

GÜZERGAHLARDA GEÇİŞ EĞRİSİ OLARAK UYGULANAN KLOTOİDLERİN ARA NOKTALARININ APLİKASYON YÖNTEMLERİ

Doç. Ömer Halis TOMBAKLAR
S.Ü.

1. GİRİŞ:

Geçen Yüzyıl'ın sonlarına doğru Karayolu taşımacılığında atlı arabalarla yapılan ulaşım, yerini yavaş yavaş motorlu taşıtlara bırakmaya başladı. Motorlu taşıtların gelişmesi ve hızlarının artması; alinyman ve daire yaylarından oluşan güzergahların yeniden dizayn edilmesini gerektirdi.

Daireden oluşan kurbpların başlangıçta, yarıçapın birden bire belirli bir değer alması ve merkezkaç kuvvetin taşıta bu noktada aniden etki etmesi, yolcuları oldukça rahatsız eder. Bu durumu önlemek için, alinymanla daire arasına heriki parçayada teğet bir geçiş eğrisi yerleştirilmesi esası kabul edilmiştir. Yapılan araştırmada eğriliği uzunluğu ile orantılı olarak artan Klotoid eğrisinin bu şartı sağladığı görülmüştür.

Ülkemizin ekonomik gelişmesi ve coğrafi bakımdan Avrupa ve Asya kıtaları arasında bir köprü oluşturması nedeniyle; yollarımız üzerindeki taşımalar çoğalmış ve mevcut yol ağının bir çok kesimlerinin bugünkü ve yakın gelecekteki ihtiyacı karşılamayacağı tesbit edilmiştir. Bu tesbit ülke düzeyinde toplam 12 000 kilometrelik bir otoyol ihtiyacı olduğunu ortaya çıkarmıştır. T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü 1993 yılına kadar 1600 km, 2000 yılınla kadar da 3 000 km otoyolu işletmeye açmayı planlamıştır. Bugüne kadar 1 200 km otoyol yaklaşık 2,5 milyar USA dolar'a değişik yerli ve yabancı firmalara ihale edilmiş olup yapım çalışmaları devam etmektedir. Ayrıca mevcut devlet yollarının bazı kesimleri de geçiş eğrili yollar olarak islah edilmelidir.

Bu durumda; yapımı planlanan bu yolların, Proje Hazırlama, Aplikasyon, Kamulaştırma ve Röleve alımı safhalarında gerek Kamu ve gerekse Özel sektördeki meslektaşlarımıza çok önemli görev, yetki ve sorumluluklar düşecektir.

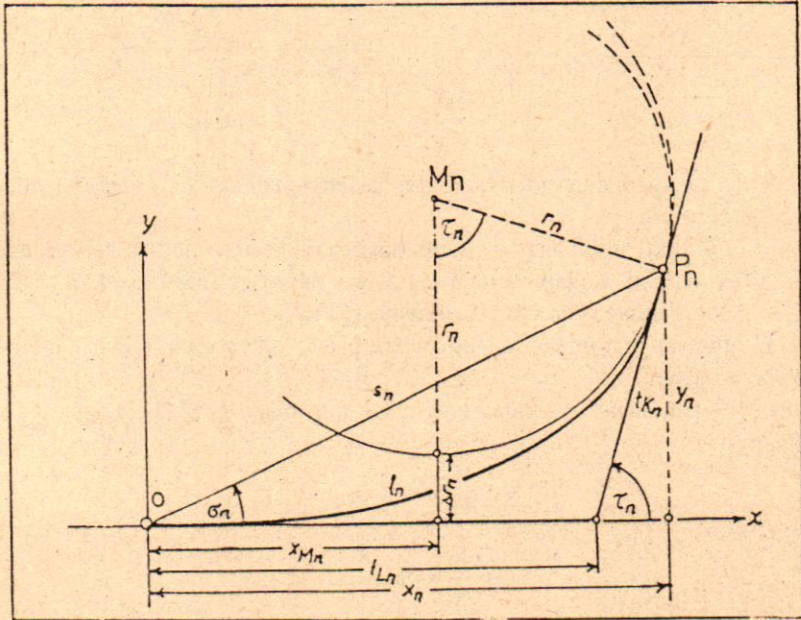
Bu bildiriye; hız yolları güzergahlarında geçiş eğrisi olarak uygulanan Klotoidler hakkında kısa bilgi verilecek ve Klotoid ara noktalarının aplikasyon yöntemleri örneklerle açıklanacaktır.

2. KLOTOİDİN TANIMI VE KLOTOİD ELEMANLARI

Klotoid eğriliği sürekli olarak artan bir yaydır. Bu yayın herhangi bir noktasının başlangıca olan L yay uzunluğu ile eğrilik yarıçapının çarpımı sabittir.

Klotoid elemanları ve bunların tanım harfleri şöyledir:

O	Klotoidin koordinat başlangıcı ve dönüm noktası,
A	Klotoidin parametresi,
P _n	Klotoide ait bir nokta,
X _n ,Y _n	Dönüm noktasında oluşturulan dik koordinat sistemdeki P _n noktasının koordinatları,
L _n	P _n Klotoid noktasının O klotoid başlangıç noktasına olan klotoid yay uzunluğu,
R _n	P _n noktasındaki eğrilik yarıçapı,
ΔR _n	Geçiş eğrisi payı, (daire yayının ötelenme payı)
X _{mn} ,Y _{mn}	Eğrilik dairesinin merkez noktasının koordinatları,
t _n	P _n noktasındaki teğet açısı,
S _n ,	O ve P _n noktasını birleştiren klotoid kiriş uzunluğu,
t _n	Klotoid kirişinin doğrultu açısı,
T _{K_n}	Kısa teğet uzunluğu,
T _{L_n}	Uzun teğet boyu,
OX	Ana teğet.



Şekil 2: Birim Klotoid Elemanları.
Birimklotoid elemanları küçük harflerle gösterilir (Şekil 2)

$$a=1, x_n, y_n, l_n, r_n, r_n, x_{mn}, y_{mn}, z_n, s_n, z_n, l_{kn}, l_{ln}$$

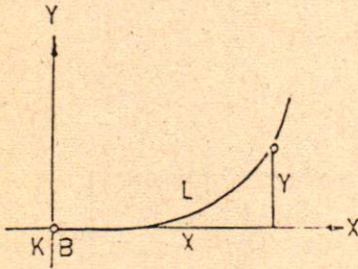
Bir güzergahın yatay kurb elemanları belli ise, önce; klotoid ana noktalarının aplikasyonu için gerekli yay elemanları hesaplanır.

Klotoid ara noktalarının aplikasyonu ise, daire yaylarının aplikasyonunda uygulanan yöntemlere benzer şekilde yapılır.

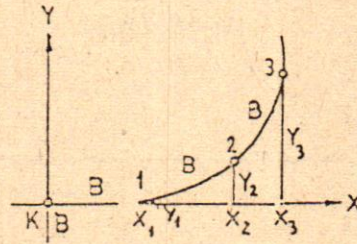
Aplikasyon dik veya kutupsal koordinatlara göre yapılır. Bu koordinatlar herhangi kiriş, kesen, teğet veya poligon hattına göre hesaplanabilirler. Bu bildiride teğet ve poligon hattına göre aplikasyonlar ele alınacaktır.

2.1 Dik koordinatlara göre aplikasyon

2.1.1 Ana Teğetten itibaren aplikasyon.



Şekil 3.a



Şekil 3.b

Bu yöntemin uygulanmasında klotoidin başlangıç noktası koordinat sisteminin başlangıcı olarak alınır.

Eşit yay aralıklı noktaların koordinatları; parametreler için L tablosundan doğrudan doğruya alınır. Bu tabloda tam sayı L yay uzunluklarına karşılık olan X ve Y dik koordinatları, esas teğete göre verilmiştir. (Şekil 3.a - 3.b)

Norm olmayan parametre değerleri konu ise; dik koordinatlar E tablosu yardımıyla hesaplanır.

Örneğin A parametresi ile klotoid noktaları arasında istenen B ara uzaklığı verilmiş olsun.

$$l_1 = \frac{A}{B} = B$$

$$l_2 = \frac{2B}{A} = 2b$$

$$l_n = \frac{nB}{A} = nb$$

oranları oluşturulur. l_1, l_2, \dots, l_n için E tablosundan $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots, x_n, y_n$

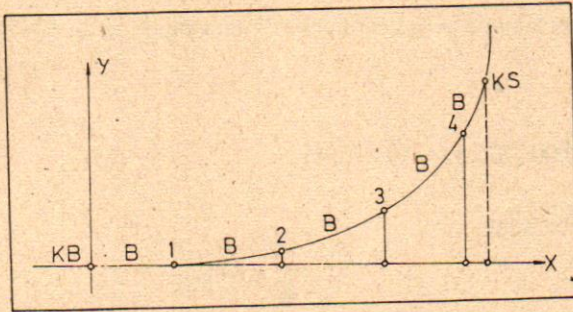
değerleri bulunur. Bu değerler A ile çarpılarak, aranan $X_1, Y_1; X_2, Y_2 \dots X_n, Y_n$ koordinatları elde edilir.

ÖRNEK: $A=260, B=20$ m olsun.

Değerlerin hesabı aşağıdaki tabloda görüldüğü gibidir.

l	x	y	L	X	Y
$l_1 = b = 0,076923$	0,076 9230	0,000 0759	20	20,000	0,020
$l_2 = 2b = 0,153846$	0,153 8439	0,000 6067	40	40,000	0,158
$l_3 = 3b = 0,230769$	0,230 7527	0,002 0482	60	59,995	0,533
$l_4 = 4b = 0,307692$	0,307 6231	0,004 8544	80	79,982	1,262
$l_5 = 5b = 0,384615$	0,384 4046	0,009 4789	100	99,945	2,465
$l_6 = 6b = 0,461538$	0,461 0147	0,016 3727	120	119,864	4,257
$l_7 = 7b = 0,538461$	0,537 3305	0,025 9813	140	139,706	6,755
$l_8 = 8b = 0,615385$	0,613 1823	0,038 7417	160	159,427	10,073

Klotoid, güzergah kilometresi tam sayılı noktalara göre applike edilecekse; hesap benzer şekilde yapılır. (Şekil 4)



Şekil: 4

Örneğin A parametresi, teğet nomtasının kilometresi ve klotoid yayının tüm L uzunluğu verilmiş olsun.

İlk tam sayılı noktaya karşılık olan kesirli yay uzunluğu B_1 , $(n-2)$ adet eşit uzunluklu yay uzaklığı B, sonuncu tam sayılı noktadan klotoid bitiş noktasına kadar olan yay parçası B_n ile gösterilsin. Bu durumda;

$$L = B_1 + (n-2) \cdot B + B_n \text{ olur.}$$

$$l_1 = \frac{B_1}{A}$$

$$l_2 = \frac{B_1 + B}{A}$$

$$l_3 = \frac{B_1 + 2B}{A}$$

$$l_{n-1} = \frac{B_1 + (n-2) B}{A}$$

$$l_n = \frac{B_1 + (n-2) B + B_n}{A}$$

Bu l değerlerine E tablosunda karşılık olan x ve y ler bulunur. Gerekiyorsa aynı zamanda r ve τ değerleri okunur. x, y ve r değerleri A ile çarpılarak, noktaların istenen X,Y koordinatları ile bunlara karşılık olan eğrilik yarıçapları elde edilir.

ÖRNEK: A= 250, R= 350 ve Klotoid başlangıç noktasının kilometresi= 12+736.53

İstenen: 25 m aralıklarla km. si tam sayı olan noktaların aplikasyon değerleri.

ÇÖZÜM: Klotoid yayı üzerindeki ilk tam sayılı nokta 12+750.00 dir. Bu durumda;

$$B_1 = 750.00 - 736.53 = 13.47 \text{ olur.}$$

Toplam uzunluk:

$$L = \frac{A^2}{R} = 178.57$$

Bitim noktasının kilometresi= 12+736.53+ 178.57 = 12+915.10 Sonuncu tam sayılı nokta 12+900 dür. Bu durumda $B_n = 15.10$ olur. Önce l değerleri hesaplanır.

$$l_1 = \frac{B_1}{A} \quad , \quad l_2 = \frac{B_1 + B}{A} \quad , \quad \dots \quad , \quad l_n = \frac{B_1 + (n-2) B + B_n}{A}$$

Klotoid başlangıcından itibaren noktalar ve bunların yay uzunlukları:

	Noktanın KM.si	L	= L/A
0	12 + 736.53	0,00	0,000 000
1	12 + 750.00	13.47	0,053 880
2	12 + 775.00	38.47	0,153 880
3	12 + 0.00	63.47	0,253 880
4	12 + 825.00	88.47	0,353 880
5	12 + 850.00	113.47	0,453 880
6	12 + 875.00	138.47	0,553 880
7	12 + 900.00	163.47	0,653 880
8	12 + 915.10	178.57	0,714 280

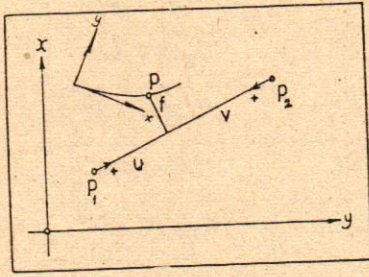
Aranan X ve Y koordinatları ise; E Tablosu yardımıyla l değerlerine karşılık olan ve oranlamayla bulunan x ve y değerlerinin A ile çarpılmasıyla elde edilir.

i	x	y	X=A.x	Y = A.y
0	0	0	0	0
1	0,053 8800	0,000 0274	13,470	0,007
2	0,153 8790	0,000 6073	38,470	0,152
3	0,253 8537	0,002 7271	63,463	0,682
4	0,353 7412	0,007 3840	88,435	1,846
5	0,453 3986	0,015 5720	113,350	3,893
6	0,552 5782	0,028 2727	138,145	7,068
7	0,650 8991	0,046 4689	162,725	11,617
8	0,709 6458	0,060 4559	177,411	15,114

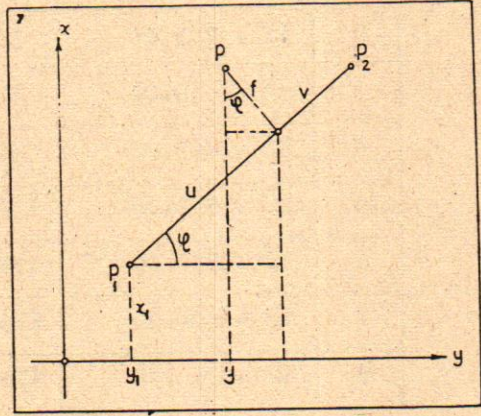
Dik koordinatlara göre ara noktaların aplikasyonu; ordinatların kısa, yani klotoidlerin basık olması durumlarında uygulanır.

2.1.2 Bir Poligon Kenarından İtibaren Dik Koordinatlara göre
Aplikasyon (Şekil 5-6)

Eğer noktalar güzergaha yakın bir poligon hattından aplane edilecekse önce yine bundan önceki konuda açıklandığı şekilde noktaların koordinatları hesaplanır. Daha sonra bu koordinatlar bilinen metotlarla poligon hattının koordinat sistemine dönüştürüldükten sonra aplikasyon değerleri bulunur.



Şekil 5



Şekil 6

P noktası u ve f değerleri yardımıyla P1 noktasından itibaren aplane edilir.

$$y = y_1 + u \cdot \sin \varphi - f \cdot \cos \varphi$$

$$y = y_1 = u \cdot \sin \varphi - f \cdot \cos \varphi$$

$$x = x_1 + u \cdot \cos \varphi - f \cdot \sin \varphi$$

$$x - x_1 = u \cdot \cos \varphi - f \cdot \sin \varphi$$

$$\pm (y - y_1) \cdot \cos \varphi = \pm u \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \pm f \cdot \cos^2 \varphi$$

$$(x - x_1) \cdot \sin \varphi = u \cdot \sin \varphi \cos \varphi + f \cdot \sin^2 \varphi$$

$$f = - (y - y_1) \cdot \cos \varphi + (x - x_1) \cdot \sin \varphi$$

$$P_1 P_2 = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{x_2 - x_1}{P_1 P_2} \quad \sin \varphi = \frac{y_2 - y_1}{P_1 P_2}$$

$$(y - y_1) \cdot \sin \varphi = u \cdot \sin^2 \varphi - f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

$$u = (y - y_1) \cdot \sin \varphi + (x - x_1) \cdot \cos \varphi$$

$$(x - x_1) \cdot \cos \varphi = u \cdot \cos^2 \varphi + f \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

P_2 den itibaren aplikasyon yapılacaksa;

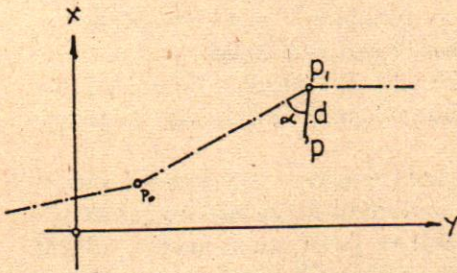
$$f = (x_2 - y) \cdot \sin \varphi + (y_2 - y) \cdot \cos \varphi$$

$$v = (y_2 - y) \cdot \sin \varphi + (x_2 - x) \cdot \cos \varphi$$

Not: Yukarıdaki bağıntılarda f, u ve v değerlerinin hesabında koordinatlar için kullanılan küçük harfler birim klotoideki notasyon ile ilgisi yoktur. Burada poligon güzergahının koordinat sistemi uygulanmıştır ve Klotoid noktalarına ait koordinatlar poligon güzergahı koordinat sistemine dönüştürülmüş olmalıdır.

2.2 Kutupsal koordinatlara göre aplikasyon

2.2.1 Bir Poligon Hattından İtibaren Aplikasyon



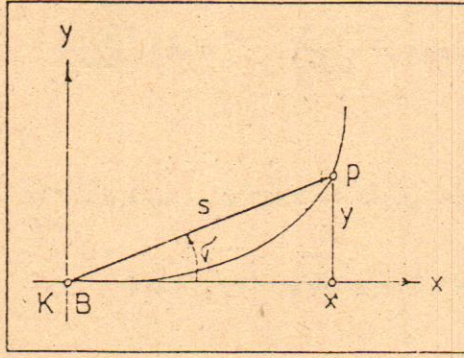
$$d = P_1 P = \sqrt{(Y - Y_1)^2 + (X - X_1)^2}$$

$$\alpha = (P_1 P_0) - (P_1 P)$$

d ve α değerleri yardımıyla P noktası P_1 noktasından applike edilir. (Şekil 7)

Şekil 7

2.2.2 Ana Teğetten İtibaren Kutupsal Koordinatlara göre Aplikasyon (Şekil 8)



Şekil 8

s ve τ kutupsal koordinatları ile ana teğetten itibaren aplikasyon yapılması görüşü uygun olan arazide kısa klotoid yayları için uygundur.

s ve τ kutupsal koordinatları dik koordinatlar yardımıyla hesaplanabilir.

$$s = \sqrt{X^2 + Y^2} = A.s = A. \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\tau = \text{arc tg} \frac{Y}{X} = \text{arc tg} \frac{y}{x}$$

nın değerleri E ve τ tablolarında verilmiştir.

2.2.3 Kiriş-Açı Yöntemine Göre Aplikasyon

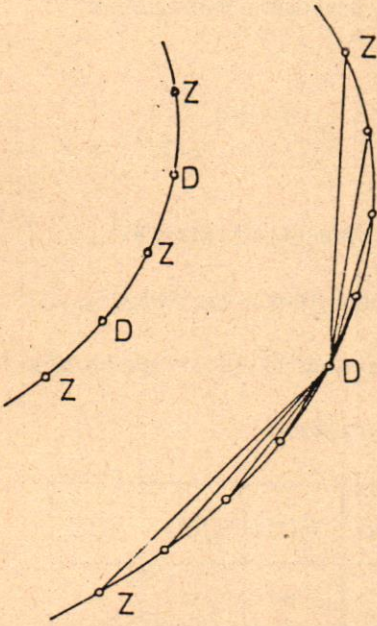
Aplikasyon noktalarının tamamının bir poligon hattından kutupsal koordinatlara göre aplikasyonu; bütün noktaların koordinatlarının vaziyet planı koordinat sistemine dönüştürülmesini gerektirir. İşlemin zorluğu bakımından bu durum ekseriya tercih edilmez. Bu bakımdan çok uzun eya eğriliği fazla olan kurbalarda bir kaç ana noktanın dik koordinatları hesaplanır ve bunlar vaziyet planı koordinat sistemine dönüştürülür ve önce bu ana noktalar applike edilir. Ara noktalar; bu ana noktalar arasına istenilen sıklıkta; teodolit ve şerit metre yardımı ile Kiriş-açı yöntemine göre kolayca ve hızlı olarak applike edilir.

Komşu ara noktalar arasındaki uzaklık arazi şartları ve yapılacak işte istenen inceliğe bağlı olmakla beraber, görüşe uygun arazide 200 m den büyük olmamalıdır.

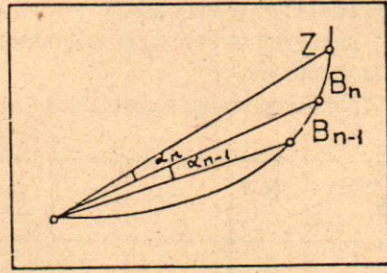
Aliyman ile Klotoid; Klotoid ile Daire ve farklı parametredeki klotoid parçalarının birleşim noktaları ana nokta olarak alınabilir. Bundan başka uzunklotoid yaylarında ihtiyaca göre tam sayı kilometrajlı bir veya birkaç nokta ana nokta olarak seçilebilir.

Kiriş açı yöntemi basit, yeter incelikli ve güvenilir bir yöntem olduğundan, genellikle; uygulamada diğer yöntemlere tercih edilir.

Yöntemin esası, uygun koşullarda klotoid üzerindeki tam şerit boyundaki kısa kirişlerin bir poligon güzergahı şeklinde aplikasyonudur. Kirişlerin uç noktaları ana noktaların birinden itibaren, teodolit ve çelik şerit metre yardımıyla çakılırlar. (Şekil 9)



Şekil 10



Şekil 9

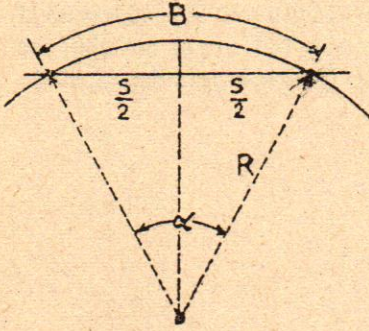
Aplikasyon için teodolite, teodolit konum noktasına göre her biri kirişe karşılık olan çevre açısı eklenmek suretiyle bulunan açılar verilir.

Aplikasyon sırasında oluşabilecek hataların uygun dağılımı için noktaların aplikasyonu; bakılan noktadan (Z) alet konum noktasına doğru yapılır. (Şekil 10)

Yayların aplikasyonunda s kirişi, B yayının eşit kabul edilerek yapılır. Bu kabulde yapılacak hatanın büyüklüğü ise; (Şekil 11)

$$B - S = R \cdot \alpha - 2R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

seriye açılarak;



Şekil 11

$$B - S = \frac{b^3}{24 R^2} - \frac{B^5}{1920 R^4} + \dots$$

ikinci terim ihmal edilirse;

$$B - S \cong \frac{B^3}{24 R^2}$$

formülüyle hesaplanır.

Formülden görüleceği gibi kirişi yaya eşit kabul etmekle yapılan hata yay ile yarıçap arasındaki orana bağlıdır.

Aplikasyonun doğruluğu bakımından aplikasyon aralığı seçimi için bir tablo aşağıda verilmiştir.

Aplikasyon aralığı seçim tablosu cm de B - S değerleri

B \ R	50	75	100	150	200	250	300
B = 5 m	-	-	-	-	-	-	-
10	2	1	-	-	-	-	-
20	13	6	3	1			
25	26	12	7	3	2	1	1
50	206	92	52	23	8	6	3

Dairede kirişe karşılık olan çevre açıları;

$$\alpha = \frac{B}{2R} \cdot \rho$$

formülüyle bulunur.

Klotoidlerde ise; Yay uzunluğu L_0 olan D alet konum noktası ve yay uzunluğu L_1 olan bir noktanın oluşturduğu kirişin doğrultu açısı;

$$\varphi = \frac{\rho}{6A} (L_0 L_2 + L_1^2)$$

formülüyle hesaplanır.

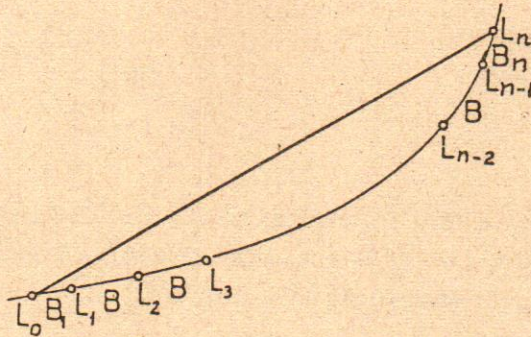
Bu formül yardımıyla kirişler poligonunun bütün hedef noktalarının L_0 alet konum noktası ile yaptıkları kiriş doğrultu açıları hesaplanabilir. Ancak böyle bir hesap şekli fazla işlemi gerektirir. Bu bakımdan kiriş-açı yönteminde çevre açıları teker teker hesaplanır ve bu açılar D noktasındaki τ_0 teğet açısına eklenerek doğrultu açıları hesaplanır. Yalnız aplikasyon yönündeki komşu ana nokta (Z) ye ait sonuncu doğrultu açısı; kontrol için ψ formülüyle hesaplanır.

Bütün ana noktalar uygulamada çoğu zaman 5, 10, 20, 25 m aralıklarla applike edilirler. Geçiş eğrilerinin başlangıç ve bitiş noktalarının kilometreleri ekseriya kesirlidir. Bu bakımdan ilk ve sonuncu kirişler genellikle kesirli ara noktaları birleştiren kirişler ise birbirine eşit uzunluktadır.

İleride yapılan işlemlerden ara kirişler yaylara eşit kabul edilmiş ve B ile gösterilmiştir.

Kiriş- açı metoduyla aplikasyonda dört durum konu olabilir.

1. Genel durum: (D) alet konum noktasında kesirli B_1 kirişi, (Z) hedef noktasında kesirli B_n kirişi, bunların arasında (n-2) adet eşit uzunlukta B kirişleri. (Şekil 12)



Şekil: 12

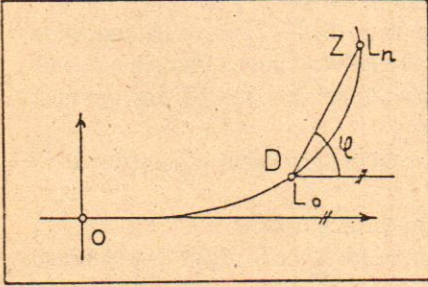
2. Durum: (D) Alet konum noktasında $B_1=B$ tam sayılı kiriş, (Z) hedef noktasında kesirli B_n kirişi.

3. Durum: (D) Alet konum noktasında kesirli B_1 kirişi, (Z) hedef noktasında tam sayılı $B_n=B$ kirişi.

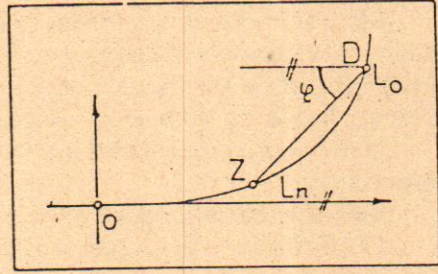
4. Durum: Yalnız n adet tam sayılı B kirişleri.

Bu dört duruma ait hesaplarda D alet konum noktası ile Z hedef noktasının Klotoid başlangıcına yakın olup olmaması önemlidir.

D konum noktası klotoid başlangıcına göre Z noktasından daha yakın ise, yani $L_n > L_0$ durumu mevcut ise B_1 , B ve B_n değerleri ileride verilecek formüller ve hesap cetvellerinde pozitif olarak hesaba girerler. (Şekil 13.)



Şekil 13



Şekil 14

Z Hedef noktası klotoid başlangıcına göre D noktasından daha yakın ise, yani $L_n < L_0$ durumu mevcut ise, B_1 , B ve B_n değerleri ileride verilecek formüller ve hesap cetvellerinde negatif olarak hesaba girerler. (Şekil 14).

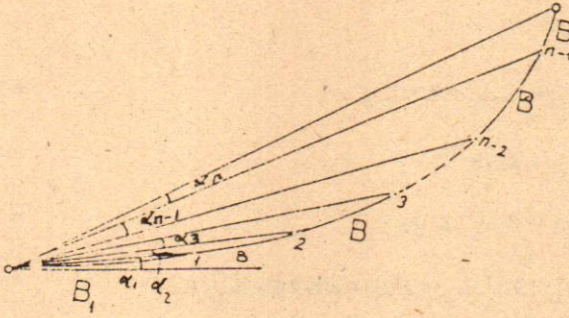
$L_n > L_0$ durumunda eklenecek α açıları pozitif (Şekil 15),

$L_n < L_0$ durumunda ise negatif olarak hesaba girerler.

Birbirini takip eden α lar arasındaki $\Delta\alpha$ farkları eşit kiriş uzunlukları için sabittir.

$$\Delta a = K.2B^2$$

hesabında B nin karesi alındığından daima pozitif olarak hesaba dahil edilir.



Şekil 15

Hesaplarda yanlışılmamak ve kolaylık bakımından işlemler bir şema içerisinde yürütülür. (Cetvel 1 ve Cetvel 2).

Tablodaki K yardımcı değeri norm parametreler için A tablosundan alınabilir. Parametre norm değilse K değeri

$$K = \frac{\rho}{6A^2}$$

formülüyle hesaplanır.

Genel Durum: (D) Alet konum noktasında kesirli B_1 kirişi, (Z) hedef noktasında kesirli B_n kirişi bulunması.

Hesaplar aşağıdaki formüllerle yapılır.

$$\begin{aligned} \tau_0 &= K \cdot 3 L_0^2 & &= K.T \\ \alpha_1 &= K \cdot (3L_0 + B_1) \cdot B_1 & &= K.W_1 \\ \alpha_2 &= K \cdot (3L_0 + 2B_1 + B) \cdot B & &= K.W_2 \\ \Delta\alpha_3 &= K \cdot 2B^2 = \text{Sabit} & &= K.V_3 \\ \alpha_3 &= \alpha_2 + \Delta\alpha_3 & &= K.W_3 \\ \Delta\alpha_4 &= K \cdot 2B^2 = \text{Sabit} & &= K.V_4 \\ \alpha_4 &= \alpha_3 + \Delta\alpha_4 & &= K.W_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_{n-2} &= \alpha_{n-3} + \Delta \alpha_{n-2} & &= K \cdot W_{n-2} \\
\Delta \alpha_{n-1} &= K \cdot 2B^2 & &= K \cdot V_{n-1} \\
\alpha_{n-1} &= \alpha_{n-2} + \Delta \alpha_{n-1} & &= K \cdot W_{n-1} \\
\alpha_n &= K \cdot [3L_o + 2B_1 + 2(n-2)B + B_n] \cdot B_n & &= K \cdot W_n
\end{aligned}$$

$$\varphi'_1 = \tau_o \alpha_1 = (K \cdot T + K \cdot W_1) = K(T + W_1) = K \cdot G_1$$

$$\varphi'_2 = \varphi'_1 + \alpha_2 = K T + W_1 + W_2 = K G_1 + W_2 = K \cdot G_2$$

$$\varphi'_3 = \varphi'_2 + \alpha_3$$

$$\varphi_n = \varphi'_{n-1} + \alpha_n = K \cdot G_n$$

İlk olarak K gözönüne alınmaksızın aşağıdaki yardımcı değerlerle hesap yapılır.

$$T = 3L_o^2$$

$$W_1 = (3L_o + B_1)B_1$$

$$W_2 = (3L_o + 2B_1 + B)B$$

$$V_3 = (2B)^2 = V$$

$$W_3 = V_2 + V_3$$

$$V_4 = 2B^2 = V$$

$$W_4 = V_3 + V_4$$

$$W_{n-2} = W_{n-3}^2 + V_{n-2}$$

$$V_{n-1} = 2B^2 + V$$

$$W_{n-1} = W_{n-2}^2 + V_{n-1}$$

$$W_n = 3 L_o^2 + 2B_1 + 2(n-2)B + B_n \cdot B_n$$

$$G_1 = T + W_1$$

$$G_2 = G_1 + W_2$$

$$G_3 = G_2 + W_3$$

$$G_n = G_{n-1} + W_n$$

$$\Phi'_1 = K.G_1$$

$$\Phi'_2 = K.G_2$$

$${}_n\Phi = K.G_n$$

Alet konum noktasında tam sayılı bir $B_1=B$ kirişi, hedef noktasında kesirli B_n kirişi olması durumunda bundan öne verilen formüllerde geçen B_1 yerine B konularak,

Alet konum noktasında kesirli B_1 kirişi, hedef noktasında tam sayılı $B_n = B$ kirişi olmaması durumunda ise; önceki verilen formüllerde B_n yerine B konularak,

n adet tam sayılı B kirişleri durumunda da önceki verilen formüllerde B_1 ve B_n yerine B konularak W ve V formülleri sadeleştirilir ve hesaplar bu formüllerle yapılır.

Başlangıçta kesirli B_1 kirişleri olması durumunda klotoid ara noktalarının kiriş-açı yöntemiyle uygulasyonu için hazırlanmış olduğum Cetvel 1 üzerinde, başlangıçta $B_1 = B$ tam sayılı kirişler olması durumunda Cetvel 2 üzerinde hesaplar yürütülür.

Klotoid ara noktalarının Kiriş açısı yöntemiyle uygulasyonu için hazırlanan Cetvel 1'in kullanılması ve hesap düzeni

Cetvelin sol üst köşesine uygulayın hangi kilometreler arasında yapılacağı, sağ üst köşesine ise; sabit olan K değeri norm parametreler için A cetvelinden alınarak, normsuz parametreler için, $K = \rho^{cc}/6 A^2$ formülünden hesaplanarak, ayrıca $V=2B^2$ eşitliğinden bulunan V değeri yazılır.

1. Sütuna; alet konum noktası ve hedef noktası,
2. Sütuna; ara noktaların nu.ları
3. Sütuna; noktaların kilometreleri,
4. Sütuna; bu kilometrelere karşılık olan klotoidin başlangıcından itibaren yay

uzunlukları yazılır.

5. Sütuna; kısa giriş uzunlukları yazılır.

Bu sütun yazılırken;

$L_n > L_0$ durumunda B_1, B ve B_n değerleri pozitif, $L_n < L_0$ durumunda bu değerler negatif olarak yazılmasına dikkat edilir.

6. sütunda; W_i değerlerinin hesabı için gerekli formüller verilmiştir.

Bu sütunda;

(n-1) inci nokta için;

$W_{n-1} = W_{n-2} + V$ yazılmıştır.

n-1 inci satır bu eşitlikle hesaplanır

n inci nokta için; (1) veya (2) yazılmıştır. Hedef noktasında kesirli B_n girişi varsa (1) Yani;

$$W_n = [3L_0 + 2(n-1) B + B_n] B_n$$

Hedef noktasında $B_n = B$ tam sayılı giriş varsa (2) yani;

$$W_n = W_{n-1} + V$$

Formülleri yardımıyla hesap yapılır.

7. Sütuna; hesaplanan W_i değerleri işaretleriyle birlikte yazılır.

8. Sütuna; G_i değerlerinin formülleri yazılmıştır.

9. Sütuna; hesaplanan G_i değerleri yazılır.

10. Sütuna $\Phi' = K.G_i$ formülüyle hesaplanan değerler

11. Sütuna; hesaplanan düzeltme miktarları yazılır.

Φ açıları yaklaşık formüllerden hesaplandığı için; DZ yay uzunluğu 250 m.den az ve $g < 0,5$ den küçük olduğu zaman $\Delta\Phi^{cc}$ düzeltme değerlerini hesaplamaya gerek yoktur.

DZ yay uzunluğu 250 m den fazla veya $g > 0,5$ den büyükse ve daha fazla inçelik isteniyorsa $\Delta\Phi^{cc}$ düzeltmeleri ÇİZELGE 3 yardımıyla hesaplanır.

ÇİZELGE: 3- Düzeltme Değerleri Hesap Çizelgesi

	i	L_i	$l_i = L_i/A$	$b = l_i - l_0$	$l = l_0 + l_i$	$g = b^2 \cdot l$	$\Delta \psi^{cc}$
D	0						
	1						
	2						
	3						
	•						
	•						
Z	n						

ÇİZELGE 3 teki sütun başlıkları üzerindeki bağıntular yardımıyla g değerleri hesaplanır. g değerlerine karşılık olan düzeltme miktarlar: $\Delta \psi^{cc}$ düzeltme miktarları tablosundan alınarak çizelge 3 teki yerlerine yazılır.

Gereksiz hesap yapmamak için g nin hesabına n. satırdan başlanır ve ilk satıra doğru devam edilir. $\Delta \psi$ için istenen inceliğe gelince hesaba devam edilmez. Bulunan Δy değerleri cetvel 1 deki yerine yazılır.

12. Sütun;

Bulunan $\Delta \psi^{cc}$ değerleri Φ' değerlerinden çıkılarak aplikasyon için gerekli Φ' doğrultu açıları elde edilir.

Teodolitlerdeki açı bölümü saat ibresinin hareketi yönünde büyüdüğünden, klotoid başlangıcı ve ana teğete göre sağ kurbaların aplikasyonu son noktadan alet noktasına doğru olmak üzere kilometrelere karşılık olan y açılarının aynen uygulanmasıyla yapılır.

Sol kurbaların aplikasyonu ise bulunan Φ açılarının 400^g dan çıkarılmasıyla elde edilen $(400 - \Phi)$ açıları yardımıyla olur. (13. Sütun)

Yapılan hesapların kontrolü iki yoldan yapılabilir.

1- Ana noktaların dik koordinatları yardımıyla,

$$\varphi = \arctan \frac{Y}{X}$$

2- Teğet- giriş açısının yaklaşık hesabı formülüyle

$$\psi' = K \cdot (L_0^2 + L_0 L_n + L_n^2)$$

NOT: Hesaplarda yanılmamak için uygulamada her iki cetvelin arkasına Şekil 12, 13 ve 14 ün çizilmesinde yarar vardır.

Klotoid Ara Noktalarının Giriş-açı yöntemiyle aplikasyonu için hazırlanan Cetvel 2 nin kullanılması ve hesap düzeni

$$W_n = W_{n-1} + V$$

Doğrultu Açısının Δy Düzeltme miktarını Veren Yardımcı Tablo

g	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0,0	0 ⁰	0	0	0	0	1	1	1	2	2	0
0,1	2	3	3	4	4	5	6	7	7	8	1
0,2	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	1
0,3	20	21	23	24	26	27	29	31	32	34	2
0,4	36	37	39	41	43	45	47	49	51	53	2
0,5	56	58	60	63	65	67	70	72	75	78	2
0,6	80	83	86	89	92	94	97	100	103	107	3
0,7	110	113	116	119	123	126	130	133	137	140	3
0,8	144	147	151	155	159	163	167	171	175	179	4
0,9	183	187	191	195	199	203	208	212	216	221	4
1,0	225	230	234	239	244	248	253	258	263	268	5
1,1	273	278	283	288	294	299	304	310	315	320	5
1,2	326	331	336	341	347	352	358	364	370	376	6
1,3	382	388	394	400	406	412	419	425	432	438	6
1,4	445	451	457	463	470	476	483	490	497	504	6
1,5	511	518	525	532	539	546	553	560	567	574	7
1,6	582	589	597	604	612	619	627	634	642	649	7
1,7	657	665	673	681	689	697	705	713	721	729	8
1,8	737	745	754	762	771	779	787	795	804	812	8
1,9	821	830	839	848	857	866	875	884	893	902	9
2,0	912	921	930	939	949	958	968	977	987	997	9

Tabloya giriş; $g = b^2$ $b = l_2 - l_1$ ve $l = l_1 + l_2$

6. ve 7. sütunlar hariç; bütün sütunlar Cetvel 1 de olduğu gibi hesap yapılarak doldurulurlar.

6. Sütunda; Alet konum noktasında tam sayılı kirişlerin hesabında yardımcı W_i değerlerine ait bağıntılar verilmiştir.

bu sütunda; $(n-1)$ inci nokta için

$$W_{n-1} = W_{n-2} + V$$

$(n-1)$ inci satır bu formülle hesaplanır. n . nokta için (3) veya (4) yazılmıştır. Hedef noktasında kesirli B_n kirişi varsa; (3) yani;

$$W_n = [3L_0 + 2B_1 + 2(n-2)B + B_n] \cdot B_n$$

Hedef noktasında $B_n = B$ tam sayılı kiriş varsa; (4), yani;

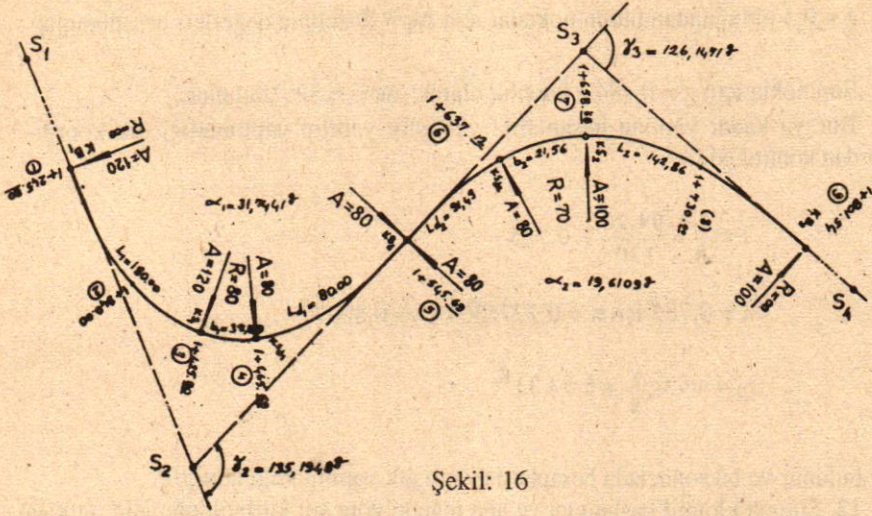
$$W_n = W_{n-1} + V$$

bağıntıları yardımıyla hesap yapılır.

7. Sütuna ise hesaplanan W_i değerleri işaretleriyle birlikte yazılır.

Kiriş-Açı yöntemiyle aplikasyon için örnekler:

Burada şekil 17 de verilen dönüm eğrisinin ara noktalarının aplikasyonu için 2 örnek ele alınacaktır.



$g < 0.5$ olduğundan bütün noktalar için $\Delta\phi^{cc}$ düzeltme değerleri hesaplanmıştır.

Son nokta için $g = 0,484$ e karşılık olarak $\Delta\phi^{cc} = 52^{cc}$ bulunur.

Buraya kadar yapılan hesaplarda yanlışlık yapıp yapılmadığı dik koordinatlardan kontrol edilir.

$$1 = \frac{L}{A} = \frac{94,20}{120} = 0,785$$

$$1 = 0,785 \text{ için } x = 0,7775804 ; y = 0,800777$$

$$\phi = \arctg \frac{y}{x} = 6,5331^{\circ}$$

bulunur ve bu sonuçlarda hesaplarda yanlışlık yapılmadığı anlaşılır.

13. Sütuna klotoid başlangıcı ve ana teğede göre sol kurb olduğu için $(400-\phi)$ değerleri hesaplanarak yazılır.

(ÖRNEK 2)
Klotoidlerin Kiriş Açılı Metoduyla Aplikasyonu İçin Cetvel 1 A-80 $R=80$ $K=5786$
(Alet Konum Noktasında Kesirli Kirişler İçin) Sağ Luv $V=28^{\circ} 20'$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Kilometre	L_1	B_1				W_1	C_1	$\phi^{\circ} = k \cdot C_1$	$4\phi'$	ϕ_1°	Sokulmalar için açılar		
0	1+545.69	0.00	$T = 3 \cdot L_0^2$			0.00	—	8 10 00 74	6 10 00 6	6 10 00 6	6 10 00 6	6 10 00 6	6 10 00 6
1	+540	5.69	+5.69	$W_1 = (3L_0 + B_1) B_1$	31	$C_1 = T + B_1$	31	0 05 30	0 05 30	0 05 30			
2	+570	15.69	+10	$W_2 = (3L_0 + 2B_1 + B) \cdot B$	214	$C_2 = C_1 + B_2$	214	0 40 78	0 40 78	0 40 78			
3	+510	25.69	+10	$W_3 = W_2 + V$	44	$C_3 = C_2 + B_3$	440	1 09 42	1 09 42	1 09 42			
4	+570	35.69	+10	$W_4 = W_3 + V$	64	$C_4 = C_3 + B_4$	1476	2 11 21	2 11 21	2 11 21			
5	+500	45.69	+10		84		2028	3 44 16	3 44 16	3 44 16			
6	+480	55.69	+10		104		3102	5 14 27	5 14 27	5 14 27			
7	+480	65.69	+10		124		4212	7 15 43	7 15 43	7 15 43			
8	+470	75.69	+10		144		5340	9 43 55	9 43 55	9 43 55			
9	1+445.69	80.00	+13	(1)	170		6480	10 41 05	10 41 05	10 41 05			
10													
11				$W_{n-1} = W_{n-2} + V$									
12				(1) veya (2)			$C_n = C_{n-1} + B_n$						
Hedef noktasında kesirli B_n Kiriş Varsa:						Hedef noktasında tam sayılı $B_n = B$ kiriş varsa							
(1) $W_n = [3L_0 + 2B_1 + 2(n-2)B + B_n] B_n$						(2) $W_n = W_{n-1} + V$							
NOT : L_0 durumunda bağlantılarda B_1, B_2 ve B_n değerleri pozitif, $L_n < L_0$ durumunda B_1, B_2 ve B_n değerleri negatif alınacaktır.													

ÖRNEK 2: Alet konum noktasında ve hedef noktasında kesirli kiriş olması durumu. ($L_n > L_0$ durumu)

VERİLER:

$A = 80$; $R = 80$ m ; $L_{d1} = 80$ m

KB_{d1} noktasının kilometresi: 1+545.69

KS_{d1} noktasının kilometresi : 1+465.69

Alet konum noktası olarak klotoidin KB_{d1} (1+545.69) noktası seçilmiştir.
1+465.69 dan 1+545.69 a doğru aplikasyon yapılacaktır.

ÇÖZÜM:

$R=80$ m olduğundan her 10 m de bir aplikasyon yapılacağı ortaya çıkar.

Cetvelin üst kısmı ile 1,2,3 ve 4 üncü sütunlar Cetvel 1 de hesap yönteminde anlatıldığı gibi hesaplanır ve yerlerine yazılırlar.

5. Sütuna; $L_n > L_0$ olduğundan B_1 , B ve B_n değerleri pozitif olarak yazılır.

6. Sütun; Hedef noktasında kesirli B_n kirişi olduğundan Cetvelin altındaki (1) formülüyle hesaplanır.

7,8,9 ve 10 uncu sütunlar daha öne açıklandığı gibi hesaplanır ve yazılırlar.

11. Sütun;

$$2=b^2/1; b=l_i - l_0=l_i - 0 = l_i ; l = l_0+l_i=0 +l_i=l_i$$

$g=l_i^3$ olur, bu eşitlikle $g = 1.000$ olarak bulunur.

$g > 0,5$ olduğundan tüm ara noktalar içerir. $\Delta\psi^{cc}$ değerleri CETVEL 3.a yardımıyla hesaplanır ve cetvel 1 deki 11. sütuna yazılır.

12. sütuna düzeltilmiş y açıları yazılır.

Buraya kadar yapılan hesaplarda yanlışlık yapıp yapılmadığı dik koordinatlarından kontrol edilir.

i	L_i	$l_i=L_i / A$	$g=l_i^3$	$\Delta\psi^{cc}$
0	0.00	0		
1	5.69	-		
2	15,69	-		
3	25,69	0,321	0,033	0
4	35,69	0,446	0,089	2
5	45,69	0,571	0,186	8
6	55,69	0,696	0,337	26
7	65,69	0,821	0,553	67
8	75,69	0,946	0,847	163
9	80,00	1,000	1,000	225

14565 69den 1465 69: Klotoidlerin Kiris Aç Metoduyla Aplikasyonu İçin Cetvel 1 A=80 K=1-16,5786
 (Alet Noktasında Kesirli Kirisler İçin) Sağ Kurb $V=2R^2=200$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (400-V)
0	0	1+545.49	0.00	-	$T=3 \cdot \frac{2}{0}$	0.00	-	-	8	0	0	6
1		+540.-	5.49	+5.49	$V_1 = (3L_0 + B_1) \cdot B_1$	32	$G_1 = T + B_1$	32	0	05	30	0
2		+530.-	15.49	+10	$V_2 = (3L_0 + 2B_1) \cdot B_1$	214	$G_2 = G_1 + B_2$	344	0	40	78	0
3		+520.-	25.49	+10	$V_3 = V_2 + V$	424	$G_3 = G_2 + B_3$	660	1	09	42	1
4		+510.-	35.49	+10	$V_4 = V_3 + V$	614	$G_4 = G_3 + B_4$	1274	2	11	21	-2
5		+500.-	45.49	+10		824		2088	3	44	16	-8
6		+490.-	55.49	+10		1024		3102	5	14	27	-16
7		+480.-	65.49	+10		1214		4314	7	15	53	-27
8		+470.-	75.49	+10		1424		5730	9	49	95	-43
X	9	1+465.69	80.00	+10	(1)	1790		6440	10	61	03	-285
	10							8490	10	58	78	
	11				$V_{n-1} = V_{n-2} + V$							
	12				(1) veya (2)			$G_n = G_{n-1} + B_n$				
Hedef noktasında kesirli B_n Kirisi varsa: (1) $V_n = [3L_0 + 2B_1 + 2(n-2)B_2 + B_n] \cdot B_n$						Hedef noktasında tam sayılı B_n Kirisi varsa (2) $V_n = V_{n-1} + V$						
NOT : $L_p < L_0$ durumunda bağlantılarda B_1, B_2 ve B_n değerleri pozitif, $L_n < L_0$ durumunda B_1, B_2 ve B_n değerleri negatif alınacaktır.												

(ÖRNEK 2)

$I_9 = L/A = 80/80 = 1,000$ için A tablosundan $\phi = \sigma = 10,58$ 77g bulunur ve hesaplarda yanlışlık yapılmadığı anlaşılır.

Klotoid başlangıcı ve ana teğete göre sağ kurb olduğundan 12. sütunda hesaplanan y açılırları yardımıyla aplikasyon yapılır.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

KASPER, H., SCHÜRBA, W., LORENZ, H. "Die Kloide als Trassierungselement" Bonn 1968

LORENZ, H. "Trassierung und Gestaltung von Strassen und Autobahnen" Bonn 1971

OSTERLOCH, H. "Strassenplanung mit Klothoiden" Wiesbaden 1965

STOFFEL, F. "Geometrische und Kinematische Probleme der Gestaltung von Strassen in Grund und Aufriss. Diss. Bonn 1969

TOMBAKLAR, Ö.H. "Yollarda Geçiş Eğrileri" Konya 1976

TOMBAKLAR, Ö.H. "Yollarda Geçiş Eğrilerinin Aplikasyon Yöntemleri, Eksen Hesaplarının Otomasyonu" Konya 1979.