligned} \quad (5.26)$$

bulunur ve l değişkenine göre türevler

$$\frac{dk}{dl} = \frac{1}{R} \left[-\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_3} \cos\left(\frac{L - Lt}{L_3} 2\pi\right) \right], \quad \frac{du}{dl} = u_{\max} \left[-\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_3} \cos\left(\frac{L - Lt}{L_3} 2\pi\right) \right] \quad (5.27)$$

olur. (5.1), (5.26) ve (5.27) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) uygulanırsa 2. sinüzoid eğrisinin yanal sademe fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilir,

$$z_{s,3}(t) = \frac{N_{s,2} v (v^2 - gR \tan \alpha_m)}{R (1 + Q_{s,2}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.28)$$

(5.28)'de

$$Q_{s,2} = \frac{L - Lt}{L_3} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{L - Lt}{L_3} 2\pi\right), \quad N_{s,2} = -\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_3} \cos\left(\frac{L - Lt}{L_3} 2\pi\right) \quad (5.29)$$

dir.

5.1.4.Sabit hızlı hareket modelinde Eğri I bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. eğri I: (4.5) ve (4.9) eşitliklerine (4.26) uygulanarak

$$\begin{aligned} k_{1,1}(t) &= \frac{L^3}{RL_1^3} \left(\frac{6L^2t^5}{L_1^2} - \frac{15Lt^4}{L_1} + 10t^3 \right), \\ u_{1,1}(t) &= \frac{u_{\max} L^3}{L_1^3} \left(\frac{6L^2t^5}{L_1^2} - \frac{15Lt^4}{L_1} + 10t^3 \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \end{aligned} \quad (5.30)$$

ve (5.30)'un türevlerinden

$$\frac{dk}{dt} = \frac{L^2}{RL_1^3} \left(\frac{30L^2t^4}{L_1^2} - \frac{60Lt^3}{L_1} + 30t^2 \right), \quad \frac{du}{dt} = \frac{u_{\max} L^2}{L_1^3} \left(\frac{30L^2t^4}{L_1^2} - \frac{60Lt^3}{L_1} + 30t^2 \right) \quad (5.31)$$

elde edilir. (5.1), (5.30) ve (5.31) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) dikkate alınır 1. eğri I'in yanal sademe fonksiyonuna ulaşılır,

$$z_{1,1}(t) = \frac{N_{1,1}v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{R(1 + Q_{1,1}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.32)$$

(5.32)'de

$$Q_{1,1} = \frac{6L^5t^5}{L_1^5} - \frac{15L^4t^4}{L_1^4} + \frac{10L^3t^3}{L_1^3}, \quad N_{1,1} = \frac{30L^4t^4}{L_1^5} - \frac{60L^3t^3}{L_1^4} + \frac{30L^2t^2}{L_1^3} \quad (5.33)$$

kısaltmaları yapılmıştır.

Dairesel kurb: (5.1), (5.6) ve (5.7) geçerli olduğundan

$$z_{1,2}(t) = 0, \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.34)$$

olur.

2. eğri I: (4.26) değişken dönüşümü, (4.8) ve (4.11)'e uygulanırsa

$$\begin{aligned} k_{1,3}(t) &= \frac{1}{R} \left[\frac{6(L-Lt)^5}{L_3^5} - \frac{15(L-Lt)^4}{L_3^4} + \frac{10(L-Lt)^3}{L_3^3} \right] \\ u_{1,3}(t) &= u_{\max} \left[\frac{6(L-Lt)^5}{L_3^5} - \frac{15(L-Lt)^4}{L_3^4} + \frac{10(L-Lt)^3}{L_3^3} \right] \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \end{aligned} \quad (5.35)$$

ve (5.35)'in türevleri

$$\begin{aligned}\frac{dk}{dl} &= \frac{1}{R} \left[-\frac{30(L-Lt)^4}{L_3^5} + \frac{60(L-Lt)^3}{L_3^4} - \frac{30(L-Lt)^2}{L_3^3} \right] \\ \frac{du}{dl} &= u_{\max} \left[-\frac{30(L-Lt)^4}{L_3^5} + \frac{60(L-Lt)^3}{L_3^4} - \frac{30(L-Lt)^2}{L_3^3} \right]\end{aligned}\quad (5.36)$$

sonucunu verir. (5.1), (5.35) ve (5.36) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) uygulanırsa 2. eğri I'in yanal sademe fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilir,

$$z_{I,3}(t) = \frac{N_{I,2} v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{R(1 + Q_{I,2}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.37)$$

Burada

$$\begin{aligned}Q_{I,2} &= \frac{6(L-Lt)^5}{L_3^5} - \frac{15(L-Lt)^4}{L_3^4} + \frac{10(L-Lt)^3}{L_3^3} \\ N_{I,2} &= -\frac{30(L-Lt)^4}{L_3^5} + \frac{60(L-Lt)^3}{L_3^4} - \frac{30(L-Lt)^2}{L_3^3}\end{aligned}\quad (5.38)$$

dir.

5.1.5.Sabit hızlı hareket modelinde Eğri II'nin yanal sademe fonksiyonu

Eğri II, iki alinymanı tek bir elemanla birleştirdiğinden, bu eğrinin sabit hızlı hareket modelindeki yanal sademe fonksiyonu yalnızca bir eşitlikten oluşur.

(4.35) ve (4.36)'nın l değişkenine göre türevleri

$$\begin{aligned}\frac{dk}{dl} &= \frac{823543}{6912LR} (7t^6 - 24t^5 + 30t^4 - 16t^3 + 3t^2) \\ \frac{du}{dl} &= \frac{823543u_{\max}}{6912L} (7t^6 - 24t^5 + 30t^4 - 16t^3 + 3t^2)\end{aligned}\quad (5.39)$$

dir. (5.1), (4.35), (4.36) ve (5.39) eşitlikleri (2.11)'de yerine konursa (5.5) dikkate alınarak eğri II'nin yanal sademe fonksiyonu

$$z_{II}(t) = \frac{N_{II} v(v^2 - gR \tan \alpha_M)}{LR(1 + Q_{II}^2 \tan^2 \alpha_M)^{3/2}} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5.40)$$

olur. Burada

$$Q_{II} = \frac{823543}{6912}(t^7 - 4t^6 + 6t^5 - 4t^4 + t^3)$$

$$N_{II} = \frac{823543}{6912}(7t^6 - 24t^5 + 30t^4 - 16t^3 + 3t^2)$$
(5.41)

dir.

Eğrilerin sabit hızlı hareket modelindeki yanal sademe diyagramları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Diyagramların çizilmesinde aşağıdaki büyüklükler kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.1 ve Şekil 4.4):

Bileşik eğrilerde 1. ve 2. geçiş eğrilerinin ve dairesel kurbun yay uzunlukları: $L_1=L_2=L_3=600$ m

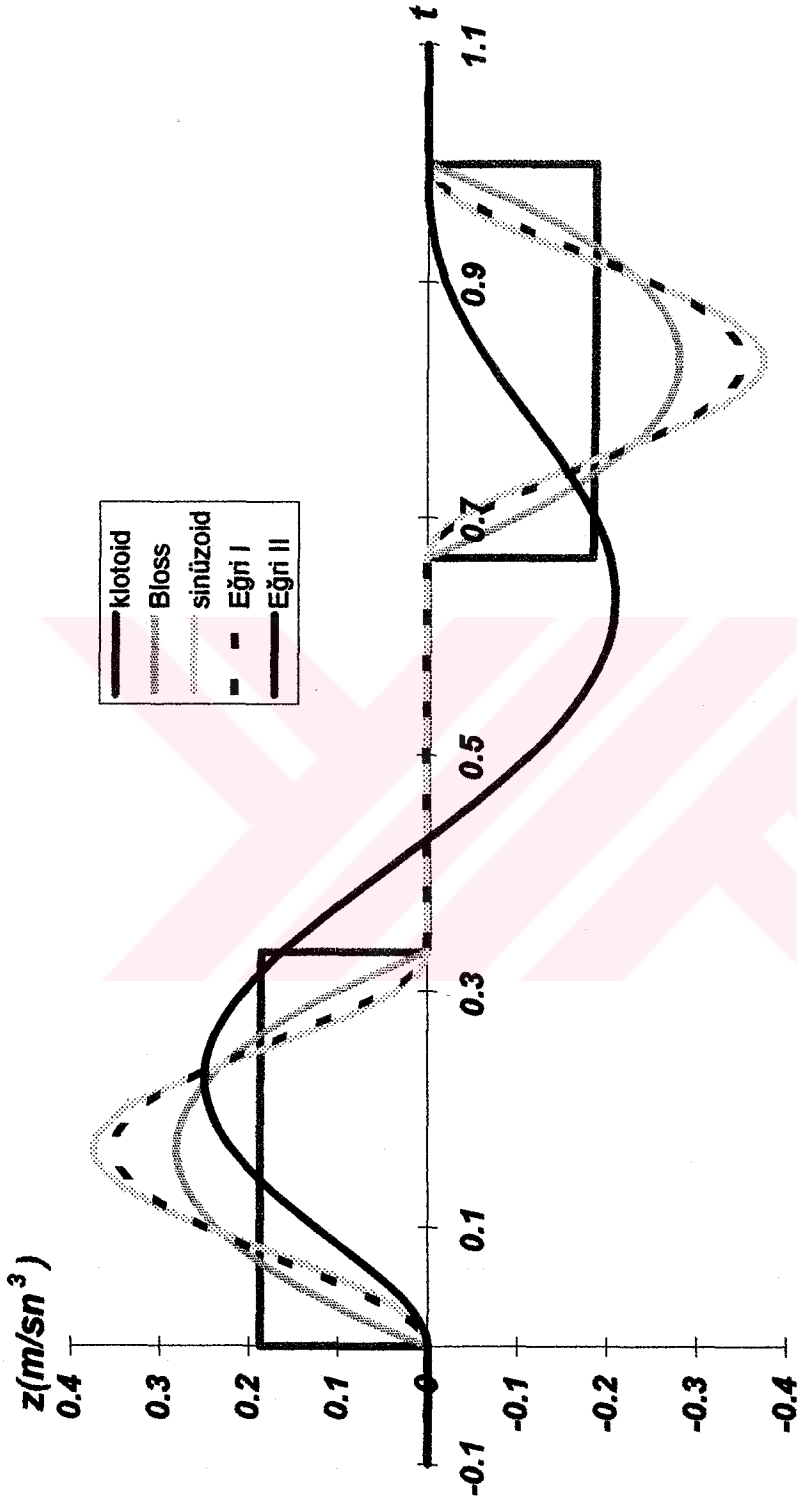
Dairesel kurb yarıçapı ve eğri II için minimum eğrilik yarıçapı: $R=1850$ m

Bileşik eğrilerde toplam eğri uzunluğu ve eğri II'nin uzunluğu: $L=1800$ m

Maksimum dever: $u_{max}=0.15$ m

Yol platformunun yatay genişliği (demiryollarında): $b=1.5$ m

Sabit taşıt hızı $v=250$ km/h



Şekil 5.1. Eğrilerin Sabit Hızlı Hareket Modelinde Yanal Sademe Diyagramları ($v=250$ km/h)

5.2.Sabit Pozitif ve Sabit Negatif İvmeli Hareket Modellerinde Yanal Sademe Fonksiyonları

Sabit ivmeli hareket modelinde tüm eğri boyunca $a_t = \text{sabit}$ olduğu varsayılacaktır. O_1 eğri başlangıç noktasında ($t=0$) hızın v_0 ve O_2 eğri bitim noktasında ($t=1$) hızın v_e olduğu kabul edildiğinde aşağıdaki hız ve ivme bağıntıları geçerli olur,

$$v(t) = v_0 + (v_e - v_0)t \quad a_t = \frac{v_e^2 - v_0^2}{2L} = \text{sabit} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5.42)$$

(5.42)'ye göre $v_e > v_0$ olması durumunda pozitif ivmeli ($a_t > 0$), $v_e < v_0$ olması durumunda negatif ivmeli ($a_t < 0$) hareket elde edilir. Pozitif ivmeli hareket modelinin dikkate alınmasının nedeni, en olumsuz hareket koşullarında değerlendirmelerin yapılabilmesini sağlamaktır. İzleyen bölümlerde türetilen yanal sademe fonksiyonları her iki hareket modeli için geçerlidir.

5.2.1.Sabit ivmeli hareket modelinde klotoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. klotoid: (5.42), (5.2), (5.3) ve (5.5) eşitlikleri (2.11)'de yerine konarak 1. klotoidin yanal sademe fonksiyonu elde edilir,

$$z_{k,1}(t) = \frac{v}{LR} \left(\frac{L_1^2 (v^2 - gR \tan \alpha_m)}{L^2 \left(t^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_1^2}{L^2} \right)^{3/2}} + \frac{3(v_e^2 - v_0^2)t}{2 \left(t^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_1^2}{L^2} \right)^{1/2}} \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.43)$$

Dairesel kurb: (5.42), (5.6) ve (5.7) eşitlikleri (2.11)'de yerine konursa daireysel kurbun yanal sademe fonksiyonu

$$z_{k,2}(t) = \frac{v}{LR} \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_m)^{1/2}} \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.44)$$

olur.

2. klotoid: (5.42), (5.9) ve (5.10) ile (2.11) ve (5.5)'den 2. klotoidde ait yanal sademe fonksiyonuna ulaşılır,

$$z_{t,3}(t) = \frac{v}{LR} \left\{ -\frac{L_3^2(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{L^2 \left[(1-t)^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_3^2}{L^2} \right]^{3/2}} + \frac{3(v_e^2 - v_0^2)(1-t)}{2 \left[(1-t)^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_3^2}{L^2} \right]^{1/2}} \right\} \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.45)$$

5.2.2. Sabit ivmeli hareket modelinde Bloss bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. Bloss eğrisi: (5.42), (5.12) ve (5.13) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) dikkate alınırsa 1. Bloss eğrisinin yanal sademe fonksiyonu

$$z_{b,1}(t) = \frac{v}{2LR(1 + Q_{b,1}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \left(2LN_{b,1}(v^2 - gR \tan \alpha_m) + 3Q_{b,1}(v_e^2 - v_0^2)(1 + Q_{b,1}^2 \tan^2 \alpha_m) \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.46)$$

olur. Burada $Q_{b,1}$ ve $N_{b,1}$ için (5.15) eşitlikleri geçerlidir.

Dairesel kurb: (5.42), (5.6) ve (5.7) eşitlikleri geçerli olduğundan

$$z_{b,2}(t) = \frac{v}{LR} \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_m)^{1/2}} \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.47)$$

bulunur.

2. Bloss eğrisi: (5.42), (5.17) ve (5.18) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) uygulanırsa 2. Bloss eğrisinin yanal sademe fonksiyonu

$$z_{b,3}(t) = \frac{v}{2LR(1 + Q_{b,2}^2 \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} \left(2LN_{b,2}(v^2 - gR \tan \alpha_m) + 3Q_{b,2}(v_e^2 - v_0^2)(1 + Q_{b,2}^2 \tan^2 \alpha_m) \right) \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.48)$$

olur. (5.48)'de $Q_{b,2}$ ve $N_{b,2}$ için (5.20) eşitlikleri geçerlidir.

5.2.3.Sabit ivmeli hareket modelinde sinüzoid bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. sinüzoid eğrisi: (5.42), (5.21) ve (5.22) ile (2.11) ve (5.5)'den 1. sinüzoid eğrisinin yanal sademe fonksiyonuna ulaşılır,

$$z_{s,1}(t) = \frac{v}{R\sqrt{1+Q_{s,1}^2 \tan^2 \alpha_m}} \left(\frac{N_{s,1}(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{1+Q_{s,1}^2 \tan^2 \alpha_m} + \frac{3Q_{s,1}(v_e^2 - v_0^2)}{2L} \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.49)$$

Burada $Q_{s,1}$ ve $N_{s,1}$ için (5.24) eşitlikleri geçerlidir.

Dairesel kurb: (5.42), (5.6) ve (5.7) geçerli olduğundan

$$z_{s,2}(t) = \frac{v}{LR} \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_m)^{1/2}} \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.50)$$

olur.

2. sinüzoid eğrisi: (5.42), (5.26) ve (5.27) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) uygulanırsa 2. sinüzoid eğrisinin yanal sademe fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilir,

$$z_{s,3}(t) = \frac{v}{R\sqrt{1+Q_{s,2}^2 \tan^2 \alpha_m}} \left(\frac{N_{s,2}(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{1+Q_{s,2}^2 \tan^2 \alpha_m} + \frac{3Q_{s,2}(v_e^2 - v_0^2)}{2L} \right) \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.51)$$

(5.51)'de $Q_{s,2}$ ve $N_{s,2}$ için (5.29) eşitlikleri geçerlidir.

5.2.4.Sabit ivmeli hareket modelinde Eğri I bileşik eğrisinin yanal sademe fonksiyonları

1. eğri I: (5.42), (5.30) ve (5.31) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) dikkate alınırsa 1. eğri I'in yanal sademe fonksiyonuna ulaşılır,

$$z_{l,1}(t) = \frac{v}{R\sqrt{1+Q_{l,1}^2 \tan^2 \alpha_m}} \left(\frac{N_{l,1}(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{1+Q_{l,1}^2 \tan^2 \alpha_m} + \frac{3Q_{l,1}(v_e^2 - v_0^2)}{2L} \right) \quad 0 \leq t \leq \frac{L_1}{L} \quad (5.52)$$

(5.52)'de $Q_{l,1}$ ve $N_{l,1}$ için (5.33) eşitlikleri geçerlidir.

Dairesel kurb: (5.42), (5.6) ve (5.7) geçerli olduğundan

$$z_{12}(t) = \frac{v}{LR} \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_m)^{1/2}} \quad \frac{L_1}{L} \leq t \leq \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (5.53)$$

olur.

2. **eğri I:** (5.42), (5.35) ve (5.36) eşitlikleri (2.11)'de yerine konur ve (5.5) uygulanırsa 2. eğri I'in yanal sademe fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilir,

$$z_{13}(t) = \frac{v}{R\sqrt{1 + Q_{12}^2 \tan^2 \alpha_m}} \left(\frac{N_{12}(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{1 + Q_{12}^2 \tan^2 \alpha_m} + \frac{3Q_{12}(v_e^2 - v_0^2)}{2L} \right) \quad \frac{L_1 + L_2}{L} \leq t \leq 1 \quad (5.54)$$

Burada Q_{12} ve N_{12} için (5.38) eşitlikleri geçerlidir.

5.2.5.Sabit ivmeli hareket modelinde Eğri II'nin yanal sademe fonksiyonu

Eğri II, iki alinymanı tek bir elemanla birleştirdiğinden, bu eğrinin sabit ivmeli hareket modelindeki yanal sademe fonksiyonu yalnızca bir eşitlikten oluşur.

(5.42), (4.35), (4.36) ve (5.39) eşitlikleri (2.11)'de yerine konursa (5.5) dikkate alınarak eğri II'nin yanal sademe fonksiyonu

$$z_{II}(t) = \frac{v}{R\sqrt{1 + Q_{II}^2 \tan^2 \alpha_m}} \left(\frac{N_{II}(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{1 + Q_{II}^2 \tan^2 \alpha_m} + \frac{3Q_{II}(v_e^2 - v_0^2)}{2L} \right) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5.55)$$

olur. (5.55)'te Q_{II} ve N_{II} için (5.41) eşitlikleri geçerlidir.

Eğrilerin sabit pozitif ve sabit negatif ivmeli hareket modellerindeki yanal sademe diyagramları Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Diyagramların çizilmesinde aşağıdaki büyüklükler kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.1 ve Şekil 4.4):

Bileşik eğrilerde 1. ve 2. geçiş eğrilerinin ve dairesel kurbun yay uzunlukları:

$$L_1 = L_2 = L_3 = 600 \text{ m}$$

Dairesel kurb yarıçapı ve eğri II için minimum eğrilik yarıçapı:

$$R = 1850 \text{ m}$$

Bileşik eğrilerde toplam eğri uzunluğu ve eğri II'nin uzunluğu:

$$L = 1800 \text{ m}$$

Maksimum dever:

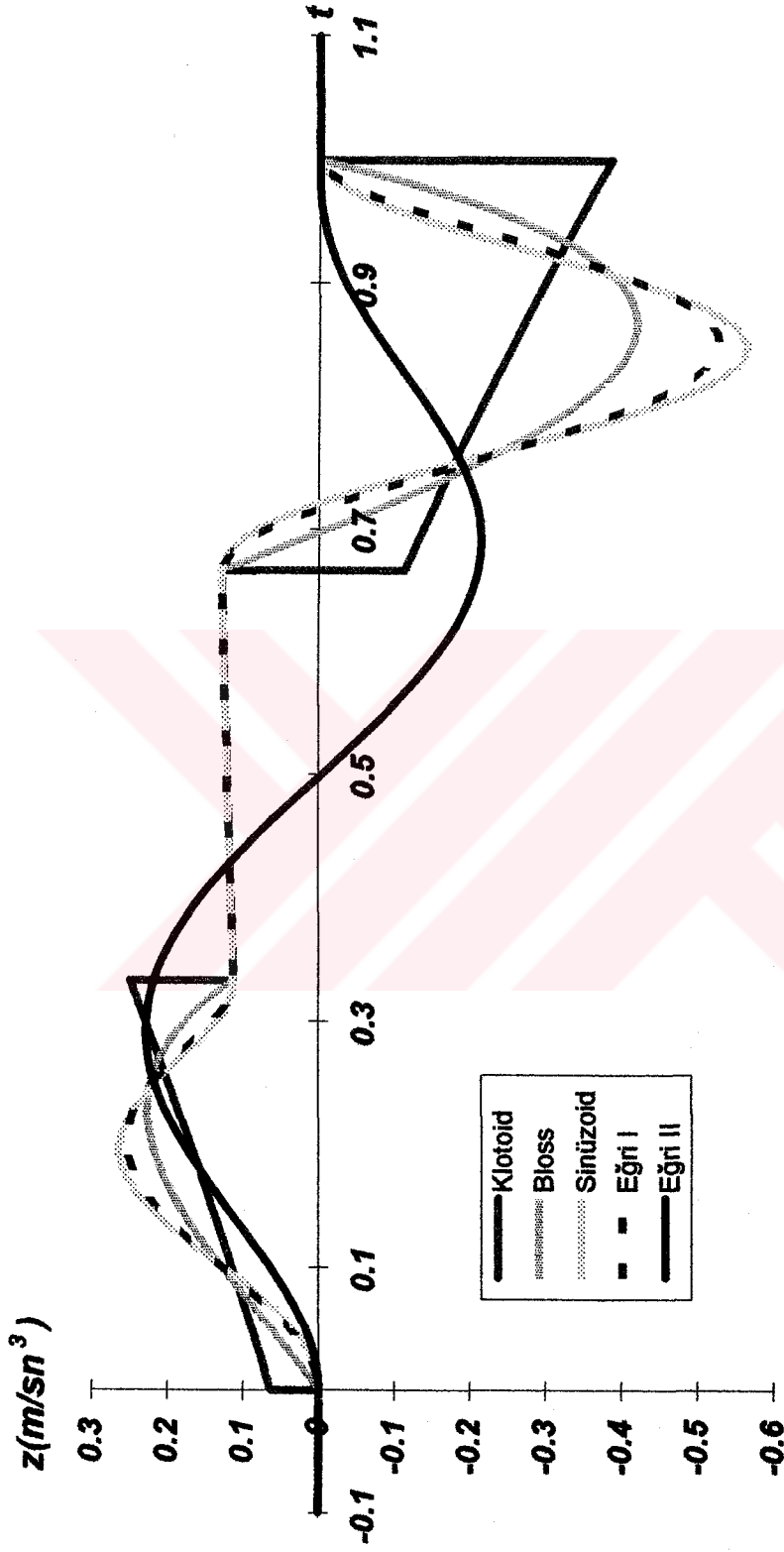
$$u_{\max} = 0.15 \text{ m}$$

Yol platformunun yatay genişliği (demiryollarında):

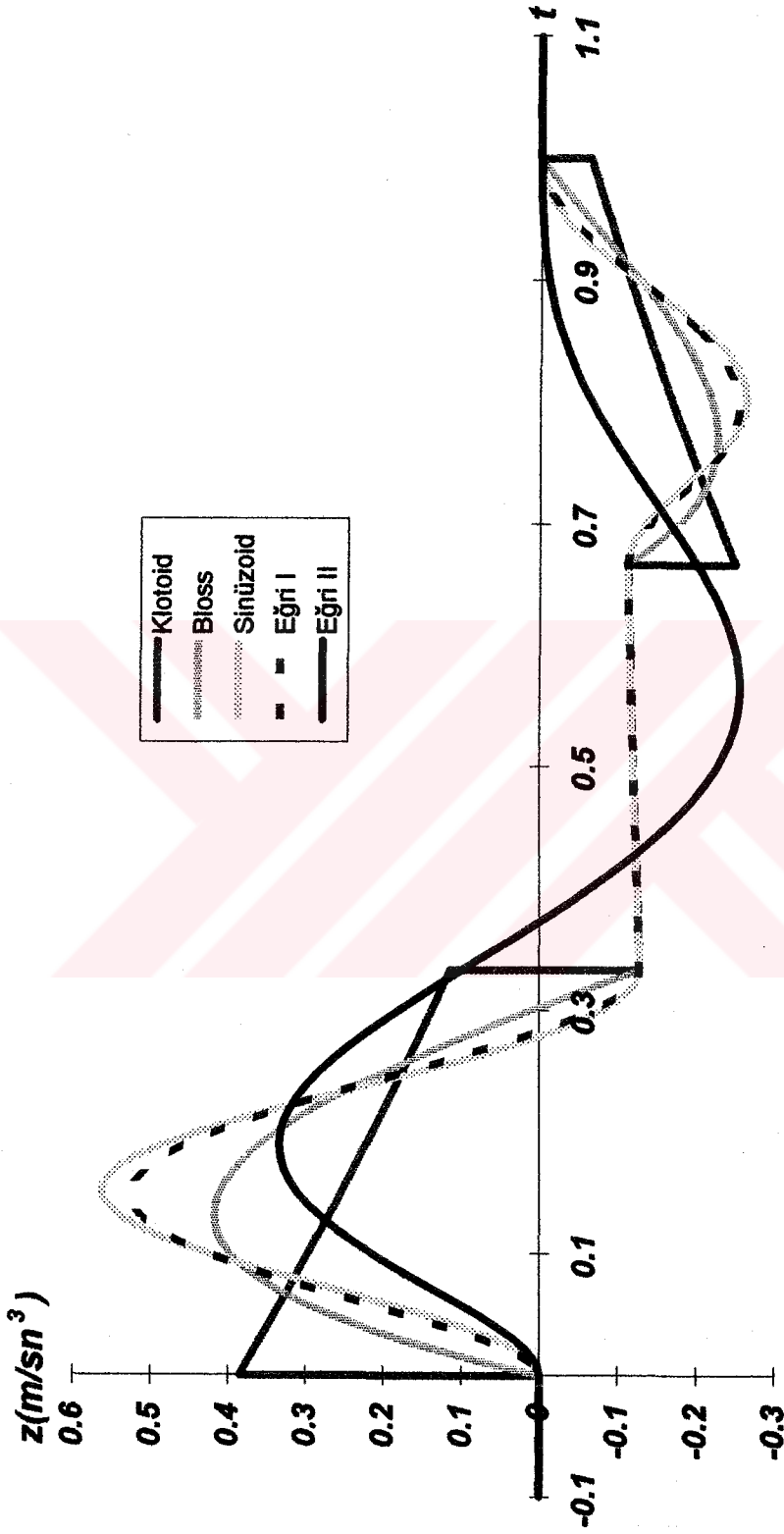
$$b = 1.5 \text{ m}$$

Eğrinin başlangıç noktasında taşıt hızı(sabit pozitif ivme)	$v_0 = 200 \text{ km/h}$
Eğrinin bitim noktasında taşıt hızı(sabit pozitif ivme)	$v_e = 300 \text{ km/h}$
Eğrinin başlangıç noktasında taşıt hızı(sabit negatif ivme)	$v_0 = 300 \text{ km/h}$
Eğrinin bitim noktasında taşıt hızı(sabit negatif ivme)	$v_e = 200 \text{ km/h}$





Şekil 5.2. Eğrilerin Sabit Pozitif İvmeli Hareket Modelinde Yanal Sademe Diyagramları ($v_0=200 \text{ km/h}$, $v_c=300 \text{ km/h}$)



Şekil 5.3. Eğrilerin Sabit Negatif İvmeli Hareket Modelinde Yanal Sademe Diyagramları ($v_0=300$ km/h, $v_e=200$ km/h)

BÖLÜM 6. EĞRİLERİN YANAL SADEME AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu çalışmanın amacı, daha önce de değinildiği gibi, geçki yatay geometrisinin tasarımında kullanılabilecek iki yeni eğri önerisinin tanıtılması ve bu eğrilerin, bilinen eğrilerle yol-araç dinamiği açısından karşılaştırılmasıdır. Eğriler, yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri bakımından merkezkaç kuvvetin veya serbest yanal ivmenin değişimi dikkate alınarak karşılaştırılabilir. Ancak yanal sademe, araç hareketini ve geçki geometrisinin tüm özelliklerini kapsadığından, en uygun karşılaştırma kriteri olarak kabul edilmektedir (JACOBS 1987, KAHLER 1990b, KOBRYN 1993, TARI ve BAYKAL 1995, BAYKAL ve diğ. 1997).

Yanal sademe kriterine göre yapılacak eğri karşılaştırmasının somut ve güvenilir sonuç verebilmesi için daha ayrıntılı kriterlerin ortaya konması zorunludur. Bu kriterler, doğal olarak yanal sademenin değişimini karakterize etmeli ve karşılaştırmayı, hiçbir kuşku ve itiraza yol açmayacak biçimde sonuçlandırmalıdır.

Yalın veya bileşik bir eğrinin yanal sademe fonksiyonunu, yol-araç dinamiği açısından karakterize eden en önemli iki özellik,

- a) tanım aralığında fonksiyonun sürekliliği,
- b) tanım aralığında fonksiyonun genliğidir.

Bu araştırmanın kapsamına alınan beş eğri, sözü edilen fonksiyonel özellikleri yansıtan aşağıdaki kriterlere göre karşılaştırılacaktır:

- Kriter 1- Sıçrama biçimindeki yanal sademe süreksizlikleri
- Kriter 2- Yanal sademe fonksiyonunun genliği
- Kriter 3- Kırılma biçimindeki yanal sademe süreksizlikleri

Kriterlerin sırası, önem derecelerini göstermektedir. İzleyen bölümlerde kriterler açıklandıktan sonra, hareket modelleri dikkate alınarak bu kriterlere göre yapılan karşılaştırmanın sonuçları ayrı ayrı verilecektir. Sonuçları daha da somutlaştırmak

amacıyla bir puanlama sistemi uygulanacaktır. Ayrıca tüm hareket modellerini ve tüm kriterleri içine alan genel değerlendirme sonuçları da sunulacaktır.

6.1.Kriter 1'e Göre Eğrilerin Karşılaştırılması

Yanal sademe fonksiyonunun tüm geçki boyunca sürekli olması ideal durumdur. Ancak, geometrik olarak bu ideale ulaşılsa bile işletme sırasında ortaya çıkacak sonsuz sayıdaki değişik hareket modeli, sürekli yanal sademe fonksiyonu idealini olanaksız kılar. Bu çalışmada eğrilerin karşılaştırılmasında, Bölüm 5'te açıklanan hareket modelleri ile yetinilmektedir. Yanal sademe fonksiyonlarındaki olası süreksizlikler, geometrinin değiştiği noktalarda (bileşik eğrilerde O_1 , TO, TF, O_2 noktalarında Şekil 3.1, eğri II'de O_1 ve O_2 noktalarında Şekil 4.4) ve sıçrama ya da kırılma biçiminde ortaya çıkar.

Sıçrama şeklindeki yanal sademe süreksizlikleri, özellikle yüksek hız öngörülen geçkilerde en istenmeyen olgudur. Ani yanal sademe değişimi anlamına gelen bu tür süreksizlikler, ortaya çıktığı her noktada

- demiryollarında ve karayollarında yolculuk konforunu olumsuz etkiler,
- demiryollarında ray geometrisinin hızla bozulmasına neden olur; bunun sonucu olarak işletme hızı düşer ve yolculuk konforu azalır,
- demiryollarında raylarda ve taşıt tekerleklerinde hızlı aşınma oluşur, dolayısıyla bakım ve onarım masrafları artar.

Bu nedenlerle sıçrama şeklindeki yanal sademe süreksizlikleri, eğrilerin yol-araç dinamiği açısından karşılaştırılmasında en önemli kriter olarak kabul edilmekte, yanal sademe diyagramında sıçrama şeklinde süreksizliği olmayan, ancak ekstrem yanal sademe değeri (0.6 m/s^3 'den küçük olmak koşuluyla) daha büyük olan eğri, sıçrama şeklinde süreksizliğe sahip, ekstrem değeri daha küçük olan eğriden üstün tutulmaktadır (JACOBS 1987, KAHLER 1990b, KOBRYN 1993, BAYKAL ve diğ. 1997).

Kriter-1'e göre eğrilerin karşılaştırılmasında, sıçrama şeklindeki süreksizliklerin büyüklüğü yanında süreksizlik noktalarının sayısı da dikkate alınmalıdır. Çünkü, bu tür süreksizliklerden kaynaklanan ve yukarıda özetlenen sakıncalar her bir süreksizlik

noktasında yineleneyecektir. Sonuç olarak Kriter-1'e ilişkin puanlı değerlendirmede her bir süreksizlik noktası için -50 puan ve ayrıca sıçrama şeklindeki süreksizliklerin mutlak değerce toplamının 100 katı kadar eksi puan verilecektir.

Sıçrama şeklindeki süreksizlikler, farklı geometriye sahip geçki elemanlarının birleşme noktalarında ortaya çıkar. i ve j geçki elemanlarının yanal sademe fonksiyonları $z_i(t)$ ve $z_j(t)$, P birleşme noktasına ait eğri uzunluğu l_p (veya $t_p=l_p/L$) olduğuna göre P noktasında sıçrama şeklinde yanal sademe süreksizliği olmama koşulu

$$z_i(t_p) = z_j(t_p) \quad (6.1)$$

dir. (6.1) koşulu sağlanmazsa süreksizliğin büyüklüğü

$$\Delta z(t_p) = z_j(t_p) - z_i(t_p) \quad (6.2)$$

olur.

6.1.1.Sabit hızlı hareket modelinde eğrilerin Kriter-1'e göre karşılaştırılması

Klotoid bileşik eğrisi: Şekil 3.1'e göre sıçrama şeklinde süreksizlik olabilecek noktalar O_1 , TO , TF ve O_2 'dir. Bu noktalar tek tek incelenirse aşağıdaki sonuçlara varılır.

1°) O_1 noktası ($t=0$), alinyimanla 1. klotoidin birleşme noktasıdır. Tüm alinyimanlar için, (2.11)'e göre yanal sademe fonksiyonu olarak (dever uygulamasının alinyimanda başlaması özel durumu dışında)

$$z_a = 0 \quad (6.3)$$

geçerlidir. 1. klotoide ait (5.4) yanal sademe fonksiyonu, O_1 noktasında ($t=0$)

$$z_{k,1}(0) = \frac{v(v^2 - gR \tan \alpha_M)}{L_1 R} = \Delta z_k(0) \quad (6.4)$$

değerine sahiptir. Sıçrama şeklinde süreksizlik olmaması için (bkz. 6.1 eşitliği)

$$v^2 = gR \tan \alpha_M \quad (6.5)$$

koşulunun sağlanması gerekir. (6.5) koşulunun sağlanmadığı her durumda O_1 noktası sıçrama süreksizliğine sahiptir ve bu süreksizliğin büyüklüğü (6.4)'den hesaplanır.

2°) TO noktası ($t=L_1/L$), 1. klotoid ile dairesel kurbun birleşme noktasıdır. 1. klotoidin yanal sademe fonksiyonu (5.4)

$$z_{k,1}\left(\frac{L_1}{L}\right) = \frac{v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{RL_1(t^2 \tan^2 \alpha_m + \frac{L_1^2}{L^2})^{3/2}} = -\Delta z_k\left(\frac{L_1}{L}\right) \quad (6.6)$$

ve dairesel kurbun yanal sademe fonksiyonu (5.8)

$$z_{k,2}\left(\frac{L_1}{L}\right) = 0 \quad (6.7)$$

sonuçlarını verir. Sıçrama süreksizliğinin olmaması (6.5) koşulunun sağlanmasına bağlıdır. Bu koşulun sağlanmadığı her durumda TO noktasında var olan sıçrama süreksizliğinin büyüklüğü (6.6)'dan hesaplanır.

3°) TF noktası ($t=(L_1+L_2)/L$), dairesel kurb ile 2. klotoidin birleşme noktasıdır. (5.8) ve (5.11)'den

$$z_{k,2}\left(\frac{L_1+L_2}{L}\right) = 0, \quad z_{k,3}\left(\frac{L_1+L_2}{L}\right) = -\frac{v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{RL_3(1 + \tan^2 \alpha_m)^{3/2}} = \Delta z_k\left(\frac{L_1+L_2}{L}\right) \quad (6.8)$$

bulunur. TF noktasında sıçrama süreksizliğinin olmaması için (6.5)'in sağlanması gereklidir. Bunun dışındaki her durumda TF noktası, büyüklüğü (6.8)'den hesaplanabilen sıçrama süreksizliğine sahip olacaktır.

4°) O₂ noktası ($t=1$), 2. klotoidin alinyimana birleştiği noktadır. (5.11) ve (6.3)'den

$$z_{k,3}(1) = -\frac{v(v^2 - gR \tan \alpha_m)}{L_3 R} = -\Delta z_k(1), \quad z_a(1) = 0 \quad (6.9)$$

geçerli olur. Sıçrama süreksizliğinin olmaması (6.5) koşuluna bağlıdır. Bu koşul sağlanmazsa O₂ noktasında da sıçrama biçiminde süreksizlik ortaya çıkar. Bu süreksizliğin büyüklüğü (6.9)'dan hesaplanır.

Görüldüğü gibi klotoid bileşik eğrisi, gerçekleşme olasılığı çok az olan (6.5) koşulu dışındaki her durumda dört ana noktada sıçrama süreksizliğine sahiptir. Bu nedenle bu eğriye, nokta başına -50 puandan -200 puan verilmiştir.

Süreksizliklerin büyüklükleri, Şekil 5.1'in çiziminde kullanılan geometri ve hız değerleri yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

O_1 noktasında	: +0.188 m/s ³
TO noktasında	: -0.185 m/s ³
TF noktasında	: -0.185 m/s ³
O_2 noktasında	: +0.188 m/s ³

Bunların mutlak değerce toplamının 100 katı kadar eksi puan (-74.6) da dikkate alınırsa, klotoid bileşik eğrisi, sabit hızlı hareket modeline göre Kriter-1'den -274.6 puan almıştır.

Bloss bileşik eğrisi: Şekil 3.1'e göre sıçrama süreksizliği görülebilecek noktalar O_1 , TO, TF ve O_2 'dir. O_1 noktası için (6.3) ve (5.14)'den, TO noktası için (5.14) ve (5.16)'dan, TF noktası için (5.16) ve (5.19)'dan, O_2 noktası için (5.19) ve (6.3)'den, (6.1) süreklilik koşulunun sağlandığı kolayca görülebilir. Bu sonuca göre Bloss bileşik eğrisi, sabit hızlı hareket modeline göre Kriter-1'den 0 puan almıştır.

Sinüzoid bileşik eğrisi: Şekil 3.1'e göre sıçrama şeklinde süreksizliğe sahip olabilecek noktalar O_1 , TO, TF ve O_2 'dir. O_1 noktası için (6.3) ve (5.23)'den, TO noktası için (5.23) ve (5.25)'den, TF noktası için (5.25) ve (5.28)'den, O_2 noktası için (5.28) ve (6.3)'den, (6.1) süreklilik koşulunun sağlandığı görülmektedir. Dolayısı ile sinüzoid bileşik eğrisi, sabit hızlı hareket modeline göre Kriter-1'den 0 puan almıştır.

Eğri I bileşik eğrisi: Şekil 3.1'e göre sıçrama şeklinde süreksizliğe sahip olabilecek noktalar O_1 , TO, TF ve O_2 'dir. O_1 noktası için (6.3) ve (5.32)'den, TO noktası için (5.32) ve (5.34)'den, TF noktası için (5.34) ve (5.37)'den, O_2 noktası için (5.37) ve (6.3)'den, (6.1) süreklilik koşulunun sağlandığı görülmektedir. Eğri I bileşik eğrisinin, sabit hızlı hareket modeli için Kriter-1'den aldığı puan 0'dır.

Eğri II: Şekil 4.4'e göre sıçrama şeklinde süreksizliği olabilecek O_1 ve O_2 noktalarında (6.3) ve (5.40)'dan, (6.1) süreklilik koşulunun sağlandığı görülmektedir. Eğri II, sabit hızlı hareket modelinde Kriter-1'den 0 puan almıştır.

Özet olarak, sabit hızlı hareket modeli ve Kriter-1'e göre klotoid bileşik eğrisi (-274.6 puan) dışındaki dört eğri (0 puan), kendi aralarında eşdeğer olup klotoid bileşik eğrisinden oldukça üstün yanal sademe özelliklerine sahiptirler.

6.1.2. Sabit ivmeli hareket modellerinde eğrilerin Kriter-1'e göre karşılaştırılması

Sabit pozitif ve negatif ivmeli hareket modellerinde tüm eğriler için aynı yanal sademe fonksiyonları geçerli olduğundan (bkz. Bölüm 5.2) bu iki hareket modeli için ayrı teorik değerlendirmeye gerek yoktur. Ancak v_0 ve v_e hızları değiştiği için (bkz. Şekil 5.2 ve 5.3) sayısal değerlendirme (puanlama) ayrı ayrı yapılacaktır.

Klotoid bileşik eğrisi: Sıçrama süreksizliğine sahip olabilecek noktalar O_1 , TO , TF ve O_2 'dir (Şekil 3.1).

1°) O_1 noktası ($t=0$), alinyimanla 1. klotoidin birleşme noktasıdır. (6.3) ve (5.43)'den $t=0$ için

$$z_a(0) = 0, \quad z_{k,1}(0) = \frac{v(v^2 - gR \tan \alpha_M)}{L_1 R} = \Delta z_k(0) \quad (6.10)$$

elde edilir. (6.1) süreksizlik koşulunun sağlanması, (6.5)'in geçerli olmasına bağlıdır. Bunun dışındaki her durumda O_1 noktasında sıçrama süreksizliği vardır ve büyüklüğü (6.10)'dan hesaplanır. (6.10)'da, (5.42)'ye göre $v=v_0$ 'dır.

2°) TO noktası ($t=L_1/L$), 1. klotoidle dairesel kurbun birleştiği noktadır. (5.43)'den

$$z_{k,1}\left(\frac{L_1}{L}\right) = \frac{v}{LR} \left[\frac{L(v^2 - gR \tan \alpha_M)}{L_1(1 + \tan^2 \alpha_M)^{3/2}} + \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_M)^{1/2}} \right] \quad (6.11)$$

ve (5.44)'den

$$z_{k,2}\left(\frac{L_1}{L}\right) = \frac{v}{LR} \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_M)^{1/2}} \quad (6.12)$$

yazılabilir. (6.1) süreklilik koşulunun sağlanması için (6.5)'in geçerli olması gerekir. (6.5)'in gerçekleşmediği her durumda TO noktasında sıçrama süreksizliği vardır ve büyüklüğü (6.2), (6.11) ve (6.12)'den hesaplanır,

$$\Delta z_k \left(\frac{L_1}{L} \right) = - \frac{v}{L_1 R} \frac{v^2 - gR \tan \alpha_M}{L_1 (1 + \tan^2 \alpha_M)^{3/2}} \quad (6.13)$$

Burada (5.42)'ye göre

$$v = v_0 + (v_e - v_0) \frac{L_1}{L} \quad (6.14)$$

dir.

3°) TF noktası ($t=(L_1+L_2)/L$), dairesel kurbila 2. klotoidin birleşme noktasıdır(Şekil 3.1). (5.44)'den

$$z_{k,2} \left(\frac{L_1}{L} \right) = \frac{v}{LR} \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_M)^{1/2}} \quad (6.15)$$

ve (5.45)'den

$$z_{k,3} \left(\frac{L_1 + L_2}{L} \right) = \frac{v}{LR} \left[- \frac{L(v^2 - gR \tan \alpha_M)}{L_3 (1 + \tan^2 \alpha_M)^{3/2}} + \frac{3(v_e^2 - v_0^2)}{2(1 + \tan^2 \alpha_M)^{1/2}} \right] \quad (6.16)$$

bulunur. (6.1) süreklilik koşulunun sağlanması için (6.5)'in gerçekleşmesi gerekir. Diğer durumlarda TF noktasında sıçrama süreksizliği vardır. Bu süreksizliğin büyüklüğü, (6.2), (6.15) ve (6.16)'dan yararlanılarak

$$\Delta z_k \left(\frac{L_1 + L_2}{L} \right) = - \frac{v}{L_3 R} \frac{v^2 - gR \tan \alpha_M}{L_1 (1 + \tan^2 \alpha_M)^{3/2}} \quad (6.17)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada (5.42)'ye göre

$$v = v_0 + (v_e - v_0) \frac{L_1 + L_2}{L} \quad (6.18)$$

dir.

4°) O₂ noktası ($t=1$), 2. klotoidin alinyimanla birleştiği noktadır(Şekil 3.1). (5.45) ve (6.3)'den

$$z_{k,3}(1) = \frac{v(v^2 - gR \tan \alpha_M)}{L_3 R} = \Delta z_k(1), \quad z_a(1) = 0 \quad (6.19)$$

elde edilir. (6.1) süreklilik koşulunun geçerliliği (6.5)'in gerçekleşmesine bağlıdır. Diğer durumlarda O_2 noktası sıçrama süreksizliğine sahiptir. Bu süreksizliğin büyüklüğü (6.19)'dan hesaplanır. (5.42)'ye göre (6.19)'da $v=v_e$ 'dir.

Yukarıdaki açıklamalardan görüldüğü gibi, klotoid bileşik eğrisi, gerçekleşme olasılığı çok az olan (6.5) koşulu dışındaki her durumda hem sabit pozitif hem de sabit negatif ivmeli hareket modellerinde dört ana noktada sıçrama süreksizliğine sahiptir. Bunun sonucunda bu eğriye, her iki hareket modeli için ayrı ayrı -200 puan verilmiştir.

Sabit pozitif ivmeli hareket modelinde süreksizliklerin büyüklükleri, Şekil 5.2'nin çiziminde kullanılan geometri ve hız değerleri ile hesaplanmıştır:

O_1 noktasında	: +0.064 m/s ³
TO noktasında	: -0.137 m/s ³
TF noktasında	: -0.241 m/s ³
O_2 noktasında	: +0.385 m/s ³

Bu büyüklüklerin mutlak değerce toplamının 100 katı kadar eksi puan (82.7) de dikkate alınırsa klotoid bileşik eğrisi sabit pozitif ivmeli hareket modeline göre Kriter-1'den -282.7 puan almıştır.

Sabit negatif ivmeli hareket modeline ait sıçrama süreksizlikleri Şekil 5.3'ün çiziminde esas alınan geometri ve hız büyüklükleri ile hesaplanmış ve aşağıdaki büyüklükler bulunmuştur:

O_1 noktasında	: +0.385 m/s ³
TO noktasında	: -0.241 m/s ³
TF noktasında	: -0.137 m/s ³
O_2 noktasında	: +0.064 m/s ³

Bu büyüklüklerin mutlak değerce toplamının 100 katı ile birlikte klotoid bileşik eğrisi, sabit negatif ivmeli hareket modeline göre Kriter-1'den -282.7 puan almıştır.

Bloss, sinüzoid ve eğri I bileşik eğrileri ile Eğri II'nin, hiçbir noktada sıçrama şeklinde süreksizliğe sahip olmadıkları, diğer bir deyişle (6.1) süreklilik koşulunu sağladıkları, Bölüm 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4 ve 5.2.5'te türetilen yanal sademe fonksiyonları

yardımıyla kolaylıkla kanıtlanabilir. Dolayısıyla bu dört eğri, sabit pozitif ve sabit negatif ivmeli hareket modellerine göre Kriter-1'den 0 puan almışlardır.

Özet olarak, sabit pozitif ve sabit negatif ivmeli hareket modelleri ve Kriter-1'e göre klotoid bileşik eğrisi -282.7 puan, diğer dört eğri 0 puan almışlardır. Bu dört eğri kendi aralarında eşdeğer olup klotoid bileşik eğrisinden oldukça üstün yanal sademe özelliklerine sahiptir.

6.2.Kriter 2'ye Göre Eğrilerin Karşılaştırılması

Yanal sademeyi inceleyen yayınların büyük çoğunluğunda, yalnızca alinyimandan dairesel kurba klotoidle geçildiği, lineer dever uygulandığı ve taşıt hızlarının sabit olduğu kabul edilmekte HICKERSON (1953, s.154-157), MEYER (1965, s.213-219), IVES ve KISSAM (1966, s.115-117), SCHOFIELD (1972, s.177-181), GOOD (1977), O'FLAHERTY (1986, s.386-388) ve yolculuk konforu açısından izin verilen yanal sademe büyüklüğü olarak 0.3 m/s^3 ile 0.6 m/s^3 arasında değişen farklı değerler verilmektedir. Karşılaştırılacak eğrilere ait yanal sademe fonksiyonlarının ekstrem değerleri, kullanılan geometrik büyüklüklere (L , R , v , v_e , v_0 , $u_{\max}$ v.b.) bağlı olarak yukarıdaki sınır değerlerden küçük olabilir. Dolayısıyla, kriter olarak bir sınır değer kullanılması halinde karşılaştırmadan somut bir sonuç alınamaz. Karşılaştırma sonucunu somutlaştırmak amacıyla, tanım aralığında yanal sademe değerlerinin değişimini çok daha iyi karakterize eden "yanal sademe fonksiyonunun genliği" ikinci önemli kriter olarak önerilmiş ve uygulanmıştır.

Herhangi bir i eğrisinin yanal sademe fonksiyonunun genliği, bu fonksiyonun $0 \leq t \leq 1$ tanım aralığında sahip olduğu en büyük ve en küçük değerlerin cebrik farkı olarak tanımlanır,

$$Gz_i = \max z_i - \min z_i, \quad (6.20)$$

(6.20) bağıntısı, matematikte bilinen tek değişkenli fonksiyonlarda maksimum/minimum problemidir. Maksimum/minimum probleminin çözümü sonucunda ortaya çıkan t değeri L , R , v , v_0 , v_e , $u_{\max}$ gibi çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu tür çok sayıda değişkene bağımlı bir değerle karşılaştırma yapmak, sayısal değerler olmaksızın mümkün olmayacaktır. Bu nedenle problemin çözümüne ilişkin matematiksel

formülasyona başvurulmaksızın sayısal değerler sunularak, eğrilere genliklerinin 100 katı kadar eksi puan verilerek karşılaştırma yapılacaktır.

Üç farklı hareket modelinde eğrilerin Kriter-2'ye göre karşılaştırılmasına ilişkin büyüklükler Tablo 6.1, 6.2 ve 6.3'de özetlenmiştir. Tablolarda max z, max t ve min z, min t sütunları en büyük ve en küçük yanıl sademe değerlerini ve bunların eğri üstündeki konumlarını, GZ sütunu yanıl sademe fonksiyonunun genliğini, puan sütunu ise eğrinin aldığı puanı göstermektedir. Tablolardaki sayısal değerler, yanıl sademe diyagramlarının (bkz. Şekil 5.1, 5.2, 5.3) çiziminde kullanılan geometri ve hız büyüklüklerine göre hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. Sabit Hızlı Hareket Modelinde Kriter 2'ye İlişkin Değerler

Eğri	max z (m/s ³)	max t	min z (m/s ³)	min t	GZ (m/s ³)	.Puan
Klotoid Bileşik Eğrisi	0.188	0.00	-0.188	1.00	0.376	-37.6
Bloss Bileşik Eğrisi	0.281	0.17	-0.281	0.83	0.562	-56.2
Sintüzoid Bileşik Eğrisi	0.374	0.17	-0.374	0.83	0.748	-74.8
Eğri I Bileşik Eğrisi	0.351	0.17	-0.351	0.83	0.702	-70.2
Eğri II	0.250	0.23	0.211	0.63	0.461	-46.1

Tablo 6.2. Sabit Pozitif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 2'ye İlişkin Değerler

Eğri	max z (m/s ³)	max t	min z (m/s ³)	min t	GZ (m/s ³)	.Puan
Klotoid Bileşik Eğrisi	0.249	0.33	-0.385	1.00	0.634	-63.4
Bloss Bileşik Eğrisi	0.226	0.23	-0.418	0.87	0.644	-64.4
Sintüzoid Bileşik Eğrisi	0.263	0.20	-0.563	0.85	0.826	-82.6
Eğri I Bileşik Eğrisi	0.254	0.20	-0.526	0.85	0.780	-78.0
Eğri II	0.228	0.29	-0.214	0.69	0.442	-44.2

Tablo 6.3. Sabit Negatif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 2'ye İlişkin Değerler

Eğri	max z (m/s ³)	max t	min z (m/s ³)	min t	GZ (m/s ³)	.Puan
Klotoid Bileşik Eğrisi	0.385	0.00	-0.249	0.67	0.634	-63.4
Bloss Bileşik Eğrisi	0.418	0.13	-0.226	0.77	0.644	-64.4
Sintüzoid Bileşik Eğrisi	0.563	0.15	-0.263	0.80	0.826	-82.6
Eğri I Bileşik Eğrisi	0.526	0.15	-0.254	0.80	0.780	-78.0
Eğri II	0.334	0.19	-0.260	0.56	0.594	-59.4

Üç hareket modeli birlikte dikkate alınarak yapılan değerlendirmeye göre eğrilerin Kriter-2'den aldıkları toplam puanlar ve üstünlük derecelerini gösteren sıralama aşağıdadır:

1. Eğri II	: -149.7 puan
2. Klotoid bileşik eğrisi	: -164.4 puan
3. Bloss bileşik eğrisi	: -185.0 puan
4. Eğri I bileşik eğrisi	: -226.2 puan
5. Sinüzoid	: -240.0 puan

6.3.Kriter 3'e Göre Eğrilerin Karşılaştırılması

Bölüm 6.1'de daha ayrıntılı olarak açıklandığı gibi yanal sademe fonksiyonunun tüm geçki boyunca sürekli olması ideal durumdur. Bu ideal durumu bozan sıçrama süreksizlikleri, en önemli karşılaştırma kriteri olarak kabul edilmiş ve Bölüm 6.1'de ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Kırılma süreksizlikleri de, sıçrama süreksizlikleri kadar önemli olmamakla birlikte, yanal sademe fonksiyonunun düzenli değişimini bozarlar ve yolculuk konforu üzerinde bir dereceye kadar olumsuz etki yapabilirler. Bu nedenle "kırılma şeklindeki yanal sademe süreksizlikleri" üçüncü karşılaştırma kriteri olarak kabul edilmiştir.

Önceki bölümlerde açıklanan eğrilik, dever ve hareket fonksiyonlarının yapısı gereği, kırılma süreksizlikleri yalnızca, farklı geometriye sahip iki geçki elemanının birleşme noktalarında ortaya çıkabilir. Doğal değişkeni t_p olan bir P noktasında birleşen i ve j geçki elemanlarının yanal sademe fonksiyonları $z_i(t)$ ve $z_j(t)$ olduğuna göre P noktasında kırılma süreksizliğinin olmaması koşulu

$$z_i'(t_p) = z_j'(t_p) \quad (6.21)$$

dir. (6.21) koşulunun sağlanmaması durumunda kırılma süreksizliğinin büyüklüğü, i ve j geçki elemanlarına ait yanal sademe fonksiyonlarının P noktasındaki teğetlerinin eğimleri arasındaki fark olarak tanımlanabilir,

$$\Delta z'(t_p) = z_j'(t_p) - z_i'(t_p) \quad (6.22)$$

Bölüm 5'te türetilen yanal sademe fonksiyonlarının t değişkenine göre türevlerinin alınması herhangi bir özellik göstermemektedir. Bu nedenle türev eşitlikleri açıklanmaksızın, ana noktalardaki sayısal türev değerlerinin verilmesiyle yetinilecektir.

Tablo 6.4, 6.5 ve 6.6'da özetlenen sözkonusu sayısal değerler, yanıl sademe diyagramlarının (bkz. Şekil 5.1, 5.2, 5.3) çiziminde kullanılan geometri ve hız büyüklükleri ile hesaplanmıştır.

Tablo 6.4. Sabit Hızlı Hareket Modelinde Kriter 3'e İlişkin Değerler ve Puanlandırma

	Geçki Elemanı	Birleşme Noktası ve t_p	$z'(t_p)$	$\Delta z'(t_p)$	Puan
Bloss Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	3.387	-155.1
	1. Bloss		3.387		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	-3.369	3.369	
		2. Bloss	TF (0.667)		
				0.000	
				-3.369	
		O_2 (1.000)	3.387	-3.387	
	Alinyiman		0.000		
Sinüzoid Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	1. Sinüzoid		0.000		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	0.000	0.000	
		2. Sinüzoid	TF (0.667)		
				0.000	
				0.000	
		O_2 (1.000)	0.000	0.000	
	Alinyiman		0.000		
Eğri I Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	1. Eğri I		0.000		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	0.000	0.000	
		2. Eğri I	TF (0.667)		
				0.000	
				0.000	
		O_2 (1.000)	0.000	0.000	
	Alinyiman		0.000		
Eğri II	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	Eğri II		0.000		
			0.000	0.000	
		Alinyiman			

Tablo 6.5. Sabit Pozitif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 3'e İlişkin Değerler ve Puanlandırma

	Geçki Elemanı	Birleşme Noktası ve t_p	$z'(t_p)$	$\Delta z'(t_p)$	Puan
Bloss Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	1.146	-169.0
	1. Bloss		1.146		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	-2.423	2.471	
		0.048			
	2. Bloss	TF (0.667)	0.048	-4.346	
		-4.298			
		O_2 (1.000)	6.932	-6.932	
	Alinyiman	0.000			
Sinüzoid Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	1. Sinüzoid		0.000		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	0.048	0.000	
		0.048			
	2. Sinüzoid	TF (0.667)	0.048	0.000	
		0.048			
		O_2 (1.000)	0.000	0.000	
	Alinyiman	0.000			
Eğri I Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	1. Eğri I		0.048		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	0.048	0.000	
		0.048			
	2. Eğri I	TF (0.667)	0.048	0.000	
		0.048			
		O_2 (1.000)	0.000	0.000	
	Alinyiman	0.000			
Eğri II	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	Eğri II		0.000		
	Alinyiman	O_2 (1.000)	0.000	0.000	
		0.000			

Tablo 6.6. Sabit Negatif İvmeli Hareket Modelinde Kriter 3'e İlişkin Değerler ve Puanlandırma

	Geçki Elemanı	Birleşme Noktası ve t_p	$z'(t_p)$	$\Delta z'(t_p)$	Puan
Bloss Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	6.932	-169.0
	1. Bloss		6.932		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	-4.298	4.346	
			0.048		
	2. Bloss	TF (0.667)	0.048	-2.471	
			-2.423		
	O_2 (1.000)	1.146	-1.146		
				0.000	
Sinüzoid Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	1. Sinüzoid		0.000		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	0.048	0.000	
			0.048		
	2. Sinüzoid	TF (0.667)	0.048	0.000	
			0.048		
	O_2 (1.000)	0.000	0.000		
				0.000	
Eğri I Bileşik Eğrisi	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	1. Eğri I		0.048		
	Dairesel Kurb	TO (0.333)	0.048	0.000	
			0.048		
	2. Eğri I	TF (0.667)	0.048	0.000	
			0.048		
	O_2 (1.000)	0.000	0.000		
				0.000	
Eğri II	Alinyiman	O_1 (0.000)	0.000	0.000	0.0
	Eğri II		0.000		
	O_2 (1.000)	0.000	0.000		
		Alinyiman		0.000	

Klotoid bileşik eğrisi, tüm hareket modellerinde ve tüm ana noktalarda sıçrama süreksizliğine sahiptir ve bu yüzden Kriter-1 için öngörülen eksi puanları almıştır (bkz.

Bölüm 6.1.1, 6.1.2 ve 6.1.3). Bu nedenle bu eğri Kriter-3'e göre yapılan değerlendirmenin kapsamı dışında bırakılmıştır.

Puanlı değerlendirmede, kırılma süreksizliği saptanan her bir nokta için -5 puan ve kırılma süreksizliklerinin mutlak değerce toplamının 10 katı kadar da eksi puan verilecektir.

Üç hareket modeline ve Kriter 3'e göre yapılan değerlendirme sonucunda

Bloss Bileşik Eğrisi	: -493.1 puan
Sintüzoid Bileşik Eğrisi	: 0 puan
Eğri I Bileşik Eğrisi	: 0 puan
Eğri II	: 0 puan

almışlardır (klotoid bileşik eğrisi değerlendirme dışı bırakılmıştır). Bu sonuç, Kriter 3'e göre yapılan karşılaştırmada sintüzoid ve Eğri I bileşik eğrileri ile Eğri II'nin kendi aralarında eşdeğer ve Bloss bileşik eğrisinden üstün olduklarını göstermektedir.

6.4.Genel Değerlendirme ve Karşılaştırma

Bölüm 6.1, 6.2 ve 6.3'de açıklanan üç kriterin verdiği sonuçlar incelendiğinde, farklı kriterler için farklı eğri sıralamalarının elde edildiği görülmektedir. Karşılaştırmanın amacı, geçki yatay geometrisinin tasarımında kullanılabilecek, yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri açısından optimum çözümü veren eğri sıralamasının belirlenmesidir. Tüm kriterleri dikkate alan kesin değerlendirme, yukarıda sözü edilen optimum çözümü verir. Eğrilerin, her bir kritere göre aldıkları puanlar ve toplam puanları Tablo 6.7'de özetlenmiştir.

Tablo 6.7. Eğrilerin Kriterlerden Aldıkları Puanlar ve Toplam Puanları

Eğri Adı	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Toplam Puan
Klotoid Bileşik Eğrisi	-840	-164.4	-	-1004.4
Bloss Bileşik Eğrisi	0	-185.0	-493.1	-678.1
Sintüzoid Bileşik Eğrisi	0	-240.0	0	-240
Eğri I Bileşik Eğrisi	0	-226.2	0	-226.2
Eğri II	0	-149.7	0	-149.7

Tablo 6.7'den açıkça görüldüğü gibi, yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri açısından en üstün eğri, bu çalışmada önerilen Eğri II'dir. Bunu, yine bu çalışmada önerilen Eğri I bileşik eğrisi ve sintüzoid bileşik eğrisi izlemekte, yanal sademe fonksiyonlarında

süreksizlik bulunan Bloss ve klotoit bileşik eğrileri son sıralarda yer almaktadır. Eğri II, kesin değerlendirme yanında, kriterlerin ayrı ayrı değerlendirilmesinde de birinci sıradaki yerini korumaktadır.



BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geçki yatay geometrisinin tasarımında kullanılabilecek iki yeni eğri tanıtılmıştır. Her iki eğri, geçki tasarımının temel problemlerinden biri olan iki alinymanın eğrisel bir çizgi ile birleştirilmesi sorununa çözüm getirmektedir.

Önerilen eğrilerden birincisi Eğri I olarak adlandırılmıştır. Bu eğri, problemi, günümüzdeki tasarımlarda kullanılan bileşik eğri (geçiş eğrisi-dairesel kurb-geçiş eğrisi) yapısı içinde çözmektedir.

Eğri II adı verilen ikinci eğri önerisi ise iki alinymanı tek bir eğri ile birleştirmekte, böylece bileşik eğri yapısını ortadan kaldırarak geçki tasarımında yeni bir ufuk açmaktadır.

Yüksek hız öngörülen demiryollarında ve karayollarında, geçki yatay geometrisinin ve dever uygulamasının yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri büyük öneme sahiptir. Eğrilerin birbirleriyle karşılaştırılmasında sözkonusu özellikler esas alınmaktadır. Eğrilerin yol-araç dinamiğine ilişkin özelliklerini en iyi karakterize eden yanal sademe kavramı, en genel biçimiyle Bölüm 2’te sunulmaktadır.

Önerilen eğrileri, günümüzde bilinen ve uygulanan eğrilerle karşılaştırabilmek için bilinen eğrilerin (klotoid, Bloss, sinüzoid bileşik eğrileri) ve önerilen eğrilerin eğrilik, dever ve yanal sademe fonksiyonları Bölüm 3, 4 ve 5’te açıklanmıştır. Yanal sademe fonksiyonları, üç ayrı hareket modeli (sabit hızlı, sabit pozitif ivmeli, sabit negatif ivmeli) dikkate alınarak türetilmiştir.

Eğrilerin, yol-araç dinamiğine (yanal sademeye) ilişkin özellikleri açısından karşılaştırılmasında kesin ve somut sonuçlara ulaşılabilmesi için

- tanım aralığında sıçrama biçiminde yanal sademe süreksizlikleri (Kriter 1)
- tanım aralığında yanal sademenin genliği (Kriter 2)
- tanım aralığında kırılma biçiminde yanal sademe süreksizlikleri (Kriter 3)

kriterleri ve bir puanlama sistemi önerilmiş ve uygulanmıştır.

Kriterlere bağılı olarak verilen puanlara göre, bu çalışmada önerilen Eğri II, hem ayrı ayrı kriterlere göre hem de genel değerlendirmede açık farkla birinci sırayı almıştır (bkz. Bölüm 6.1, 6.2, 6.3, 6.4). Diğer bir deyişle, Eğri II'nin yol-araç dinamiğine ilişkin özellikleri, karşılaştırma kapsamına alınan dört bileşik eğriye oranla çok üstündür. Bu üstünlük Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'den açıkça görölmektedir.

Bu çalışmada önerilen Eğri I, genel değerlendirmede tüm eğriler arasında Eğri II'den sonra ikinci gelmiş, bileşik eğriler arasında ise birinci olmuştur.

Yukarıda özetlenen sonuçlara bağılı olarak yapılabilecek öneriler aşağıdadır:

1°) Demiryollarında, en önemli ve vazgeçilmez geçki elemanı alinyimandır. Alinyiman ve Eğri II'den oluşan iki elemanlı demiryolu geçkileri, yol-araç dinamiği açısından çok üstün niteliklere sahip olur. Bu geometriye sahip demiryollarında güvenlik, yolculuk konforu, verim ve kapasiteden ödün verilmeksizin daha yüksek işletme hızlarına erişilir, ayrıca bakım ve onarım masrafları azalır. Ancak bu geometri, tasarım özgürlüğünün fazla olduğu kırsal kesim için uygundur. Çok sayıda zorunlu geçiş noktalarına sahip demiryolu geçkilerinde (yerleşim bölgelerinden geçişte) bileşik eğrilerin kullanılması gerekebilir. Bu durumda da bilinen geçiş eğrilerinden üstün olduğu kanıtlanan Eğri I'in uygulanması, yukarıda sayılan yararları sağlar.

2°) Otoyol, ekspres yol gibi yüksek standartlı karayollarında alinyiman, fazla istenmeyen bir geçki elemanıdır. Bu tür karayollarının kırsal kesim geçkileri, yalnızca zorunlu yerlerde kısa alinyimanlar kullanılarak Eğri II'nin uç uca eklenmesiyle oluşturulabilir. Böylece hem yol-araç dinamiği açısından üstün nitelikli, hem de estetik görünümlü geçkiler elde edilir. Bileşik eğri kullanılması gerekiyorsa, geçiş eğrisi olarak Eğri I'in kullanılması uygun ve yararlı olur.

3°) Eğri II ve Eğri I'in kullanılması durumunda, dever uygulaması mutlaka bu eğrilere ilişkin dever fonksiyonları (bkz. Bölüm 4.1.1 ve 4.2.1) ile yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- AHRENS, B., (1989),** Eine dv-gerechte Formel zur Berechnung von Kleinpunkten der Einheitsklotoide, Der Vermessungsingenieur, Vol. 40, No. 2, pp. 55-56.
- AYRES, F., (1979),** Teori ve Problemlerle Diferansiyel ve İntegral Hesap (Calculus), Çeviren: Dr. Güzin Gökmen, Güven Kitabevi Yayınları, Ankara.
- BAAS, K.G., (1984),** The Use of Clothoid Templates in Highway Design, Transportation Forum 1, pp. 47-52
- BAYKAL, O., (1996),** On Concept of Lateral Change of Acceleration, ASCE Journal of Surveying Engineering, Vol. 122, No. 3, pp. 132-141.
- BAYKAL, O., TARI, E., COŞKUN, Z., ŞAHİN, M., (1997),** A New Transition Curve Joining Two Straight Lines, ASCE Journal of Transportation Engineering (yayınlanmak üzere kabul edildi.)
- BENDER, W., (1981),** Wendelinien ohne Normklotoiden, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 87, No. 2, pp. 58-70
- BENDER, W., (1986),** Untersuchungen über divergierende Verbundkurven, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 93, No. 2, pp.67-85.
- BIÇAKCI, O., (1977),** Demiryollarında Yeni Bir Birleştirme Eğrisinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi.
- BOZKURT, M., (1969),** Demiryolu Kurbaları, 2. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi Teknik Okulu Kütüphanesi, Sayı. 75.
- BOZKURT, M., (1988),** Demiryolu I, 3. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, Sayı. 1362.

- CHEW, E.P., GOH, C.J., TWA, T.F., (1989),** Simultaneous Optimization of Horizontal and Vertical Alignments for Highways, Transportation Research - B, Vol. 23B, No. 5, pp.315-329.
- CREMER, K., (1978),** Zur Anwendung der ebenen Biegelinie, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, No. 8-9, pp.291-297.
- ÇORBALIOĞLU, Ş., (1996),** Mısır Piramitlerinin Yapımında "Raylı Sistem"den mi Yararlanıldı? Türkiye Mühendislik Haberleri, sayı. 384, s. 10-15. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayını, Temmuz 1996.
- DESIGNING SAFER ROADS, (1987),** Special Report 214, Transportation Research Board National Research Council, Washington, D.C.
- ESVELD, C. (1989),** Modern Railway Track, Graphics Department of Thyssen Stahl A.G., Duisburg, Germany.
- EVREN, G., (1979),** Demiryollarında Kurbalara İlişkin Sorunlar ve Çözüm Önerileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Teknik Rapor No. 37.
- FISCH, L., FRÖHLICH, H., GERRESHEIM, F., (1990),** Automatisierte Transformation seitlich gelegener Zwangspunkte auf beliebige Trassen-das Programm ZPD, Der Vermessungsingenieur, Vol. 41, No. 6, pp. 259.261.
- FRÖHLICH, H, HARNEID, K., (1990),** Schnittpunktberechnungen mit den Elementen Gerade, Kreis und Klotioide sowie deren Parallelen-ein PC-Programm, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 52, No. 7, pp. 362-366.
- GOOD, M.C., (1977),** Evaluation of Transition Curve Design Parameters Using An Analytical Vehicle Model, Australian Road Research, Vol. 7, No. 42, pp.14-27, June, Australia.
- GURSCHE, W., (1987),** Berechnung von Klotoidenschnitten, Der Vermessungsingenieur, Vol. 38, No. 4, pp. 146-149.
- GURSCHE, W., (1992),** Das Rechnen mit der Klotioide, Der Vermessungsingenieur, Vol. 43, No. 4, pp. 157-166
- HAUSMANN, E., SLACK, E.P., (1980),** Fizik Mekanik ve Isı, Cilt I, Çev: Prof. Nusret Kürkçüoğlu, Matbaa Teknisyenleri Koll. Şti., İstanbul 1980.

HECKMANN, H., (1990), Ein Algorithmus zur Trassenberechnung auf EDV-Anlagen, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 97, No. 1, pp. 19-26.

HICKERSON, T.F., (1953), Route Location And Surveying, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, Toronto, London.

HINUBER, J., HERRMANN, R., (1981), Berechnung klotoidenparalleler Übergangsbögen Eine Lösung für die Praxis, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 87, No. 2, pp.73-79.

HUBENY, K., (1981), Unsymmetrische Scheitelklotoide durch einen Zwangspunkt, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 87, No. 2, pp. 71-73.

INGWERSEN, M., RICKERT, T., (1990), Neue Trassierungstechnik für Nahverkehrsbahnen, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 115, No. 2, pp.60-67.

IVES, H.C., KISSAM, P., (1966), Highway Curves, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc.

JACOBS, E., (1987), Die Sinusoide Als Neuzeitliches Trassierungselementen, Der Vermessungsingenieur, Vol. 38, No. 1, pp. 3-9.

JENKINS, R.B.M., (1961), Curve Surveying, Frederick Ungar Publishing Co., New York.

KAHLER, D., (1980), Ein Beitrag zur Berchnung der kartesischen Koordinaten von Klotoidenkleinpunkten, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 105, No. 5, pp. 232-240.

KAHLER, D., (1985), Die Anwendung des Übergangsbogens im Ingenieurbau, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 47, No. 2, pp. 87-98.

KAHLER, D., (1989), Die Stauchklotoide als Übergangsbogen in engen Ausfahrten, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 51, No. 2, pp. 116-124.

KAHLER, D., (1990a), Übergangsbögen zur Ausrundung der Neigungswechsel im Schienen-Schnellverkehr, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 115, No. 4, pp. 154-162.

KAHLER, D., (1990b), Ein Übergangsbogen für den S-Bahnverkehr mit linearer Überhöhungsrampe, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 52, No. 1, pp.10-18.

KAHLER, D., (1992), Zur Berechnung allgemeiner Trassen im Stationierungsverlauf, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 54, No. 7, pp. 348-353.

KAHLER, D., (1993), Die Lösung von Klotoidenaufgaben in einem übergeordneten Koordinatensystem, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol.100, No.8-9, pp.317-326.

KASPER, H., SCHÜRBA, W., LORENZ, H., (1968), Die Klotoide als Trassierungselement, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn, Kaiserstrasse 31/37, (Dümmelerhaus).

KOBRYN, A., (1991a), Zur Berechnung von Absteckdaten bei der Anwendung der Blosskurve, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 116, No. 7, pp. 284-288

KOBRYN, A., (1991b), Zur Kurvenüberleitung bei der Ausfahrt von Autobahnen, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 53, No. 8, pp. 385-391.

KOBRYN, A., (1991c), Zur Festlegung der Trassengeometrie mittels Klotoide, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 98, No. 7, pp.229-233.

KOBRYN, A., (1993), Allgemeine Mathematische Übergangskurven Als Trassierungselement, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 118, No. 5, pp. 227-242.

LORENZ, E.H.H., (1971), Trassierung und Gestaltung von Strassen und Autobahnen, Bauverlag GMBH Weisbaden und Berlin.

MEEK, D.S., THOMAS, R.S.D., (1991), A Guided Clothoid Spline, Computer Aided Geometric Design, Vol. 8, No. 2, pp. 163-174.

MEEK, D.S., WALTON, D.J., (1989), The use of Cornu Spirals in Drawing Planar Curves of Controlled Curvature, Journal of Computational and Applied Mathematics 25, pp. 69-78.

MEEK, D.S., WALTON, D.J., (1992), Clothoid Spline Transition Spirals, Mathematics of Computation, July 1992, Vol. 59, No. 199, pp. 117-133

MEYER, C.F., (1965), Route Surveying, Third Edition. International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania USA.

MORLOK, E.K., (1978), Introduction to Transportation Engineering and Planning, McGraw-Hill, Inc.

MÜLLER, G., (1984), Ingenieur-Geodesie, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

NDUKWE, N.K., OJINNAKA, O.C., (1991), Optimum point method of curve ranging as applied to spirals, Survey Review, Vol. 31, No. 240, pp.86-98.

O'FLAHERTY, C.A., (1986), Highways, Volume 1, Traffic Planning and Engineering, Third Edition, Edward Arnold, London, England.

ÖZTAN, O., BAYKAL, O., (1991), Methods and Recommendations for Finding the Intersection Point of Two Clothoid Curves, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 116, No. 2, pp. 74-84.

ÖZTAN, O., BAYKAL, O., MÜFTÜOĞLU, O., ŞAHİN, M., (1995), Intersection of Spiral Curve with Circle, ASCE Journal of Surveying Engineering, Vol.121, No.1, pp. 3-12.

PHELAN, R.C., SUSSMAN, J.M., (1991), Maglev Technology: A Look at Guideway Construction and Maintenance Concerns, Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering Proceedings of Second International Conference.

POLUS, A., DAGAN, D., (1987), Models for Evaluating the Consistency of Highway Alignment, Transportation Research Record 1122, pp. 47-56.

PRESS, W.H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T., (1988), Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press.

REIMER, F., (1985), Klothoiden-Schnitte mittels zweier Kreise, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 47, No. 2, pp. 98-105.

SCHMIDT, H., (1991), Übergangsbogenberechnung durch numerische Integration mit einer Quadraturformel von Gauss, Vermessungstechnik und Raumordnung, Vol. 53, No. 8, pp. 361-372.

- SCHNÄDELBACH, K., (1983),** Zur Berechnung von Schnittpunkten mit der Klothoide, Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 108, No. 3, pp. 112-118.
- SCHOFIELD, W., (1972),** Engineering Surveying, V.1, Butterworth and Co Publishers Ltd, London.
- SCHUHR, P., (1986),** Application of Romberg Equation for The Calculation of Transition Curves from Diagrams of Curves, Rail International, Vol. 18, No. 1, pp. 17-21.
- SCHUHR, P., (1987),** Veränderung der Übergangsbogenform einer Gleisschere, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Vol. 94, No. 5. pp. 191-200
- SHARPE, R.J., THORNE, R.W., (1982),** Numerical Method For Extracting An Arc Length Parameterization, Computer Aided Design, Vol.14, No.2, pp.79-81.
- SHEPHERD, F.A., (1968),** Surveying Problems and Solutions, Edward Arnold (Publishers) Ltd., London.
- SHOUP, T.E., (1984),** Applied Numerical Methods for Microcomputer, Prentice-Hall, Inc., Englewood Clifs, New Jersey 07632.
- SOKOLNIKOFF, I.S., REDHEFFER, R.M., (1966),** Mathematics of Physics and Modern Engineering, Second Eddition, McGraw-Hill Book Company.
- STAFFELDT, H.J., (1986),** Praktische Trassierungstechnik mit programmierbaren Tisch- oder Taschenrechnern, Der Vermessungsingenieur, Vol. 37, No. 3, pp. 69-73
- TARI, E., (1996)** Geçki Elemanı Olarak Spline Eğrisi, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı V. Sempozyumu, 17-19 Haziran 1996, İstanbul.
- TARI, E., BAYKAL, O., (1995),** A New Transition Curve, First Turkish-German Joint Geodetic Days, September 27-28-29, 1995, İstanbul
- THOMAS, G.B., FINNEY, R.L., (1992),** Calculus and Analytic Geometry, 8th Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- TRIETSCH, D., (1987),** A Family of Methods for Preliminary Highway Alignment, Transportation Science, Vol. 21, No. 1, pp. 17-25.

UMAR, F., YAYLA, N., (1994), Yol İnşaatı, 4. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, Sayı. 1541.

WALTON, D.J., (1989), Spiral Spline Curves for Highway Design, Microcomputers in Civil Engineering 4, pp. 99-106.

WALTON, D.J., MEEK, D.S., (1989), Computer Aided Design For Horizontal Alignment, Journal of Transportation Engineering, Vol. 115, No. 4, pp. 411-424

WALTON, D.J., MEEK, D.S., (1990), Clothoidal Splines, Computers & Graphics, Vol. 14, No. 14, pp. 95-100.



ÖZGEÇMİŞ

Ergin Tarı 1967 yılında Bulancak'ta doğmuştur. İlk ve ortaokulu Bulancak'ta bitirdikten sonra 1984 yılında Trabzon Lisesinden mezun olmuştur. 1984 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünde başladığı Lisans öğrenimini 1988 yılında tamamlamış ve 1991 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programından yüksek mühendis olarak mezun olmuştur. Aynı yıl doktora eğitimine başlamıştır.

1989 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 1995-1997 yılları arasında 14.dönem TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Yönetim Kurulu üyesi olarak görev yapmaktadır. Halen İTÜ İnşaat Fakültesi Ölçme Tekniği Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.