

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Demir, Üst, Yan. Sta.  
(Uzun Kay. Yol.)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Övaciñođlu

1991

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON  
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 150  
255

Alındığı Yer : Y. T. Ü

Tarih : 29.8.1995

Fatura : -

Fiyatı : 30.000 TL.

Ayniyat No : 1-16

Kayıt No : 51556

UDC : .....

Ek : .....

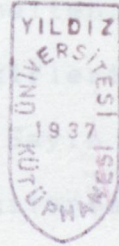
Y. T. Ü.

KÜTÜPHANE DOK. DAİ. BAŞKANLIĞI

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ YANAL STABİLİTESİ  
(UZUN KAYNAKLI YOLLARDA)



YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSİ  
AHMET OVACIKLIOĞLU

İSTANBUL-1991

## KONULARIN İÇERİĞİ

## SAYFA

1	2
3	1
4	3
5	6
6	6
7	7
8	9
9	13
10	13
11	13
12	13
13	13
14	13
15	13
16	13
17	13
18	13
19	13
20	13
21	13
22	13
23	13
24	13
25	13
26	13
27	13
28	13
29	13
30	13
31	13
32	13
33	13
34	13
35	13
36	13
37	13
38	13
39	13
40	13
41	13
42	13
43	13
44	13
45	13
46	13
47	13
48	13
49	13
50	13
51	13
52	13
53	13
54	13
55	13
56	13
57	13
58	13
59	13
60	13
61	13
62	13
63	13
64	13
65	13
66	13
67	13
68	13
69	13
70	13
71	13
72	13
73	13
74	13
75	13
76	13
77	13
78	13
79	13
80	13
81	13
82	13
83	13
84	13
85	13
86	13
87	13
88	13
89	13
90	13
91	13
92	13
93	13
94	13
95	13
96	13
97	13
98	13
99	13
100	13

Tez çalışmamı yönelten, sürekli ilgi ve desteğini e-sirgemeyen, değerli fikirlerinden yararlandığım Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Aydın EREL'e teşekkür eder, en derin saygılarımı sunarım.

	SAYFA
ÖZET	58
SUMMARY	63
BÖLÜM 1- GİRİŞ	1
BÖLÜM 2- MEKANİK SİSTEM OLARAK YOL	3
BÖLÜM 3- YOLA ETKİ EDEN DİRENÇLER	6
3.1 RAYIN EĞİLME DİRENCİ	6
3.2 TRAVERS-RAYIN DÜNMEYE KARŞI DİRENCİ	7
3.3 YOLUN YANAL KAYMA DİRENCİ	9
BÖLÜM 4- <u>BURKULMA (BUKULME) GÜVENLİĞİ HESABI</u>	13
4.1 YOL ÇEVRESİNİN ATALET MOMENTİ ESASINA GÜRE HESAP (MEIER YÖNTEMİ) YÖNTEMİ	15
4.1.1 YOL ÇERÇEVESİNİN ATALET MOMENTİ	19
4.1.2 MEIER YÖNTEMİ İÇİN ÖZET FORMULLER	21
4.1.3 KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI VE STABİLİTE	22
4.2 DİRENÇLERİ AYIRARAK HESAP YÖNTEMİ (NEMESDY YÖNTEMİ)	23
4.2.1 KRİTİK BURKULMA KUVVETİ	28
4.2.2 PARAMETRELERİN DEĞİŞİMİ	33
4.2.3 HESAP ÖRNEKLERİ	36
4.2.4 DEĞİŞİK ETKİ PARAMETRELERİNE GÜRE SONUÇLAR	41
4.3 RAYIN İSİDAN DOLAYI BUKULMESİNE AIT GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ	51
4.3.1 EKSENEL DİRENCİN DEĞİŞKEN BÖLGESİ ( $U_{max} \leq U_*$ ) İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ İLE HESAP YÖNTEMİ	56

#### 4.3.2- EKSENEL DİRENCİN SABİT BÖLGESİ

( $U_{max} > U_x$ ) İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ

İLE HESAP YÖNTEMİ

58

BÖLÜM 5- SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

63

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

İkinci bölümde, burkulma (bükülme) güvenliği hesabı anlatılmaktadır. Hesap ile ilgili birinci grup yöntem (Maler yöntemi), ikinci grup yöntem (Nemessy yöntemi) ve son yıllarda (rayın ısıdan dolayı bükülmesine ait) Arnold B. Kerr tarafından geliştirilmiş analiz yöntemi, grafikler yardımıyla açıklanmıştır. Formülleri çıkarılarak, yöntemlerle ilgili hesap örnekleri yapılarak, diğerleri sonuçlar grafik ve tablolar halinde gösterilmiştir. Değişik vücut parametrelerine göre sonuçlar değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde, hesap yöntemleriyle ilgili değerler indirilmesi yapılarak, kaynaklı yatacaz yarı stabilite için en güvenli ve ekonomik yaklaşımlar araştırılmıştır.

## ÖZET

Demiryolu üstyapısının yan al stabilitesinin incelenmesi konusunu içeren bu tez üç ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, mekanik sistem olarak yol anlatılmış, demiryolu çerçevesinin kuvvet etkisi ve yol durumundaki düzensizlikler nedeniyle meydana gelen gerilmeler karşısındaki davranışı belirtilmiş, yola etki eden dirençler açıklanmıştır.

İkinci bölümde, burkulma (bükülme) güvenliği hesabı anlatılmıştır. Hesap ile ilgili birinci grup yöntem (Meier yöntemi), ikinci grup yöntem (Nemesdy yöntemi) ve son yıllarda (rayın ısıdan dolayı bükülmesine ait) Arnold D. Kerr tarafından geliştirilmiş analiz yöntemi, şekiller yardımıyla açıklanmış, formülleri çıkarılmış, yöntemlerle ilgili hesap örnekleri yapılmış, çıkarılan sonuçlar grafik ve tablolar halinde gösterilmiştir. Değişik etki parametrelerine göre sonuçlar değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde, hesap yöntemlerinin sayısal değerlendirilmesi yapılarak, kaynaklı yolların yan al stabilitesi için en emniyetli ve ekonomik yaklaşımlar karşılaştırılmıştır.

## SUMMARY

This thesis, covering the analysis of the Lateral Stability of the railroad structure, is composed of three main chapters.

In the first chapter, railway track is explained as mechanical system, the force effect and the action in case of tensions due to disorders in the track. Conditions of the railroad frame and the resistance effecting the road are stated.

In the second chapter, the calculation of the torsion safety, is explained, the first group method (Meier method), the second group method (Nemesdy method), and in the recent years, analysis method (for thermal track buckling) improved by Arnold D. Kerr is described by figures, formulas are given, the result obtained are shown as graphics and tables. Results are evaluated according to different effect parameters.

In the third chapter, by making numeric evaluations of the calculation methods, most safety and economic approaches for the lateral stability of welded roads are compared.

Bu tezde bu du 1- GIRIŞ ününe alınarak ustyapının

boyu Teknik ve ekonomik nedenlerle birçok demiryolu idare-  
sinde boşluksuz (Kaynaklı) yollar yapılmaktadır. Zira boş-  
luklu yollar yolun Stabilitesinin korunması açısından çok  
önemli olmalarına karşın, raylar arasındaki boşluklar yolda  
enerji ve konfer kaybına, büyük direnimlerin oluşmasına  
sebepe olmaktadır.

Contaların ortadan kalkması ile boşluksuz yollarda  
fiziksel ve statik problemler ortaya çıkmıştır (Bu prob-  
lemler boşluklu yollarda nadiren ortaya çıkar). Boşluksuz  
yollarda sadece kaynak yapılmamış olan ray ek yerlerinde  
uzama sözkonusudur. Boşluksuz yolların orta kesimleri  
statik olarak gerilmiş bir çubuk gibi olup, raylarda  
düzgün bir sıcaklık artışı  $\Delta T$ , termal genişleme gerilimine  
bağlı olarak aksenal bir basınç kuvveti meydana getirir.  
Bu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$F_{kr} = E \cdot A_p \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$F_{kr}$  (N) = Kritik kuvvet

$E$  (N/cm) = Elastisite modulu

$A_p$  (cm<sup>2</sup>) = İki rayın kesit alanı

$\alpha$  = Genleşme katsayısı

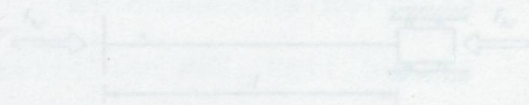
$\Delta T$  (C) = Kritik sıcaklık artışı

Maksimum çekme gerilmelerinde ray kırılmalarına  
rastlanabilir. Extremum basınç kuvvetlerinde ise yolun ani-  
den yatay veya düşey düzlem içinde yol eksenine göre çar-  
pılması sözkonusu olur. Bu da akut bir tehlikesine neden o-  
labilir.

Bu tezde bu durumlar gözönüne alınarak Ustyapının boyutlandırılmasında, böyle bir tehlikeyi önleyecek hususlar incelenmiştir.

(Şekil 1.1) Kritik burkulma kuvveti, Euler'e göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$F_{kr} = \frac{4\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2}$$



Basınç altındaki yolun sistemi (Şekil 1.1)

E	I	L	F <sub>kr</sub>
N/cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	N

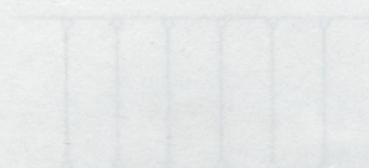
E = Elastisite modülü

F<sub>kr</sub> = Kritik burkulma kuvveti

l = Burkulma doğrultusundaki statik mesafe

I = Mesnetler arası moment

Basıncı taşıyan çerçevesiz, ince kesitli ve ideal elastik bir kirişe benzer şekilde, yüksek basınç kuvvetlerinde erişilebilen bir stabilite sınırına sahiptir. Bu durumda böyle bir yapıya girebilir ki, kuvvet etkisindeki veya yol durumundaki çok küçük bir düzensizlik ani bir burkulma etkisiyle yeterli olabilir.



Yukarıdaki eşitlik problemi çözümlenmiş homojen kesitli elastik kirişe göre daha karmaşıktır.

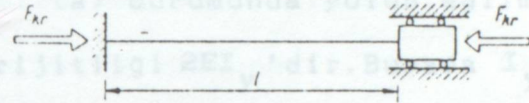
Bu karmaşıklık şöyle açıklanabilir.

Yüksek basınçta

## 2- MEKANİK SİSTEM OLARAK YOL

Homojen kesitli elastik ve doğru bir kirişte iki yönlü gerilme için (şekil 1.1) kritik burkulma kuvveti, Euler'e göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$F_{kr} = \frac{4\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2}$$



Basınç altındaki yolun sistemi (Şekil 1.1)

$E$	$I$	$L$	$F_{kr}$
$N/cm^2$	$cm^4$	$cm$	$N$

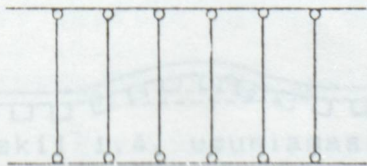
$E$  = Elastite modülü

$F_{kr}$  = Kritik burkulma kuvveti

$I$  = Burkulma doğrultusundaki atalet momenti

$L$  = Mesnetler arası açıklık

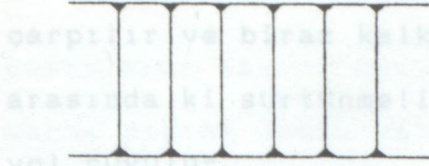
Demiryolu çerçevesi, ince kesitli ve ideal elastik bir kirişe benzer şekilde, yüksek basınç kuvvetlerinde erişilebilen bir stabilite sınırına sahiptir. Bu düşünceyle yol öyle bir labil duruma gelebilir ki, kuvvet etkisindeki veya yol durumundaki çok küçük bir düzensizlik ani bir burkulma etkisi için yeterli olabilir.



a) Mafsallı bağlantı

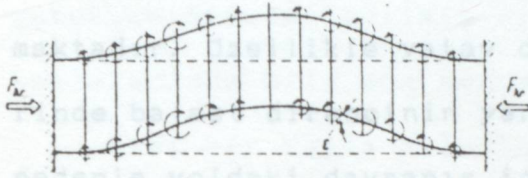
Yoldaki eğilme problemi şüphesiz homojen kesitli elastik kirişe göre daha karmaşıktır.

Bu karmaşıklık şöyle açıklanabilir.



b) Eğilmeye karşı rijit bağlantı

Şekil 1.2 Yol çerçevesini etkileyen sınır haller

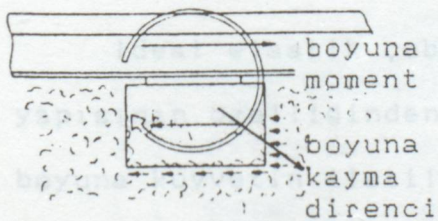


Ray ve traversler arasındaki dönme Şekil 1.3

Bu, statik olarak belirsiz 4 uçlu bir çerçevedir. Oysa ray bağlantısı rayla travers arasındaki küçük bir dönme açısının sınırladığı elastik bir bağlantı durumundadır.

Bu durumda, yolun gerçek eğilme rijitliği (a) ve (b) sınırı durumları arasında kalmaktadır. Yolun eğilmesinde travers ile ray eksenleri arasındaki açı sabit kalmaz.

(Şekil 1.3)



Şekil 1.4. uzunlamasına kuvvet ile uzunlamasına kayma direnci arasındaki eksen kayması

Yolun eğilmeye karşı diren- ci ray bağlantı elemanlarına, traverslere ve raylara bağlı

olup, sabit değildir ve teorik olarak iki sınır değeri vardır

(a) durumunda yolun eğilme rijitliği  $2EI_y$ 'dir. Burada  $I_y$  ray enkesitinin y eksenine göre atalet momentidir.

(b) durumunda ise, raylar traverslere rijit olarak bağlantılıdır.

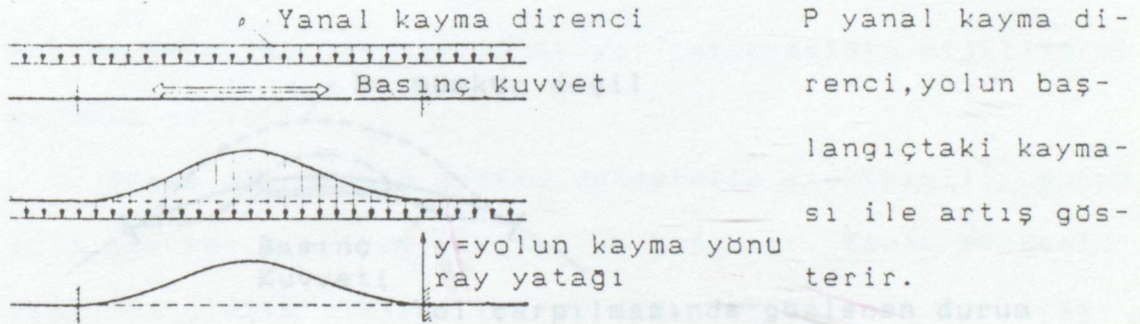
Yukarıda sözü edilen nedenlere bağli olarak normal basınç gerilmeleri yüklenmesi ortaya çıkarsa rayda şekil değiştirme olur. Bu olay aşağıdaki şekilde gelişir.

Önce ray ile travers arasında- ki eksen kaçıklığı nedeniyle ray

çarpılır ve biraz kalkar. (Şekil 1.4) Travers ile balast kurbanlarda basınç kuvvetleri etkisinde ki yol yalnızca arasında ki sürtünmeli bağlantının azalması sonucunda da kurba dışına doğru yatay kayma olur düşüncesi de hatalı yol bukulur.

Görülmüştür ki çarpılmaların % 1,2'si düşey düzlemde meydana gelmiştir. Bunun nedeni  $2EI_x$  değerindeki büyük eğilme mukavemeti ve yolun kütesinin büyük olmasıdır.

Yol balast yatağına elastik ve sürtünmeli olarak oturubuktan hareket edilebilir değildir. Bu koşul yolun doğru maktadır. Özellikle yatay düzlemlerdeki burkulma eğilimlerinde balast direncinin yenilmesi gerekir. (Şekil 1.5) Bu nedenle yoldaki davranış ideal elastik bir çubuğun davranışına izin verilmemektedir. Bu durumda çarpılma güvenliği açısından farklıdır.



Şekil 1.5 Bukülen rayda yanal kayma direnci

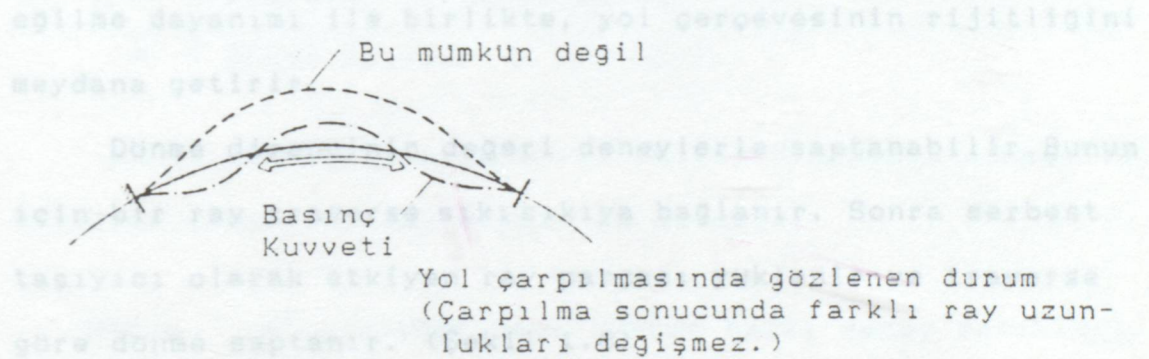
İdeal elastik çubuktan diğer bir farklılıkta, yol yapısının özelliğinden ötürü bir raydan diğerine hiçbir boyuna kuvvetin iletilmesine izin verilmemesidir. Kapalı bir kesitte eğilme durumunda basınç ve çekme bölgeleri oluşur. Ancak bir yolda bu mümkün değildir.

Boşluksuz (kaynaklı) yollar, boyuna kuvvetlerle yatay düzlemlerde eğrilirler. Bu hiçbir zaman rayların farklı gelişmelerinden ötürü meydana gelmez. Bu görüşe göre, yatay

kurbalarda basınç kuvvetleri etkisinde ki yol yalnızca kurba dışına doğru yatay kayma olur düşüncesi de hatalı olur. Zira bu raylardaki farklı genişleme durumuna karşılık gelmektedir. (Şekil 1.6)

İdeal elastik çubuktan diğer bir farklılık ise Euler'e göre çarpılma kuvvetinin hesabında mutlak doğrusal bir çubuktan hareket edilmiş olmasıdır. Bu koşul yolun doğru kesimlerinde bile söz konusu değildir.

Yeni bir yolda bile tolerans sınırları içerisinde yol hatalarına izin verilmektedir. Bu durumda çarpılma güvenli-direncinin yenilmesi mümkün olabilir. Birbirinin ardı sıra hesaplarında bu yol hatasının hesaba katılması gerekir.

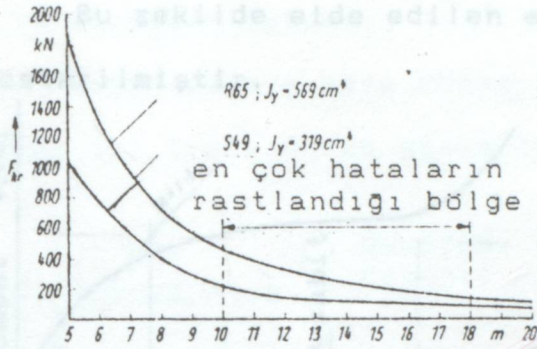


Şekil 1.6 Kurbtaki ray bukulmesi

### 3- YOLUN DİRENİMLERİ:

#### 3.1- RAYIN EĞİLME DİRENCİ

1.1 Eşitliğine göre, tek bir ray basınç çubuğu olarak alındığından, bu çubuğun eğilme direnci  $EI_y$  veya  $EI_x$  olur.

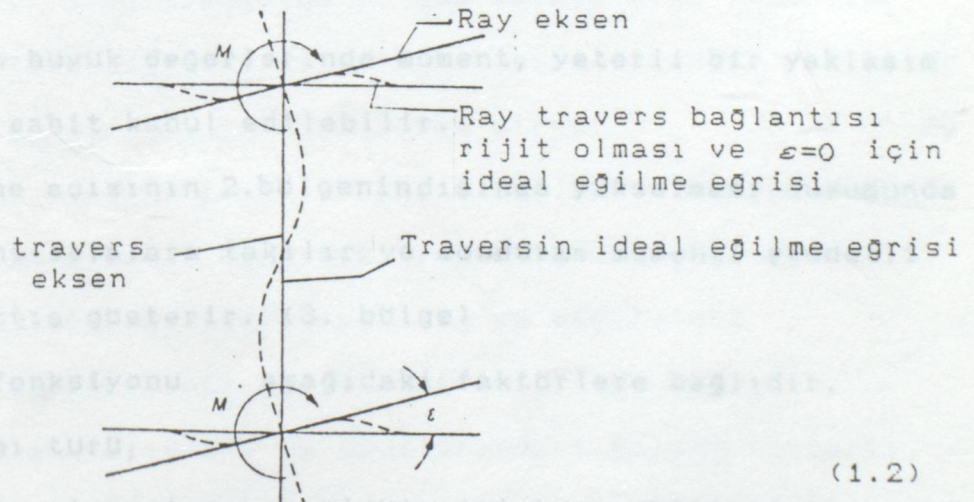


Şekil 1.7 Çarpılma kuvveti (Raydaki direnç dikkate alınmamıştır.)

### 3.2- TRAVERS-RAYIN DÖNMEYE KARŞI DİRENCİ

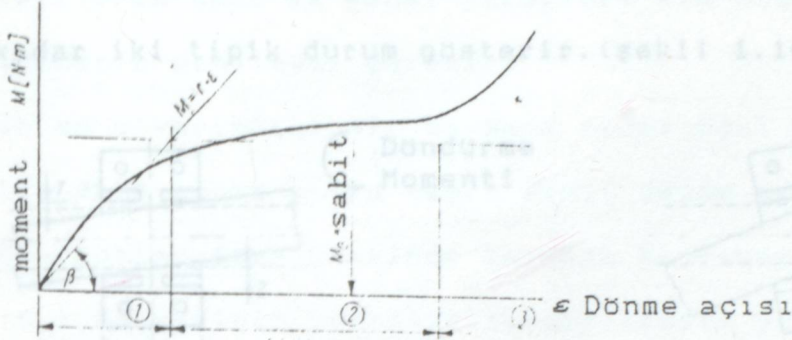
Şekil 1.3 de görüldüğü gibi, yoldaki yanal bir kayma travers ve ray eksenleri arasında bir dönme meydana getirecektir. Bu olay bağlantı elemanlarının sağlayacağı dönme direncinin yenilmesiyle mümkün olabilir. Birbirinin ardı sıra bulunan bağlantı elemanlarının dönme mukavemetleri, rayın eğilme dayanımı ile birlikte, yol çerçevesinin rijitliğini meydana getirir.

Dönme direncinin değeri deneylerle saptanabilir. Bunun için bir ray traverse sıkı sıkıya bağlanır. Sonra serbest taşıyıcı olarak etkiyen ray parçası yüklenir ve traverse göre dönme saptanır. (Şekil 1.8)



Şekil 1.8 Ray ile travers arasındaki dönme

Bu şekilde elde edilen eğri değerleri Şekil 1.9 da gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Döndürme Momenti

M = Döndürme momenti

$M_0$  = Sabit kabul edilen bölgedeki döndürme momenti

r = Değişken bölgenin eğimi

$\beta$  = Değişken bölgenin açısı

$\epsilon$  = Dönme açısı

Küçük dönme açıları (1. bölge) M momenti dönme ile birlikte lineer olarak artar. Bu durumda,

$$M=r.\epsilon \quad \beta \text{ ve } r : \text{Üst yapı türüne bağlı deney sabitleri}$$

$\epsilon$ 'nin büyük değerlerinde moment, yeterli bir yaklaşımla  $M=M_0$  sabit kabul edilebilir.

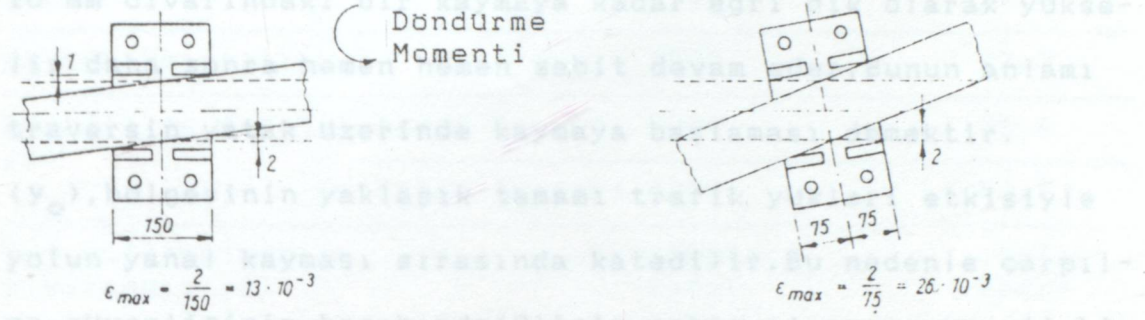
Dönme açısının 2.bölgenin dışında yükselmesi durumunda ray tabanı selalara takılır ve döndürme momenti şiddetli olarak artış gösterir. (3. bölge)

$M=f(\epsilon)$  fonksiyonu aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Üst yapı türü,
- Üst yapı elemanlarının ölçülerini koruyabilirliği,
- Bağlantı sıklığını saptayan elemanın etkinliği,

- Yolun bakım durumu.

Rayın selaya göre dönme olanağı, 3. bölgeye geçinceye kadar iki tipik durum gösterir. (Şekil 1.10)



Şekil 1.10 Rayın sela üzerinde dönme açısı

1. Durum

2. Durum

Ray sela çıkıntıları arasında ortalama bir konumda.

Ray tabanı kenarları sela çıkıntılarında dayanmış durumda.

3. bölgenin dışındaki dönmeler ise tüm üstyapı konstruksiyonunda hasara yol açar.

### 3.3- YOLUN YANAL KAYMA DİRENCİ

Yolun çarpılması konusunda en çok önemli olan faktördür.

Toplam direnç içindeki yeri: Yanal kayma direnci % 55-70

Dönme direnci % 15-30

Rayın eğilme rijitliği % 12-15

Yanal kayma direnci aşağıdaki faktörlerden etkilenir:

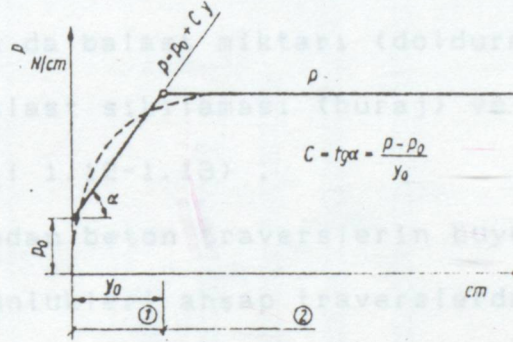
- travers türü, ağırlığı, boyutları ve mesafeleri,
- balast malzemesinin granülometrisi,
- travers aralarındaki ve omuzlarındaki balast miktarı,
- balastın sıklığı.

Şekil 1.11'de yanal kayma direncinin, (Y) kayma miktarı ile

değişimi görülmektedir. İlk kaymanın kaydedilmesi için tra-verslerin omuz ve yanal yüzeyleri ile tabanlarındaki sür-tünmenin yenilmesi gerekir.

10 mm civarındaki bir kaymaya kadar eğri dik olarak yükse-lir daha sonra hemen hemen sabit devam eder. Bunun anlamı traversin yatak üzerinde kaymaya başlaması demektir.

( $y_0$ ), bölgesinin yaklaşık tamamı trafik yükleri etkisiyle yolun yanal kayması sırasında katedilir. Bu nedenle çarpıl-ma güvenliğinin hesabında ( $P$ )'nin sabit alınması önerilebi-lir. Bir yoldaki mümkün yapı durumları (koşulları) için tablo 1.1. deki Y.K.D. değerleri geçerlidir.



Şekil 1.11 Yanal kayma direnci

C = Değişken Y.K.D. bölgesinin eğimi.

P = Yanal kayma direnci.

$P_0$  = Başlangıçtaki Y.K.D.

Y = Kayma.

$Y_0$  = Değişken Y.K.D. bölgesi.

$\alpha$  = Değişken bölgenin açısı

Tablo 1.1. Yanal kayma direnci (çeşitli inşa durumlarında)

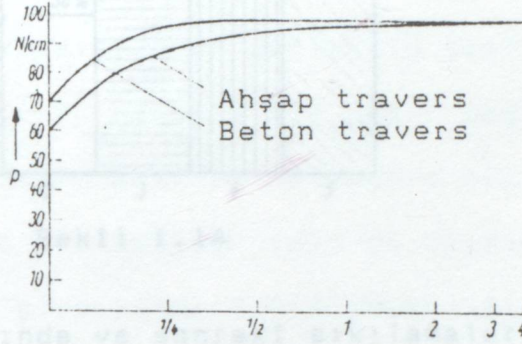
Yol durumu	Y.K.D.	
	Travers başına(N)	Yol uzunluğu başına(N/cm)
balast dökülmemiş serbest oturan yol	750	11,5
gevşek,balastlı yol	1800	27,7
barajlı ve desajlı Ahşap travers yol	2300	35,4
	Beton travers 4500	69,2
iyi doldurulmuş ve sıkılanmış yol	1000'e kadar	155'e kadar

Burkulma güvenliği en ekonomik olarak Y.K.D., dolayısıyla öncelikle yatak (balast) malzemesinin özellikleri ile etkilenebilir. Bu da balast miktarı (doldurma derecesi), özel makinalarla balast sıkılması (buraj) ve trafik yüklerine bağlıdır. (Şekil 1.12-1.13) .

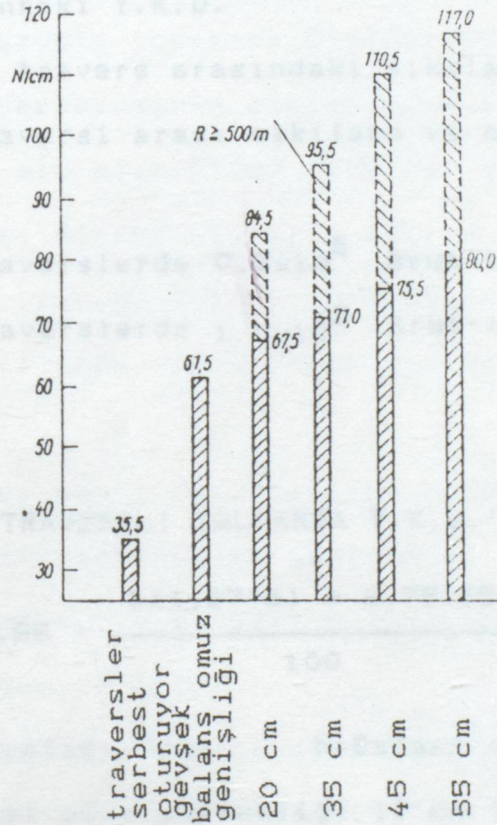
Y.K.D. bakımından beton traverslerin büyük ağırlıkları sayesindeki üstünlükleri ahşap traverslerde balast sürtünmesi ile dengelenmektedir.

Hat üzerinde işleyen ve yan hatlardaki, trenlerin dönen (yuvartlanan) elemanları ile oluşturulan titreşimler ile dinamik etkiler oluşur ve Y.K.D.'i % 10-15 oranında azaltır. Ayrıca, yoldaki bakım çalışmaları sırasında balast yapısında değişiklikler olacağından Y.K.D. de azalma olur. Bu durum ayrıca özellikle kaynaklı yollardaki bakım çalışmalarında sıcaklığa bağlı olarak kısıtlamalar yapılmasının nedenini oluşturur. Beklenmesi gereken diğer değişiklikler Şekil 1.14 da gösterilmiştir.

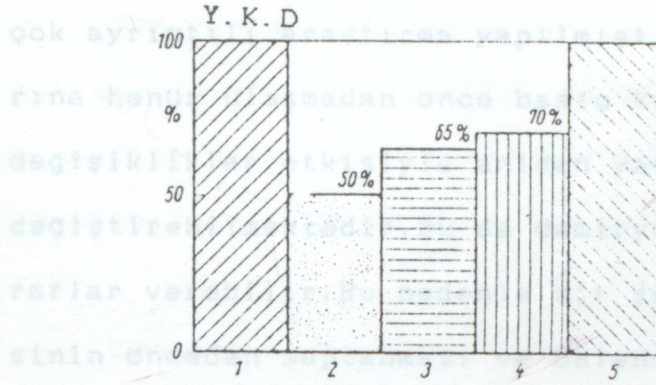
Doğu Almanya'da kaynaklı (boşluksuz) hatlardaki yanıl sta-  
bilitenin hesabında Y.K.D.,  $P=60$  N/cm alınmaktadır.



Şekil 1.12 Rayın kullanıma bağlı olarak  
Y.K.D 'nin hesabı



Şekil 1.13 Beton traversli yollarda max. Y.K.D



Şekil 1.14

Büraj çalışmasında ve sonraki sıkılamaların etkisiyle Y.K.D. azalır. Birçok hesap yönteminde genellikle enerji yöntemi uygulanmaktadır.

1. çalışmadan önceki Y.K.D.
2. büraj sonraki Y.K.D.
3. büraj ve travers arasındaki sıkılamadan sonra Y.K.D.
4. büraj traversi arası sıkılama ve omuz sıkılamasından sonra.
5. beton traverslerde  $0.5 \times 10^6$  Brut-ton ahşap traverslerde  $1.5 \times 10^6$  Brut-ton (Trafik geçtikten sonra).

#### BETON TRAVERSİ YOLLARDA Y.K.D.'İ VEREN FORMUL

$$P=1,57 \left[ 2,68 + \frac{b(1,27+\delta) + 2,75(65-D)}{100} \right] \quad (1.3)$$

D=Travers aralığı (cm)      b=Balast omuz genişliği.

δ=Eğer balast omuz yüksekliği 10 cm ise 1 alınacak, aksi takdirde 0 alınacak.

#### 4- BURKULMA (BUKULME) GÜVENLİĞİ HESABI

Yoldaki yüksek basınç gerilmelerinin konusunda bir-

çok ayrıntılı araştırma yapılmıştır. Zira yol kayma sınırına henüz ulaşmadan önce basıç kuvvetlerindeki düzensiz değişiklikler etkisiyle aniden yatay ve düşey yönde şekil değiştirebilmektedir. Bu da demiryolu trafiğine büyük zararlar verebilir. Bu nedenle bir şekil değiştirme tehlikesinin önceden saptanması ve önlenmesi çok önemlidir. Yeni projelendirilen bir üstyapı için de bölgedeki sıcaklık değişikliklerine göre yeterli bir güvenliğin sağlanması gerekir. Birçok hesap yönteminde genellikle enerji yöntemi uygulanmaktadır.

Burkulmaya karşı direnimlerin ele alınışı şekil için teoriler 2 grupta toplanır. Birinci grup rayın bükülme sertliğini, yol çerçevesinin atalet momentini kullanarak bir bu tutun halinde ele alır. Diğer grup ise yol çerçevesinin burkulmaya karşı direncini, rayın eğilme ve dönme direnci olarak ikiye ayırır. Bu ayırım matematiksel olarak ifade edilir. Tüm teorilerde yanal kayma direnci en önemli elemanıdır.

1. GRUP: Hesap basitleştirilir. Bu nedenle sonuçları kesin değildir. Basitleştirmeler şunlardır:

-Sinüs eğrisi biçimindeki bir yol hatası kabul edilir, buradan hareket edilir.

-Y.K.D. şekil 1.11'deki gibi sabit varsayılır.

Yol çerçevesinin atalet momenti ( $I_c$ ) sabit kabul edilir.

2. GRUP: Hesap yöntemi biraz uzun ve zahmetlidir, ama dirençlerin ayrı ayrı ele alınması sayesinde, daha ayrıntılı bir analiz yapılabilir.

Tüm yöntemlerin amacı, kritik etkenlerin büyüklüklerini, karşılıklı ilişkilerini ve özellikle kritik burkulma kuvvetini hesaplamaktır. Bu kuvvet yoldaki mevcut kuvvetlerle karşılaştırılarak burkulma güvenliği değerlendirilebilir.

Günümüzde hesap yöntemleri yaklaşık yöntemlerdir. Zira birçok parametre bulunmasına rağmen bunların tümünün etkilerinin değerlendirilmesi çok zordur.

#### 4.1- YOL ÇERÇEVESİNİN ATALET MOMENTİ ESASINA GÖRE HESAP (MEIER YÖNTEMİ)

Bu teoride birinci grup hesap yöntemlerine uygun olarak, eğilme rijitliğinin tamamını kullanılması incelenmektedir. Basitleştirmeler burada da vardır. Yol hatalarının sinus eğrisi biçiminde oluştuğu varsayılır.

Kritik burkulma kuvvetini belirli bir (f) yol hatası ve belirli bir (L) hatalı yol uzunluğu için hesaplamakta genellikle enerji yöntemi kullanılır. Labil denge durumu bir kuvvet karşılaştırması ile bulunur.

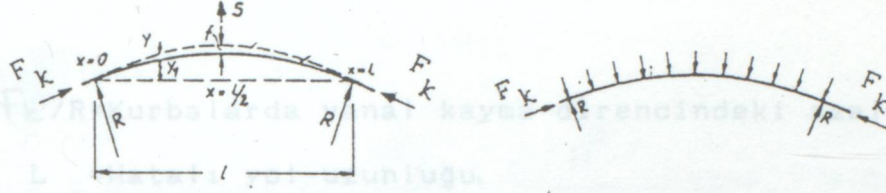
$E^*$  =Burkulmaya neden olan enerji kısmı.

$$E^* = A_p - A_b - A_v$$

$A_p$  =Boyuna kuvvet nedeniyle iş.

$A_b$  =Eğilme nedeniyle iş.

$A_v$  =Y.K.D. 'nin yenilmesindeki iş



Toplam Yapılan İş:

$$\text{Eğrilik için denklem } y = \frac{f}{2} \left( 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l} \right)$$

$$\text{Aktif moment için, } M_{(x)} = F_k \cdot y$$

Yolun yatay doğrultuda burkulmasında yapılan işler aşağıdaki eşitliklere tanımlanabilir. Bu eşitsizliklerde

$K = 4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I / l^2$  değeri Euler'e göre eğme kuvvetini tanımlar.

Eğilme işi

$$A_b = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{E \cdot I} dx = \frac{4 \pi^2 \cdot E \cdot I \cdot f^2}{l^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot f^2}{4 \cdot l} = \frac{K \cdot \pi^2 \cdot f^2}{4 \cdot l}$$

Kayma işi

$$A_v = \int_0^l \rho \cdot y dx = \frac{P \cdot f \cdot l}{2}$$

Basınç işi

$$A_p = - \left[ F_k \lambda + \frac{F_k}{R} \cdot \frac{f \cdot l}{2} \right] = - F_k \left[ \frac{\pi^2 \cdot f^2}{4 \cdot l} + \frac{f \cdot l}{2 \cdot R} \right]$$

P = Balastlı yollarda direnim (Y.K.D.)

$$\lambda = \frac{\pi^2 \cdot f^2}{4 \cdot l} = \text{Eğilme eğrisinin kurba yayına göre uzaması (cm).}$$

$I_\phi$  = Çerçevenin yanal yöndeki atalet momenti.

$F_k/R$ =Kurbalarda yanıl kayma direncindeki azalma.

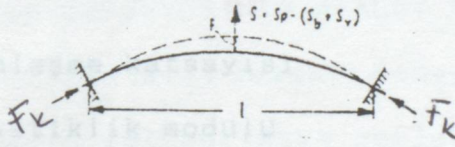
L =Hatalı yol uzunluğu.

Toplam Yapılan iş:

$$A = \sum A_i = A_b + A_v + A_p$$

$$A = \frac{f \cdot l}{2} \left( p - \frac{F_k}{R} \right) + \frac{f^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot l} (K - F_k^2)$$

S yanıl kuvveti öyle belirlenmelidir ki, yol normal durumdan verilen bir f fles (sehim) değışimini kadarlık sapma durumunda dengede bulunsun. Gerçek kuvvetler, burkulma şeklinin  $x=L/2$  orta noktasında ve yol eksenine dik olarak etkiyen bir kuvvetle tanımlanır. Bu kuvvetlerin f eğilmesi için yapacakları iş gerçek kuvvetlerin aynı amaçla yapacakları işe eşitlenerek bulunur.



Bu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$A_i = \int_0^f S_i \cdot df, \quad S_i = \frac{dA_i}{df}$$

$$S = \sum S_i = \sum \frac{dA_i}{df} = \frac{dA}{df} = \frac{1}{2} \left( p - \frac{F_k}{R} \right) + \frac{\pi^2 \cdot f}{2 \cdot l} (K - F_k^2)$$

Kritik duruma, artık daha fazla bir S yanıl kuvvete gereksinim olmadığı ve f fles değışiminin minumum olduğu durum-

da rastlanır.

$$1.) S = \frac{1}{2} \left( P - \frac{F_k}{R} \right) + \frac{\pi^2 \cdot f}{2 \cdot l} (K - F_k) = 0$$

$$2.) \frac{df}{dl} = \frac{dA}{dl} = 0 \quad \frac{df}{dl} = \frac{dA}{dl} \cdot \frac{df}{dA} = \frac{dA}{dl} \cdot \frac{1}{S}$$

$f = f_0 + 7mm$   
 $f = \text{Toplam hata}$

Bu şekilde burkulma eğrisinin kritik hatalı yol boyu (L) ve kritik sehim hatası boyu ( $f^*$ ), kritik basınç kuvveti  $F_{kr}$  ile kritik sıcaklık artışı  $\Delta T$ 'e bağlı olarak bulunur.

$$l = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot I_\varphi}{F_{kr}}} \quad (\text{mm})$$

$$f^* = \left( P - \frac{F_{kr}}{R} \right) \cdot \frac{16 \cdot E \cdot I_\varphi}{F_{kr}^2} \quad (\text{mm}) \quad F_{kr} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A_p \quad [N]$$

$\alpha = \text{Genleşme katsayısı}$

$E = \text{Elastiklik modülü}$

$A_p = \text{iki rayın kesit alanı mm}^2$

$f^* = \text{Kritik sehim boyu mm}$

$L = \text{Hatalı yol uzunluğu mm}$

$\Delta T = \text{Sıcaklık artışı C}$

En son araştırmalara göre  $f^*$  kritik sehim hatasının, gerçekte mevcut olan  $f_0$  sehim hatasından 5-9 mm daha büyük olduğu saptandığı için bu eşitliklerdeki  $f^*$  yerine  $f = f_0 + 7mm$  konulması önerilmektedir.

Şekil 1.15

Kurba için:  $R \leq 700$  m

$$\Delta T = - \frac{8 \cdot I_c}{\alpha \cdot A_p \cdot R \cdot f} + \sqrt{\left[ \frac{8 \cdot I_c}{\alpha \cdot A_p \cdot R \cdot f} \right]^2 + \frac{16 \cdot I_c \cdot P}{\alpha^2 \cdot A_p^2 \cdot E \cdot f}} \quad [K]$$

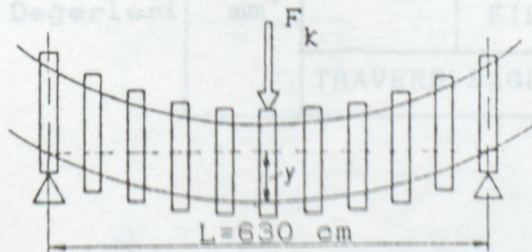
$$f = f_0 + 7 \text{ mm}$$

f = Toplam hata

Raydaki sıcaklık farkı (ilk döşendiği gerilmemiş andaki sıcaklığa göre)  $\Delta T_0 < \Delta T$  oldukça hiçbir yol bozulması oluşmaz. Yeterli bir güvenlikle yüksek hızlarda  $\Delta T - \Delta T_0 = 40-50$  C. Düşük hızlarda ise (örneğin küçük yarıçaplı kurbalarda) bu güvenlik aralığı azaltılabilir. Teori ve deneylerle göstermiştir ki yol stabilitesi yanıl kayma direncine büyük ölçüde bağımlıdır. Bu da  $I_c$  atalet momenti gibi, hesapta önceden belirlenmelidir.

#### 4.1.1. YOL ÇERÇEVESİNİN ATALET MOMENTİ

Yol çerçevesinin atalet momenti deneysel olarak elde edilebilir. Bunun için yol eğilmeye zorlanan iki mesnetli bir kiriş olarak el alınır.



$I_c$  = Yol çerçevesinin atalet momenti

L = Çerçeve uzunluğu

Y = Eğilme

$F_k$  = Yanal kuvvet

Şekil 1.15 Yol çerçevesinin atalet momentinin tayini

A.1.2. MEIER YÖNTEMİ İÇİN ÖZET FORMÜLLER  
Bu deneyden elde edilecek  $I_{\phi}$  değeri Ustyağı şekline ve özellikle rayların traverslere bağlantı şekline bağlı olarak değişir. Gevşek bir bağlantıda  $I_{\phi} = 2I_y$  olur.

$$I_{\phi} = \frac{F_k \cdot l^3}{48 E y} \quad (1.4)$$

$F_k$	l	E	y	$I_{\phi}$
N	cm	N/cm <sup>2</sup>	cm	cm <sup>4</sup>

Bu eşitlikte  $F_k$ , Y ve 2E arasındaki bağıntıların bulunması durumunda kullanılabilir.

$I_{\phi}$  değişimleri tablolarda gösterilmektedir:

Kaynak (2)'ye göre:

$I_{\phi}$	S49 K TİPİ(AHŞAP TRAVERS) NORMAL BAĞLANTI	1350
	S49 K TİPİ(AHŞAP TRAVERS) GEVŞEK BAĞLANTI	638
Değerleri	R65 K TİPİ(AHŞAP TRAVERS) NORMAL BAĞLANTI	1850
	R65 K TİPİ(AHŞAP TRAVERS) GEVŞEK BAĞLANTI	1138

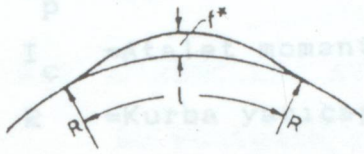
Kaynak (1)'e göre:

$I_{\phi}$ Değerleri	$I_{\phi}$ mm <sup>4</sup>	RAY		S 49	UIC 60
		GERİLME	GEVŞEK	638.10 <sup>4</sup>	1026.10 <sup>4</sup>
	SIKI		1100.10 <sup>4</sup>	1400.10 <sup>4</sup>	
			TRAVERS-BAĞLATI	AHŞAP TRAVERS-K	Beton 70 W

### 4.1.2. MEIER YÖNTEMİ İÇİN ÖZET FORMULLER

Bukulmuş ray ----- Tek taraflı basit Sinus burkulma eğrisi

$$R \leq 700 \text{ m}$$



$$f^* = \left( P - \frac{F_{kr}}{R} \right) \cdot \frac{16 \cdot E \cdot I_c}{F_{kr}^2} \quad (\text{mm})$$

Kurbalar için

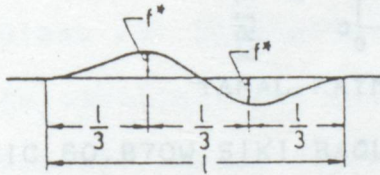
$$l = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot I_c}{F_{kr}}} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot I_c}{\alpha \cdot \Delta T \cdot A_p}} \quad (\text{mm})$$

Kritik sıcaklık artışı

$$\Delta T = - \frac{8 \cdot I_c}{\alpha \cdot A_p \cdot R \cdot f} + \sqrt{\left[ \frac{8 \cdot I_c}{\alpha \cdot A_p \cdot R \cdot f} \right]^2 + \frac{16 \cdot I_c \cdot P}{\alpha \cdot A_p^2 \cdot E \cdot f}}$$

Doğru yol çift taraflı sinüs burkulma eğrisi

$$R > 700 \text{ m}$$



$$f^* = 8,7 \cdot P \cdot \frac{E \cdot I_c}{F_{kr}^2} \quad (\text{mm})$$

Kurbalar ve doğru yol için

$$l = 3\pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot I_c}{F_{kr}}} = 3\pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot I_c}{\alpha \cdot \Delta T \cdot A_p}} = 0,17 \sqrt[4]{\frac{I_c \cdot f}{P}} \cdot 10^3 \quad (\text{mm})$$

Kritik sıcaklık artışı

$$\Delta T = \sqrt{\frac{8,7 \cdot I_c \cdot P}{\alpha^2 \cdot A_p^2 \cdot E \cdot f}} = 536,4 \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot P}{A_p^2 \cdot f}} \quad [\text{K}]$$

$F_{kr} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A_p$  =Kritik ray basınç kuvveti N

E =Ray çeliğinin elastisite modülü

$\alpha$  =Genleşme katsayısı dinamik değer.

$A_p$  =Her iki rayın alanı statik değer.

$I_{\phi}$  =Atalet momenti

R =Kırba yarıçapı mm

P =Y.K.D N/mm

f =Kabul edilen riktif ray uzunluğu hatası mm

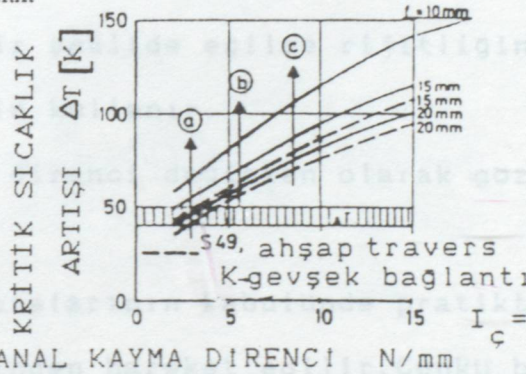
=Gerçek ray uzunluk hatası

#### 4.1.3.KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI VE STABİLİTE

-S49,UIC 60 AHŞAP TRAVERS

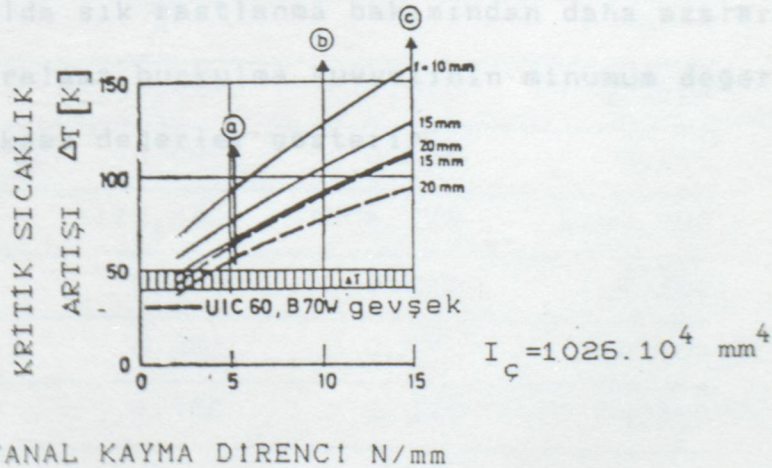
K-YARI SIKI BAĞLANTI

$$I_{\phi} = 1100 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$



UIC 60,B70W,SIKI BAĞLANTI

$$I_{\phi} = 1400 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$



a-Yol çalışmasından sonra dinamik değer.

b-Yol çalışmasından önce dinamik değer.

c-Yol çalışmasından önce statik değer.

#### 4.2- DİRENÇLERİ AYIRARAK HESAP YÖNTEMİ (NEMESDY YÖNTEMİ)

Bu yöntemin kabulleri şöyle özetlenebilir:

-Meier yönteminden farklı olarak, eğilme rijitliği iki ayrı bölümde incelenmiştir.

1. bölüm, 2 rayın eğilme rijitliği  $2EI = EI_s$  dir.

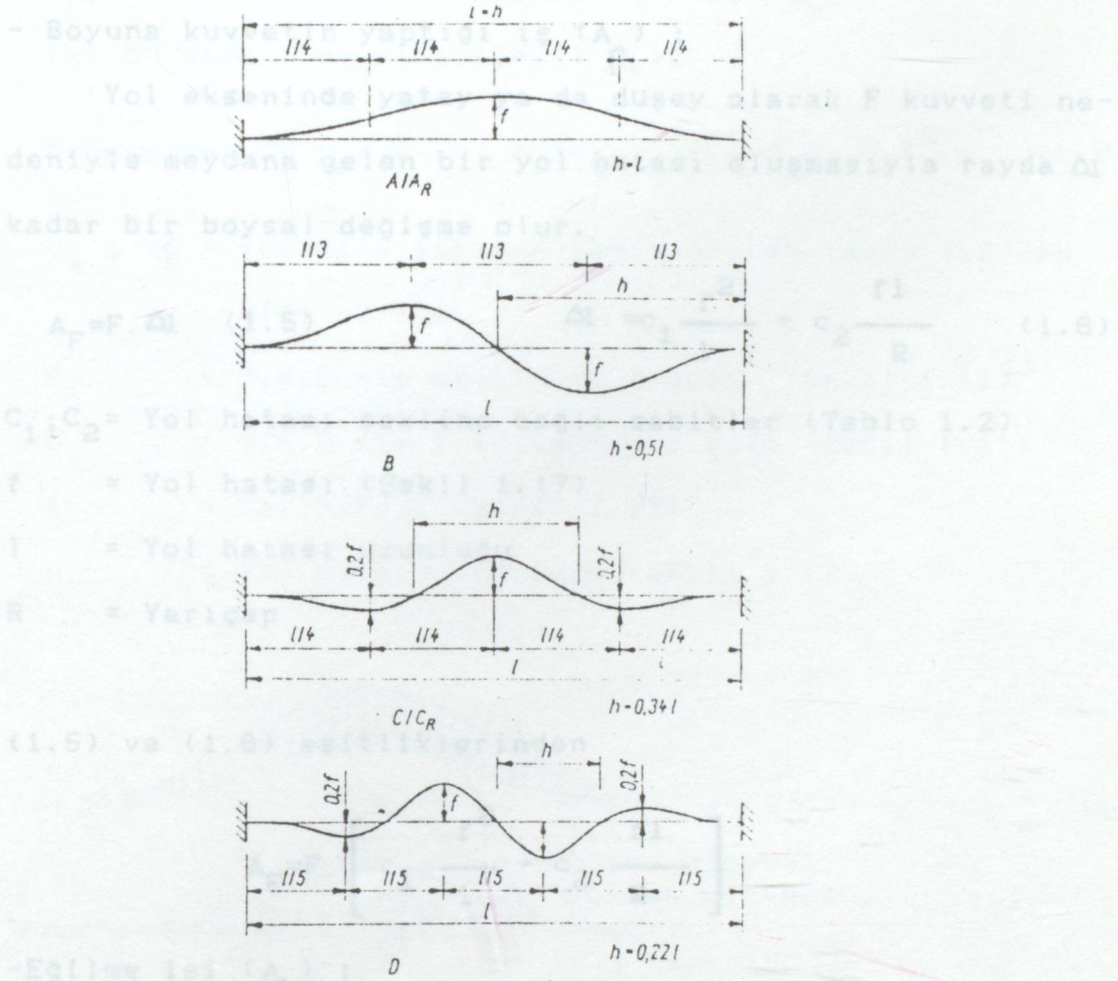
2. bölüm, dönme direncidir. Ray sertliği EI, her ray türü için dönme direnci küçük dönmelerde lineer olarak artar ve ancak büyük sehimlerde sabit olur. Buna dayanarak Nemesdy gerçekçi bir şekilde eğilme rijitliğini herhangi bir yol hatası için kullanır.

- Yanal kayma direnci değişken olarak gözönüne alınır. (Şekil 1.11)

- Olası yol hatalarının kabulünde pratikte en çok gözlenen hata şekillerinden hareket edilir. Çünkü bu hata şekillerinde, bir raydan diğer raya kesme kuvvetlerinin aktarıldığı kabul edilmektedir (Şekil 1.6). B, C ve D hata şekilleri sıralaması yolda sık rastlanma bakımından daha azalarak görülür. Bu sıralama burkulma kuvvetinin minimum değeri bakımından yüksek değerler gösterir.

	0,000	0,000	0,000	0,000
C <sub>3</sub>	117,030	1112,400	1604,170	8145,000
C <sub>4</sub>	0,457	0,525	0,247	0,321
C <sub>5</sub>	0,170	0,201	0,071	0,104
C <sub>6</sub>	2,320	4,000	2,300	4,800

Şekil 1.17 Yol hata formları



Tablo 1.2 Yol hata formları A,B,C,D için  $c_1$  den  $c_6$  'ya kadar sabitler

	A	B	C	D
$c_1$	2,660	11,790	7,810	21,597
$c_2$	0,457	0,000	0,104	0,000
$c_3$	117,030	1112,400	1604,170	6146,000
$c_4$	0,457	0,523	0,247	0,321
$c_5$	0,170	0,201	0,071	0,104
$c_6$	2,000	4,000	2,800	4,800

Burkulma olayı sırasındaki enerji dönüşümü:

- Boyuna kuvvetin yaptığı iş ( $A_f$ ) :

Yol ekseninde yatay ya da düşey olarak F kuvveti nedeniyle meydana gelen bir yol hatası oluşmasıyla rayda  $\Delta l$  kadar bir boyasal değişme olur.

$$A_F = F \cdot \Delta l \quad (1.5)$$

$$\Delta l = c_1 \frac{f^2}{l} + c_2 \frac{fl}{R} \quad (1.6)$$

$C_1; C_2$  = Yol hatası şekline bağlı sabitler (Tablo 1.2)

f = Yol hatası (Şekil 1.17)

l = Yol hatası uzunluğu

R = Yarıçap

(1.5) ve (1.6) eşitliklerinden

$$A_F = F \left[ c_1 \frac{f^2}{l} + c_2 \frac{fl}{R} \right]$$

-Eğilme işi ( $A_b$ ) ;

Rayın y eksenine göre eğilmesi ile yatay düzlemde oluşan yol değişimi.

$$A_b = c_3 EI \frac{f^2}{l^3}$$

$c_3$  = Sabit. (Yol hatası şekline bağlı olarak hesaplanır.)

E.I = Rayın eğilme rijitliği ( $I=2I_y$ )

f = Yol hatası (1.17)

L = Hatalı yol uzunluğu (1.17)

1.8 eşitliğine göre; eğilme işi kurb yarıçapından bağımsızdır.

Böylece yeni formül ;

- Yolun kayma direncini yenmek için iş ( $A_p$ ) ;

2. bölgede

iki bölgede incelenir. (Şekil 1.11)

$$1. \text{ bölgede } (\gamma < \gamma_0) \text{ olmak üzere } A_p = c_4 \cdot P_0 \cdot f \cdot l + c_5 \cdot C \cdot f^2 \cdot l \quad (1.9)$$

Y.K.D.'ni yenmeye ait iş kısmına benzer olarak dönme direnci

$c_4$  ;  $c_5$  = Yol hata şekline bağlı olarak tablo 1.2 den

$c_4$  içinde 1. bölgede  $M=f(\gamma)$  ve 2. bölgede  $M_0$  sabit (Şekil

elde edilir.

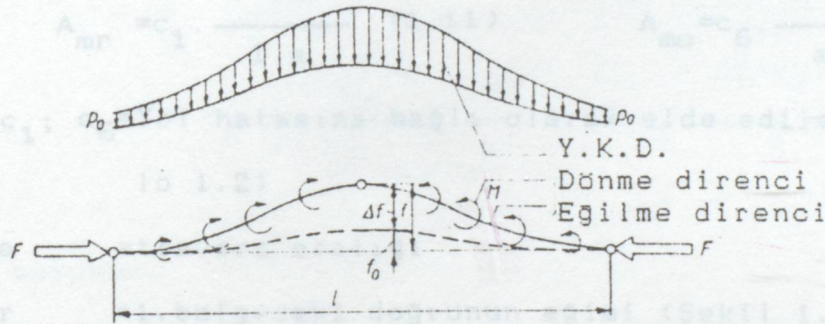
1.9) alınır. 3. bölgede çarabıca çalıştığından bu bölge he-

$P_0$  = Y.K.D nin başlangıç değeri (Şekil 1.11)

$C$  = Y.K.D nin 1. bölümündeki eğim (Şekil 1.11)

$f$  = Yol hatası (Şekil 1.17)

$l$  = Yol hatası uzunluğu (Şekil 1.17)



Şekil 1.18 Yolun bukulmesine karşı koyan bütün

Yolda bulunan dirençlerin etkiye şekli

$f$  = Toplam yol hatası

$f_0$  = Başlangıç yol hatası

$\Delta f$  = Trafik etkisi ile hata artışı

Sonucu önemli ölçüde etkilemeksizin ikinci bölgeden

( $P$ =sabit) hesap yapılabileceğinden (1.9) eşitliğindeki 2.

terim düşer ve 1.terimdeki  $P=0$  yerine sabit  $P$  değeri gelir.

Böylece yeni formül ;

2.bölümde

$$A_p = c_4 \cdot p \cdot f \cdot l \quad (1.10)$$

- Dönme Direncini Yenmek İçin İş ( $A_{mr}, A_{mo}$ ) :

Y.K.D.'ni yenmeye ait iş kısmına benzer olarak dönme direnci içinde 1.bölgede  $M=f(\epsilon)$  ve 2.bölgede  $M_o=sabit$  (Şekil 1.9) alınır.3.bölgede çarpılma başladığından bu bölge hesaba katılmaz.Döndürme momentini yenmeye ait iş kısmı için

1. ve 2. bölgede aşağıdaki hesap geçerlidir.

1.bölgede  
 $M = f(\epsilon)$

2.bölgede  
 $M_o = sabit$

$$A_{mr} = c_1 \cdot \frac{f^2 \cdot 2r}{1 \cdot a} \quad (1.11)$$

$$A_{mo} = c_6 \cdot \frac{2M_o}{a} \cdot f \quad (1.12)$$

$c_1; c_6$ =Yol hatasına bağlı olarak elde edilen sabitler(Tab 1o 1.2)

$a$  =travers aralığı

$r$  =1.bölgedeki doğrunun eğimi (Şekil 1.9)

$M_o$  =idealize sabit dönme momenti (2.bölge) (Şekil 1.9)

Yolda başlangıçta ( $f_o$ ) hatası varsa,zamanla taşıtların oluşturdukları kuvvetlerin etkisiyle bu hata  $\Delta f$  kadar artacaktır.

Doğru kesimindeki toplam enerji :

$$E^* = A_b + A_p + A_{mr} - A_F \quad (1.13)$$

$$E^* = c_3 \cdot E \cdot I \cdot \frac{f^2}{l^3} + c_4 \cdot p_o \cdot f \cdot l + c_1 \cdot \frac{f^2}{l} \cdot \frac{2r}{a} - F \Delta l \quad (1.14)$$

$A_p$  ve  $A_{mr}$  terimleri (1.11) ve (1.8) şekillerindeki 1.böl-

geye aittir(1.14)denkleminde f terimiyle, f toplam yol hatası ile  $f_0$  başlangıç yol hatası arasındaki  $\Delta f$  hata artışı kastedildiğinden bu eşitlikte f yerine  $f-f_0$  konulmalıdır.

Aynı nedenle  $\Delta L$  için :

$$\Delta L = c_1 \cdot \frac{f^2}{1} - c_1 \cdot \frac{f_0^2}{1} \quad (1.15)$$

olur ve bu husus gözönünde bulundurulursa (1.14) eşitliğinden ;

$$E^* = c_3 \cdot E \cdot I \cdot \frac{(f-f_0)^2}{1^3} + c_4 \cdot p_0 \cdot (f-f_0) \cdot l + c_5 \cdot C \cdot (f-f_0)^2 \cdot l + c_1 \cdot \frac{(f-f_0)^2}{1} \cdot \frac{2r}{a} - F \cdot c_1 \cdot \frac{(f-f_0)^2}{1} \quad (1.16)$$

bulunur.

P=sabit ve  $M_0$ =sabit durumu için ise (1.10) ve (1.12) eşitliklerinden

$$E^* = c_3 \cdot E \cdot I \cdot \frac{(f-f_0)^2}{1^3} + c_4 \cdot p \cdot (f-f_0) \cdot l + c_6 \cdot \frac{2M_0}{a} \cdot (f-f_0) - F \cdot c_1 \cdot \frac{(f-f_0)^2}{1} \quad (1.17)$$

elde edilir.

#### 4.2.1. KRITİK BURKULMA KUVVETİ ( $F_{kr}$ )

Yolun labil durumu için, f'de F basınç kuvveti nede-

niyle küçük bir değişim olması durumunda E enerjisi etkinlenmeyeceğinden;

$$F_{kr} = \left[ K_1 \frac{dE^*}{df} = 0 \quad (1.18) \right]$$

yazılabilir.

Bu koşullara bağlı olarak (1.16) ve (1.17) denkleminde aranan  $F_{kr}$  elde edilir.

$M = r \cdot \varepsilon$  ve  $p = p_0 + C \cdot y$  kabul edilerek (1.16) denklemi ile bulunur.

$$F_{kr} = \left[ \frac{c_3 \cdot E \cdot I}{c_1 \cdot l^2} + \frac{c_4}{2 \cdot c_1} \cdot p_0 \cdot \frac{l^2}{(f-f_0)} + \frac{c_5}{c_1} \cdot C \cdot l^2 + \frac{2r}{a} \right] \frac{(f-f_0)}{f}$$

Tablo 1.3 Yol hata formları A,B,C,D için  $K_1$  den  $K_5$ 'e sabitler :

	A	B	C	D
$K_1$	44,100	94,500	205,800	284,000
$K_2$	0,087	0,0222	0,0158	0,0074
$K_3$	0,064	0,0171	0,0091	0,0048
$K_4$	0,752	0,3400	0,3580	0,2220
$K_5$	0,086	0,000	0,0133	0,000

Tablo 1.3 deki sabitlerin gözönünde tutulması ile aşağıdaki yazılış ortaya çıkar :

Doğru yol ve M,P değişken için ;

$$F_{kr} = \left[ K_1 \cdot \frac{E.I}{l^2} + K_2 \cdot p_o \cdot \frac{l^2}{f-f_o} + K_3 \cdot C \cdot l^2 + \frac{2r}{a} \right] \frac{(f-f_o)}{f} \quad (1.19)$$

$M_o$  ve  $P$ 'nin sabit olduğunu kabul ederek 1.17 denklemini ile

Doğru yol M,P sabit için :

$$F_{kr} = \left[ K_1 \cdot \frac{E.I}{l^2} + K_2 \cdot p \cdot \frac{l^2}{f-f_o} + K_4 \cdot \frac{M_o \cdot l}{a \cdot (f-f_o)} \right] \frac{(f-f_o)}{f} \quad (1.20)$$

Kurba rayı ile düz ray için eşitlik 1.14 deki aynı ifade

geçerlidir.  $A_p$  değeri için ise 1.7 deki eşitliğin tümü alınır.

Bu durumda da kritik burkulma kuvveti  $dE^*/df=0$  koşulundan elde edilir :

$M = r \cdot \varepsilon$  ve  $P = P_o + C \cdot y$  için  $F_{kr}$  :

Kurbalı kesim ve M,P değişken için

$$F_{kr} = \frac{K_1 \cdot \frac{E \cdot I}{l^2} + K_2 \cdot p_o \cdot \frac{l^2}{f-f_o} + K_3 \cdot C \cdot l^2 + \frac{2r}{a}}{1 + K_5 \cdot \frac{l^2}{f \cdot R}} \cdot \frac{f-f_o}{f} \quad (1.21)$$

Kurbalı kesim ve M,P sabit için

$$F_{kr} = \frac{K_1 \cdot \frac{E \cdot I}{l^2} + K_2 \cdot p \cdot \frac{l^2}{f-f_o} + K_4 \cdot \frac{M_o \cdot l}{a \cdot (f-f_o)}}{1 + K_5 \cdot \frac{l^2}{f \cdot R}} \cdot \frac{f-f_o}{f} \quad (1.22)$$

$F_{kr}$  değerleri, sabit bir  $f$  yol hatası ve değişken  $L$  yol hatası uzunlukları için araştırıldığında bir eğri elde edilir. Bu eğrinin minumum noktasındaki  $F_{kr}$  değeri yol güvenliği için çok önemli bir değerdir. Bu ilişki aşağıdaki koşuldan bulunur.

$$dF_{kr}/dL = 0 \quad (1/23)$$

Burada 1.bölge (şekil 1.9 değişken dönme momenti  $M = r \cdot \epsilon$ ) den hareket edilir.

Denklem (1.19) ve (1.23)den doğru yol kesimi için kritik hatalı yol uzunluğu elde edilir.

$$l_{kr} = \sqrt[4]{\frac{K_1}{K_2}} + \sqrt[4]{\frac{E.I.(f-f_0)}{p_0 + \frac{K_1}{K_2} \cdot C.(f-f_0)}} \quad (1.24)$$

Bu terim (1.19) denklemine konulursa aranılan kuvvet  $F_{kr}$  min elde edilir.

Yolu bozulabilecek min kuvvet :

$$F_{kr \min} = \left[ 2\sqrt{K_1 \cdot K_2} \cdot \sqrt{\frac{E.I}{f-f_0} \cdot p_0 + \frac{K_3}{K_2} \cdot C.E.I + \frac{2r}{a}} \right] \frac{f-f_0}{f} \quad (1.25)$$

şekil 1.4 deki sabitlerin birleştirilmesi ile yukarıdaki denklemler basitleştirilir.

4.2.2 PARAMETRELERİN DEĞİŞİMİ:

$$l_{kr} = a_1 \sqrt[4]{\frac{E.I.(f-f_0)}{p_0 + a_2.C.(f-f_0)}} \quad (1.26)$$

$$F_{kr \min} = \left[ a_3 \sqrt{\frac{E.I}{f-f_0} \cdot p_0 + a_2.C.E.I + \frac{2r}{a}} \right] \frac{f-f_0}{f} \quad (1.27)$$

Tablo 1.4 A,B,C,D yol hata formları için  $a_1$  den  $a_6$ 'a sabitler:

	A	B	C	D
$a_1$	4,76	8,07	10,67	14,00
$a_2$	0,74	0,77	1,234	1,06
$a_3$	3,90	2,90	3,60	2,90
$a_4$	4,00	0,00	2,74	0,00
$a_5$	1,00	0,00	0,42	0,00
$a_6$	7,56	0,00	2,74	0,00

Kurba için  $F_{kr \min}$  (1.21) denkleminde benzer şekilde elde edilir.

$$F_{kr \min} = a_3 \sqrt{\frac{E.I}{f} \cdot p_0 + a_2.C.E.I + a_4 \left[ \frac{E.I}{f.R} \right]^2 - a_5 \frac{E.I.2r}{f.R.a} - a_6 \frac{E.I}{f.R} + \frac{2r}{a}} \quad (1.28)$$

#### 4.2.2 PARAMETRELERİN DEĞİŞİMİ:

Rayın eğilme rijitliğinin değeri belirlidir. Zor olan dönme direniminin değeridir. (1) ve (2) bölgelerinin sınırları için tablo 1'deki değerler geçerlidir. 1. bölgeden 2. bölgeye geçişler için (Şekil 1.9) tablo 1.5 geçerlidir.

Tablo 1.5 1. ve 2. bölgelerin sınırları.

	Ray S 49	Ray R 65
1. Bölge M = r.ε	$\epsilon \leq 5.10^{-3}$	$\epsilon \leq 2.10^{-3}$
2. Bölge M = sabit	$\epsilon > 5.10^{-3}$	$\epsilon > 2.10^{-3}$

Maksimum dönme açısı  $\epsilon_{max}$  'ın şekil 1.17'deki hata şekilleri için tahmininde aşağıdaki denklem geçerlidir:

A, C, D hata formları için,

$$\epsilon_{max} = 3(f-f_0)/h \quad (1.29)$$

B hata formu için,

$$\epsilon_{max} = 5(f-f_0)/h \quad (1.30)$$

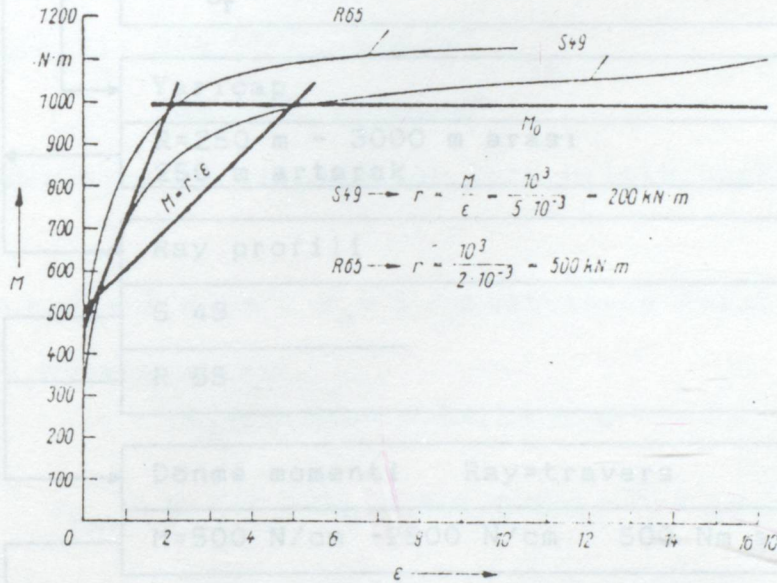
$\epsilon_{max}$ ,  $(f-f_0)$  sehim farkı ve h giriş uzunluğundan elde edilir. (h hata şekline bağlıdır.)

$$h_A = 1.L \quad h_B = 0.34.L \quad h_C = 0.5.L \quad h_D = 0.22.L$$

İkinci bölgeden 3. bölgeye geçiş konstruktif verilere göre karakterize edilir. (Şekil 1.10). 3. bölgede oluşan dönmeler bir burkulmaya neden olacak kadar büyük olduğundan bu bölgede daha fazla araştırma yapmaya gerek yoktur. 1. bölge trafik etkisi ile oluşan yol hatalarını içerdiğinden pratikte yalnızca ikinci bölge kullanılmalıdır. Özel koşul-

lar nedeniyle başka ölçü koşulları yoksa,  $M_0$  ustyapı K'nın kullanımında ve ortalama bakım koşulları için 1000 KNcm olarak alınır. (Şekil 1.19)

Döndürme direncine benzer şekilde yolun kayma direnci (Şekil 1.11) hemen hemen tamamıyla  $\Delta f < y_0 = 1$  cm trafiğe bağlı hata artışlarıyla aşılar. Bu hesapda da  $P = \text{sabit}$  kabulüyle hareket edilmelidir.  $P$  için 60 N/cm alınması uygundur.



Şekil 1.19 Dönme direnci

Değişik etkenlerin etkisi şekil 1.20'deki örneğe benzer şekilde araştırılabilir.

4.2.3. HESAP ÖRNEKLERİ

ÖRNEK 1:

	Yol hata formları
-Yol hata şekli	A
-Hata yol uzunluğu $L=12\text{ m}$	B
-Bağlı yol hata: $f_0=0,4\text{ cm}$	C
-Toplam yol hata: $f=2,2\text{ cm}$	D
-Yanal kayma direnci $P=60\text{ N/cm}$	$A_r$ Kurba rayı için
-Travers direnci $C=60\text{ cm}$	$C_r$
-Ray profili	Yarıçap
	$R=250\text{ m} - 3000\text{ m}$ arası 250 m artarak
	Ray profili
	S 49
	R 65
	Dönme momenti Ray=travers
	$M=500\text{ N/cm} - 2500\text{ N/cm}$ 500 Nm artarak
	Yanal kayma direnci
	$F=25\text{ N/cm} - 75\text{ N/cm}$ 10 N/cm artarak
	Yol hata uzunluğu
	$l=3\text{ m} - 19\text{ m}$ arası 2 m artarak
	Mevcut yol hatası ilk hata
	$f=1\text{ cm} - 3\text{ cm}$ arası $f_0=0,5\text{ cm}$ 0,5 cm artarak
	Kritik çarpılma kuvveti
	$F_{kr}$

Uygulanan haller

Şekil 1.20 Etkenlerin Değişimi

4.2.3.HESAP ÖRNEKLERİ

ÖRNEK 1:

- Yol hata şekli B
- Hatalı yol uzunluğu  $L=12$  m
- Başlangıç hatası  $f_0=0,4$  cm
- Toplam yol hatası  $f=2.2$  cm
- Yanal kayma direnci  $P=60$  N/cm
- Travers aralığı  $a=60$  cm
- Ray profili S49  $I=2I_y=638$  cm<sup>4</sup>  
R65  $I=2I_y=1138$  cm<sup>4</sup>

İSTENEN:Doğru bir yol kesimi için kritik burkulma kuvveti ( $F_{kr}$ )

ÇÖZÜM: $f-f_0 = 1.8$  cm  $> y_0 = 1$  cm kabulüyle  $P=sabit=60$  N/cm olarak hesaba alınır.

$$h_B = 0.5 \times L = 0.5 \times 12 = 6 \text{ m}$$

$$e_{max} = 5(f-f_0)/h_B = 5 \times 1.8 / 6 \times 10^{-2} = 15 \times 10^{-3}$$

max değeri için ray S49 R65 tiplerinde dönme momenti  $M_0=sabit$  (bölge 2) olarak hesaplanır.Anormal şartlar olmadığı kabulüyle  $M_0=1000$  Nm olarak hesaba konulur.(şekil 1.19) Denklem 1.20 yardımı ile hesaplanır.

$$K_1 = 94.5 \quad K_2 = 0.0222 \quad K_4 = 0.34$$

RAY S 49 :

$$F_{kr} = \left[ 94,5 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^7 \cdot 638}{1,2^2 \cdot 10^6} + 0,0222 \cdot 60 \cdot \frac{1,2^2 \cdot 10^6}{1,8} \right. \\ \left. + 0,34 \cdot \frac{10^8 \cdot 1,2}{60 \cdot 1,8} \right] \frac{1,8}{2,2} = 1900326 \text{ N} \rightarrow \text{Dönme Direnci} \\ \begin{array}{l} \downarrow \\ \text{Eğilme} \\ 40\% \\ \text{Yanal Kayma} \\ 48\% \\ 12\% \end{array}$$

RAY R 65 :

$$F_{kr} = \left[ 94,5 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^7 \cdot 1138}{1,2^2 \cdot 10^6} + 0,0222 \cdot 60 \cdot \frac{1,2^2 \cdot 10^6}{1,8} \right. \\ \left. + 0,34 \cdot \frac{10^8 \cdot 1,2}{60 \cdot 1,8} \right] \frac{1,8}{2,2} = 2464105 \text{ N} \rightarrow \text{Dönme Direnci} \\ \begin{array}{l} \downarrow \\ \text{Eğilme} \\ 54\% \\ \text{Yanal Kayma} \\ 37\% \\ 9\% \end{array}$$

ÖRNEK 1:

- Yol hata formu s
- Kaynaklı rayın gerilme sıcaklığı:  $t_v = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- Maksimum ray sıcaklığı:  $t_{\text{max}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

ÖRNEK 2:

- Hatalı yol uzunluğu  $L = 14 \text{ m}$
- Yol hata şekli  $C_R$
- Başlangıç hatası  $f_o = 0.4 \text{ cm}$
- Yarıçap  $R = 800 \text{ m}$
- Hatalı yol uzunluğu  $L = 15 \text{ m}$
- Başlangıç hatası  $f_o = 0.5 \text{ cm}$
- Toplam yol hatası  $f = 2.4 \text{ cm}$
- Yanal kayma direnci  $P = 70 \text{ N/cm}$
- Travers aralığı  $a = 60 \text{ cm}$
- Ray profili S49  $I = 2I_y = 638 \text{ cm}^4$

İSTENİLEN:Kurbadaki yol kesimi için kritik burkulma kuvveti ( $F_{kr}$ )

ÇÖZÜM:

$$f - f_o = 1.9 > y_o = 1 \text{ cm} \quad h_C = 0.34 \times L = 0.34 \times 15 = 5.1 \text{ cm}$$

$$M_o = 1000 \text{ Nm} \quad \epsilon_{\text{max}} = 3 \times (f - f_o) / 5.1 \times 10^2 = 11 \times 10^{-3}$$

$$K_1 = 205.8 \quad K_2 = 0.0158 \quad K_4 = 0.358$$

$$F_{kr} = \frac{\left[ \begin{array}{ccc} 205.8 \frac{2.1 \cdot 10^7 \cdot 638}{1.5^2 \cdot 10^6} + 0.0158 \cdot 70 \frac{1.5^2 \cdot 10^6}{1.9} + 0.358 \frac{1.5 \cdot 10^8}{60 \cdot 1.9} \end{array} \right]}{1 + 0.0133 \frac{1.5^2 \cdot 10^6}{2.4 \cdot 800 \cdot 10^2}}$$

$$\frac{1.9}{2.4} = 2059031 \text{ N}$$

ÖRNEK 3:

-Yol hata formu B

-Kaynaklı rayın gerilme sıcaklığı  $t_v = 18 \text{ C}$

-Maksimum ray sıcaklığı  $t_{\max} = 65 \text{ C}$

-Hatalı yol uzunluğu  $L = 14 \text{ m}$

-Başlangıç hatası  $f_o = 0.4 \text{ cm}$

-Toplam yol hatası  $f = 2.2 \text{ cm}$

-Yanal kayma direnci  $P = 60 \text{ N/m}$

-Ray profili R65  $I_y = 1138 \text{ cm}^4$

-Ray profili  $A_p = 82.9 \text{ cm}^2$

İSTENEN: Maksimum sıcaklık farkı için kritik burkulma kuvveti hesabı ( $F_{kr}$ )

ÇÖZÜM:

$f - f_o = 1.8$   $y_o = 1 \text{ cm}$  olduğundan, Y.K.D. sabit bölgededir.

$$\Delta\sigma = 240 \Delta t$$

$$\Delta t = t_{\max} - t_v = 65 - 18 = 47 \text{ K}$$

$$\Delta\sigma = 240 \cdot 47 = 11280 \text{ N/cm}^2$$

$$F = 2\Delta\sigma \cdot A_p = \frac{2 \cdot 11280 \cdot 82.9}{10^3} = 1870 \text{ kN}$$

$$F_{kr} = \left[ 94.5 \frac{2.1 \cdot 10^7 \cdot 1138}{1.4^2 \cdot 10^6} + 0.0222 \cdot 60 \frac{1.4^2 \cdot 10^6}{1.8} \right.$$

$$\left. + 0.34 \frac{1.4 \cdot 10^8}{60 \cdot 1.8} \right] \frac{1.8}{2.2} = 2490027 \text{ N}$$

Ray çarpılma emniyeti:

$$\eta = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{2165,5}{1870} = 1,16$$

ÖRNEK 4:

-Yol hata formu B

-Başlangıç hatası  $f_0 = 0.4$  cm

-Toplam yol hatası  $f = 2.0$  cm

-Yanal kayma direnci  $P = 60$  N/cm

-Travers aralığı  $a = 60$  cm

-Ray profili S49  $I = 2I_y = 638$  cm<sup>4</sup>

İSTENEN: Doğru yol kesimi için  $F_{kr}$  kuvveti ile yol bozulmasına neden olabilecek kritik hatalı yol uzunluğu,

ÇÖZÜM:

$f - f_0 = 1,6 > y_0 = 1$  Y.K.D. sabit bölgede (Şekil 1.11)

$P = \text{sabit} \Rightarrow C = 0$   $P_0 \Rightarrow P$   $M_0 = 1000$  Nm

$$r = \frac{M}{\epsilon} = \frac{10^5}{5 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^7 \text{ N.cm}$$

Minimum  $F_{kr}$  kuvveti (yolun bozulmasına neden olan)

$$F_{kr \text{ min}} = \left[ 2,90 \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^7 \cdot 638 \cdot 60}{1,6} + \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^7}{60}} \right] \frac{1,6}{2}$$

$$= 2177793 \text{ N}$$

Hatalı yol uzunluğu (yolun bozulmasına neden olan)

$$l_{kr} = 8,07 \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^7 \cdot 638 \cdot 1,6}{60}} = 11,1 \text{ m}$$

#### 4.2.4 DEĞİŞKEN ETKİ PAREMETRELERİNE GÖRE SONUÇLAR

Nemesdy hesap yöntemine göre değişik etki parametrelerinin değişimleri için yapılan sayısal uygulamaların sonuçları Şekil 1.21-1.27 arasında eğrilerle gösterilmektedir. Bu uygulamada ayrıca  $\eta = F_{kr \min} / F_{kr}$  olmak üzere  $\eta$  güvenlik katsayısının değişimi de incelenmiştir.

#### YOL HATASI f'in ETKİSİ

Formül 1.19 ve 1.21'in gösterdiği üzere ray konumunun kötüleşmesi ile yani f büyüdükçe kritik burkulma kuvveti  $F_{kr}$  küçülür. Yay profilleri S49, R65 de yol hatası f'in etkisi aynıdır. Sadece R65'de daha büyük olan EI nedeniyle eğri grubu daha yukarıda oluşur. Her iki profilde f=2 cm kabul edilebilir (Yeterli burkulma emniyeti için). Şekil 1.21 deki 1 ile 6 eğrilerinde alt nokta  $F_{kr \min}$  1.25 denklemine göre hesaplanabilir ve yol hata boyu  $L_{kr}$ 'e bir fonksiyonel bağımlılık gösterir. Raydaki kabul edilebilir doğrultu hatası tesbit edildikten sonra  $V \geq 50$  km/saat hızlarında kesikli çizgi ile gösterilen sınır altındaki eğrilerin kullanılmasında önerilmektedir.

#### YANAL KAYMA DİRENCİ P'NİN ETKİSİ

Yanal kayma direnci P'nin değerlerinin  $25 \text{ N/cm} \leq P \leq 75 \text{ N/cm}$  arasında olması halinde burkulma emniyeti önemi ortaya çıkar (Şekil 1.22). S49 ve R65 rayları için  $P=55 \text{ Ncm}$  den itibaren kabul edilir, burkulma emniyeti vardır.

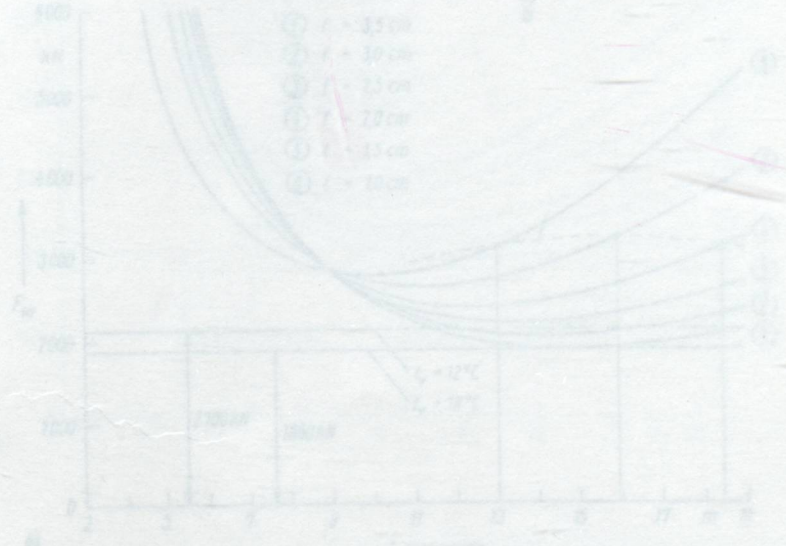
#### DÖNME DİRENCİ ETKİSİ

Ray bağlantısının sıklığının  $F_{kr}$ 'ye etkisi döndürme momenti  $M_o$ 'ın değişimi ile belli olur. Bu etkinin değişimi,

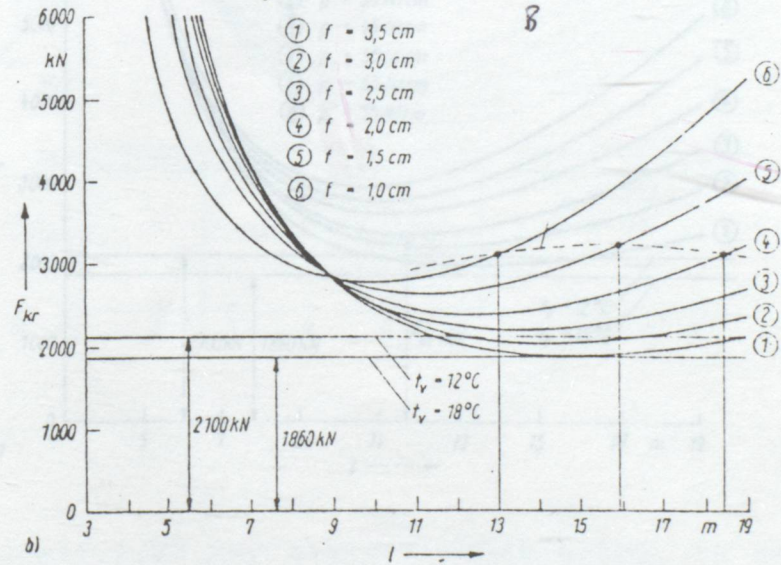
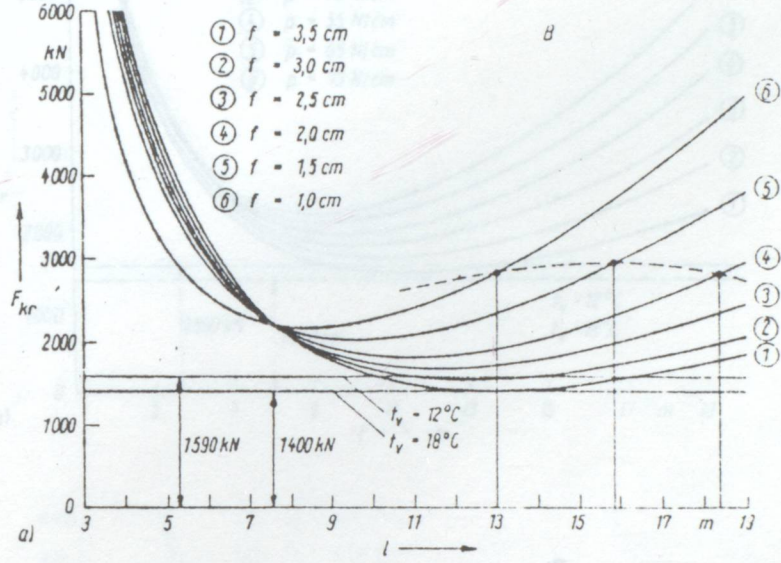
Şekil 1.23'de  $M_o$ 'ın 500-2500 Nm arasındaki değerleri için görülmektedir.

#### YARIÇAP ETKİSİ

Burkulma güvenliği nedeniyle uzun kaynaklı yolun kurbalarda kullanımında kısıtlama sözkonusudur.Çünkü yarıçap küçüldükçe yolun güvenlikle taşıyabileceği  $F_{kr}$  azalır(Şekil 1.24).Bilhassa küçük yarıçaplarda ( $R < 500$ ) eğrileri arasındaki açıklık artar. $R > 1000$  halinde ise bu eğriler sıkılaşır.YOL hatası  $A_r$ 'e karşı gelen eğri grubu daha alttadır ve daha kötü değerler verir.Yol hatası  $A_r$ 'nin teorik karakterinden dolayı bu olayın gerçekleşme olasılığı zayıftır.

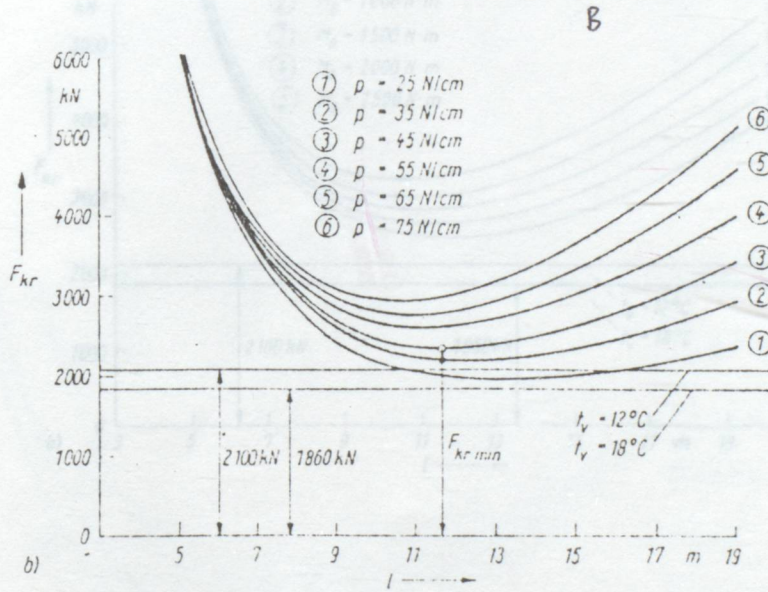
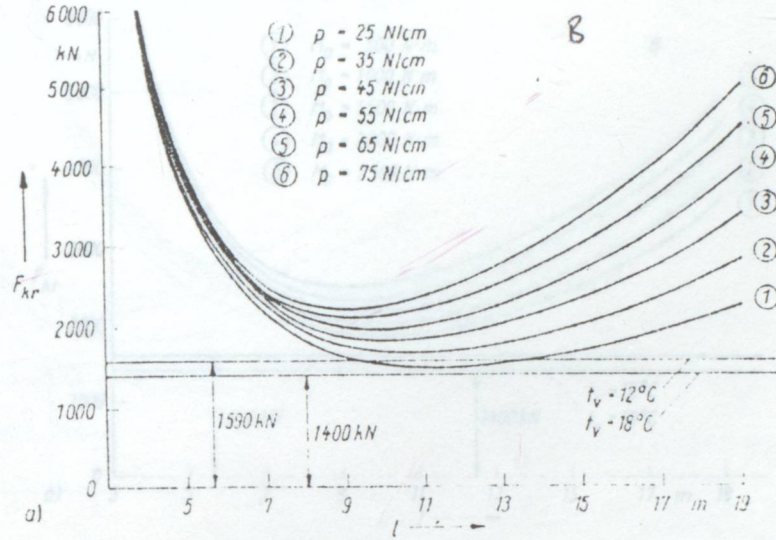


Şekil 1.24 Ray tipleri: a) 849, b) 855, ve değişik yol hata değerleri için kritik burkulma kuvvetleri  $F_{kr}$ .  
 $M_o = 1000 \text{ Nm}$      $p = 55 \text{ N/cm}$      $\alpha = 65 \text{ cm}$



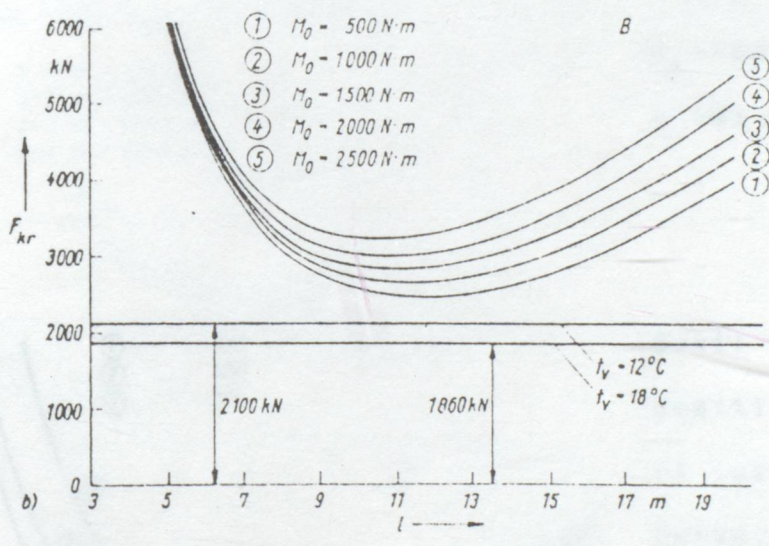
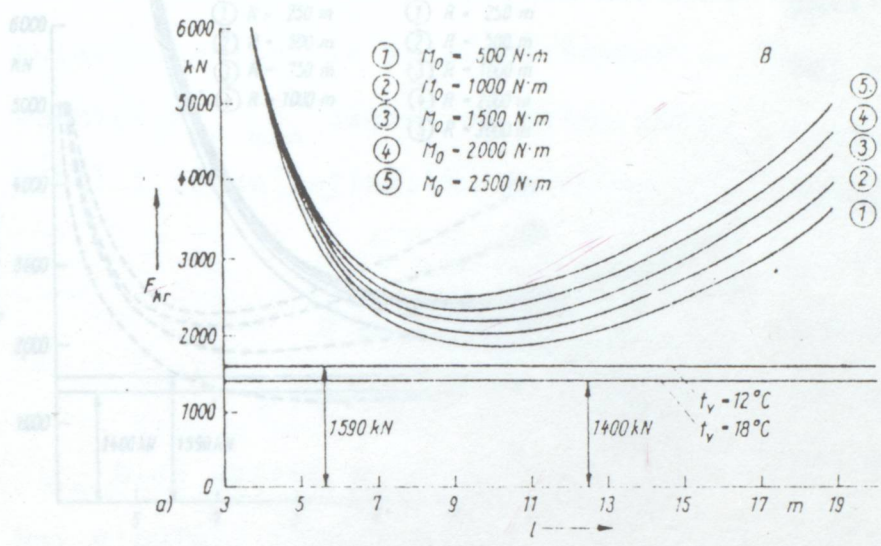
Şekil 1.21 Ray tipleri: a) S49 b) R65, ve değişik yol hata değerleri için kritik burkulma kuvvetleri ( $F_{kr}$ )

$$M_o = 1000 \text{ Nm} \quad p = 55 \text{ N/cm} \quad a = 65 \text{ cm}$$



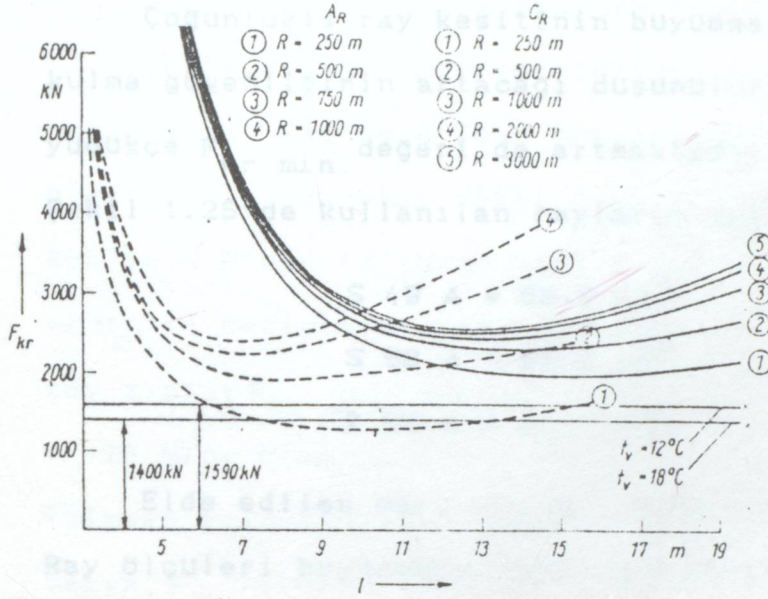
Şekil 1.22 Ray tipleri a) S49 b) R65, ve çeşitli yanal kayma direnci (P) değerler için kritik burkulma kuvvetleri ( $F_{kr}$ )

$$M_0 = 1000 \text{ Nm} \quad f = 1,5 \text{ cm} \quad a = 65 \text{ cm}$$



Şekil 1.23 Ray tipleri a)S49 b)R65, ve çeşitli döndürme momenti ( $M_0$ ) değerleri için kritik burkulma kuvvetleri ( $F_{kr}$ )

$P = 55 \text{ N/cm}$   $f = 1,5 \text{ cm}$   $a = 65 \text{ cm}$



Şekil 1.24

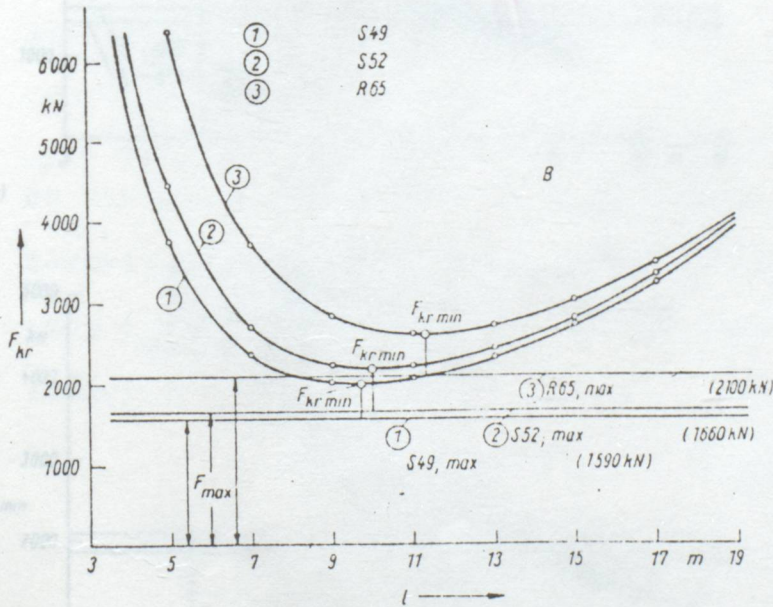
Ray tipi S49, yol  
hata formları  $A_R$ ,  
 $C_R$  ve değişik kur-  
ba yarıçap ( $R$ ) de-  
ğerleri için kri-  
tik burkulma kuv-  
vetleri ( $F_{kr}$ )

$f = 1,5\text{ cm}$

$P = 55\text{ N/cm}$

$M_o = 1000\text{ NM}$

$a = 65\text{ cm}$



Şekil 1.25

Çeşitli ray tipe-  
ri için kritik  
burkulma kuvvet-  
leri ( $F_{kr}$ )

$f = 1,5\text{ cm}$

$P = 55\text{ N/cm}$

$M = 1000\text{ NM}$

$a = 65\text{ cm}$

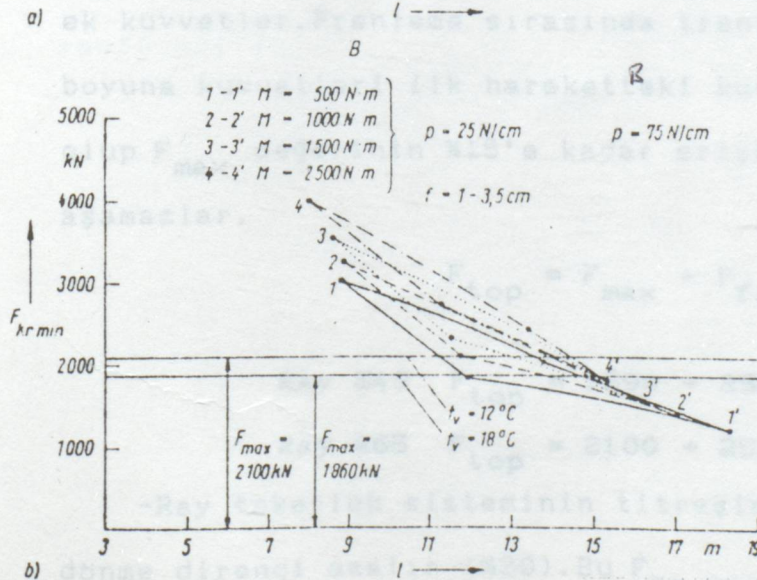
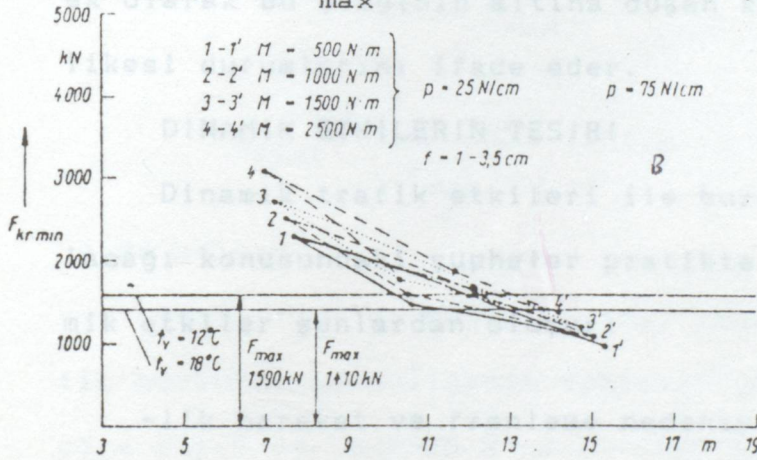
### Yanal Ray Kesitinin Etkisi:

Çoğunlukla ray kesitinin büyümesi ile örnek R65, burkulma güvenliğinin artacağı düşünülür. Ancak ray profili büyüdükçe  $F_{kr \min}$  değeri de artmaktadır.

Şekil 1.25'de kullanılan rayların kesit yüzeyi şöyledir:

S 49 A = 62,5 cm <sup>2</sup>
S 52 A = 65,9 cm <sup>2</sup>
R 65 A = 82,9 cm <sup>2</sup>

Elde edilen eğri biçimi yukarıdaki görüğe ters düşer. Ray ölçüleri büyüdükçe azami basınç kuvveti artar, böylece  $F_{kr \min}$  ile  $F_{max}$  arasındaki fark hiçbir avantaj sağlamaz.



Şekil 1.26 Ray tip-leri a) S49 b) R65 ve çeşitli etki parametreleri değerleri için kritik burkulma kuvvetleri ( $F_{kr}$ )

### BİRKAÇ ETKİ PAREMETRESİNİN BİRLİKTE DEĞİŞİMİ

Çeşitli etki parametrelerinin tesirine daha iyi bir bakış açısı sağlamak için bunların birkaçının birlikte değiştirilmesi gerekir. Şekil 1.26'da ray profilleri S49 ve R65 için  $P$ 'nin ( $25 \leq N/cm \leq 75 N/cm$ ),  $f$ 'nin ( $1cm \leq f \leq 1,5 cm$ ),  $L$  ve  $M_0$ 'ın değişimini gösteren alanlar görülmektedir. Üst yüzey sınırı  $F_{kr \min}$ 'lerin birleştirilmesi ile elde edilir.  $P = 75 N/cm$  olmak üzere değerlerin burkulma emniyeti yükseltilmesi için tüm etki parametrelerinin iyileştirilmesi gerekir.  $F_{max}$  sınır çizgisine yakın olan yol koşulları labil, ek olarak bu çizginin altına düşen koşullar burkulma tehlikesi durumlarını ifade eder.

### DİNAMİK ETKİLERİN TESİRİ

Dinamik trafik etkileri ile burkulma emniyetinin azalacağı konusundaki şüpheler pratikte gerçekleşmiştir. Dinamik etkiler şunlardan oluşur:

-ilk hareket ve frenleme nedeniyle boyuna doğrultudaki ek kuvvetler. Frenleme sırasında trenin önünde oluşan  $F_{fr}$  boyuna kuvvetleri ilk hareketteki kuvvetlerden daha büyük olup  $F_{max}$  değerinin %15'e kadar erişebilir, ama 250 KN'u aşamazlar.

$$F_{top} = F_{max} + F_{fren}$$

$$\text{Ray S49 } F_{top} = 1590 + 250 = 1840 \text{ kN}$$

$$\text{Ray R65 } F_{top} = 2100 + 250 = 2350 \text{ kN}$$

-Ray tekerlek sisteminin titreşimi. Bu titreşimlerle dönme direnci azalır (%30). Bu  $F_{kr \min}$ 'in değerinin %10 ile

temsil edilir. Dönme direnci  $F_{kr}$ 'e %10 oranında etki yaptığından  $F_{kr \min} = 2000 \text{ KN}$  için,  $2000 \times 0.30 \times 0.10 = 60 \text{ KN}$  azalma sağlanır.

-Yolun yukarıya kalkarak eğilmesi. Bu durumda Y.K.D. yaklaşık %10 azalır. Y.K.D.'nin  $F_{kr \min}$ 'a etkisi %60 olarak alındığında,  $F_{kr} = 2000 \text{ KN}$  için 120 'luk bir azalma söz konusudur. Tüm dinamik gözönüne alındığında

$$(F_{kr \min})_{\text{dyn}} = 0.90 (F_{kr \min})$$

stat olur. Bu durumda burkulma güvenliği için:

$$\eta_{\text{dyn}} = \frac{0.9 F_{kr \min}}{1.15 F_{\max}} > 1 \quad (1.31)$$

$$\eta_{\text{stat}} = \frac{F_{kr \min}}{F_{\max}} > 1.3 \quad (1.32)$$

elde edilir.

Şekil 1.27'de değişik yanal kayma dirençleri için statik burkulma güvenliğinin değişimi görülmektedir. Bu şekile göre  $f < 1.5 \text{ cm}$  ve  $P > 60 \text{ N/cm}$  oldukça burkulma güvenliği garanti edilir.

4.3- RAYIN ISIDAN DOLAYI BUKULMESINE AIT GELİŞTİRİLMİŞ

ANALİZ

Arnold D.Kerr tarafından 1975'te doğru yolların bu-

kulme sıcaklığının analizi

gında, kabul edilen analiz

riştir.Çeşitli ar

ce ve sonra

lık giriş olarak gösterilmesinin

mesinde yok kabul edilmiştir.

1976'da Kerr

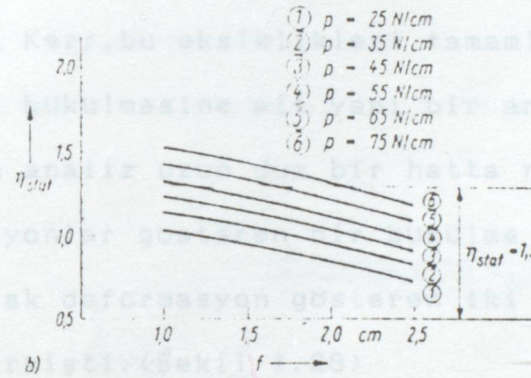
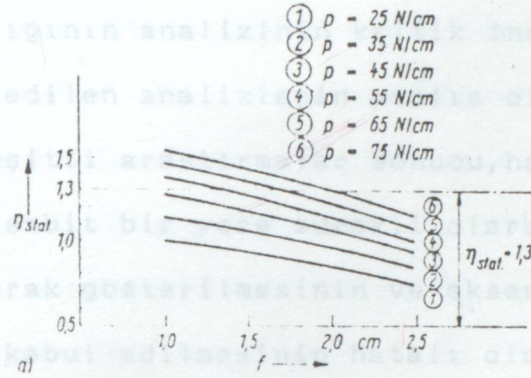
ların termal

Geliştirilen

nal deformasyon

eksenel olarak deformasyon

duğunu göstermiştir.



Şekil 1.27 Ray tipleri a) S49 B0 R65 ve çeşitli yol hatası (f),yanal kayma direnci (P) değerleri için kritik burkulma kuvveti ( $F_{kr}$ )

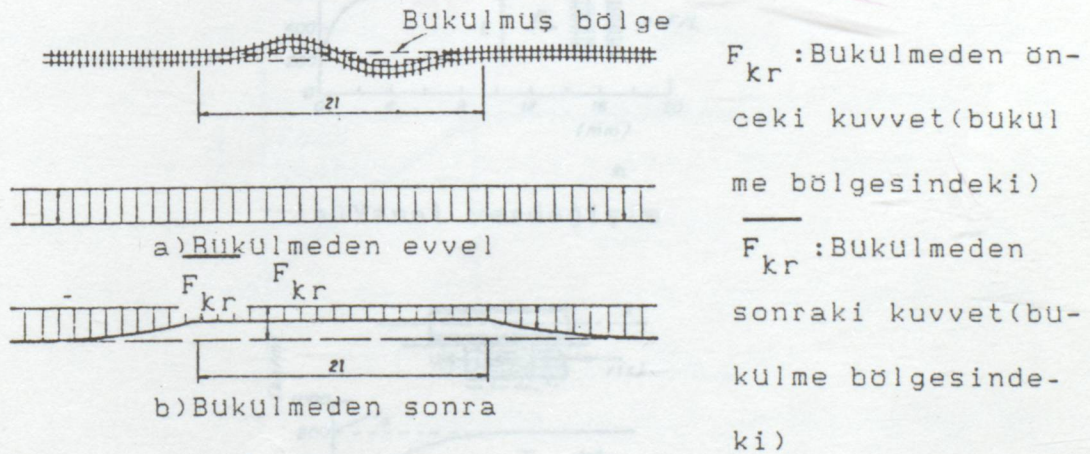
$$M_o = 1000 \text{ NM} \quad a = 65 \text{ cm}$$

Şekil 1.28 Bukulmadan önce ve sonra

eksenel basınç kuvvetlerinin dağılımı

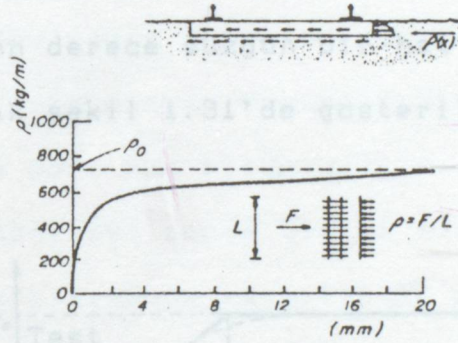
#### 4.3- RAYIN ISIDAN DOLAYI BUKULMESINE AIT GELİŞTİRİLMİŞ

ANALİZ gibi, her iki rayın düzgülü ANALİZ sıcaklık artışı ile etkilendi Arnold D.Kerr tarafından 1975'de doğru yolların bukulme sıcaklığının analizinin kritik incelenmesi yapıldığında, kabul edilen analizlerin yanlış olduğu ortaya çıkarılmıştır. Çeşitli araştırmalar sonucu, hattın bukulmeden önce ve sonra sabit bir yere sürekli olarak bağlı bir elastik kiriş olarak gösterilmesinin ve aksenal kuvvetin bukulmesinde yok kabul edilmesinin hatalı olduğu açıklanmıştır. 1976'da Kerr, bu eksiklikleri tamamlamak için düz hatların termal bukulmesine ait yeni bir analiz geliştirdi. Geliştirilen analiz uzun düz bir hatta nisbeten büyük yanal deformasyonlar gösteren bir bukulme bölgesi ile sadece aksenal olarak deformasyon gösteren iki bitişik alan bulunduğunu göstermişti. (Şekil 1.28)

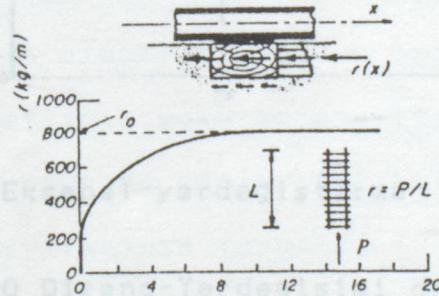


Şekil 1.28 Bukulmeden önce ve sonra aksenal basınç kuvvetlerinin dağılımı

Bu analizde de Meier ve Nemesdy yöntemlerinde olduğu gibi, her iki rayın düzgün bir sıcaklık artışı  $\Delta T$  ile etkilendiği kabul edilmiştir. Balast tarafından ray yapısına etki yapan yanıl direnç, balast ile taban yüzeyi ve traverslerin yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetinden ve ayrıca balastın travers yüzeylerine yaptığı basınçtan doğar. Bu direnç lineer olarak değişmez (Şekil 1.29). Geliştirilen analizden doğan sonuçta yanıl direnç  $P_0$  =sabit (Hat ekseni birimi başına) kabul edilmiştir. Buna bağlı bir incelemeye göre bu kabul sıcaklık artışının ve bükülmeden sonraki stabil kaymanın güvenilir olarak belirlenmesi açısından geçerlidir.



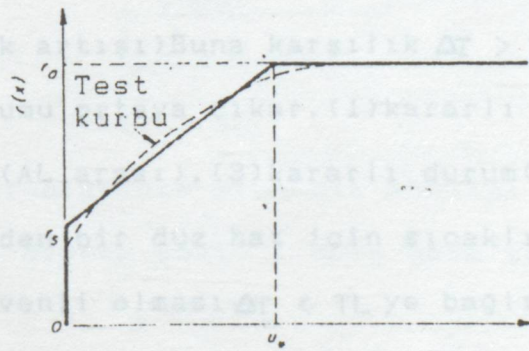
a) Yanıl yerdeğişim



b) Eksenel yerdeğişim

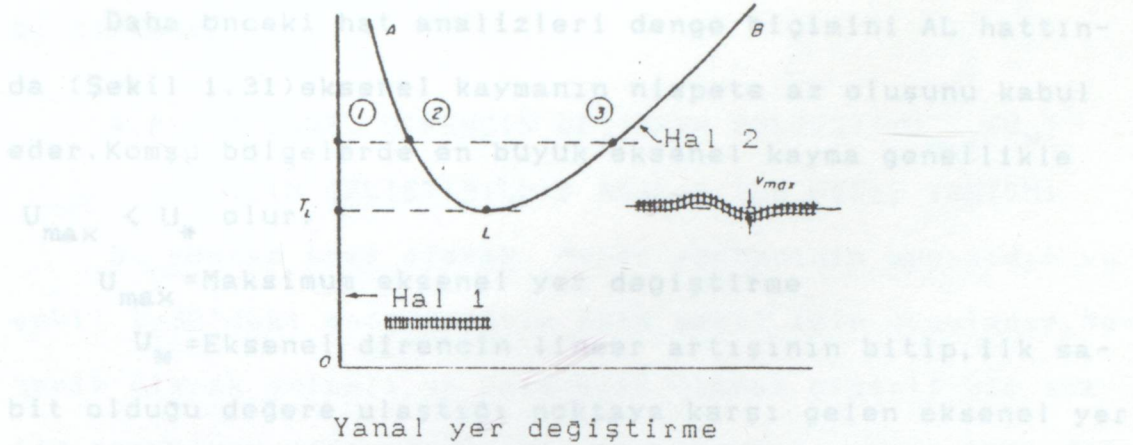
Şekil 1.29 Ray bağlantı yapısı ile balast arasındaki dirençler

Bu konuda bukulmeye bağlı yanal yol kaymalarının 50cm kadar olduğu söylenebilir. Bunun yanında kayma direnci yanal kaymalardan sonra etkisini göstermeye başlar. Yolun boyuna yöndeki kaymasına karşı oluşan aksenal direnç, travers tabanı ve balast arasındaki sürtünme ile travers yan yüzeyleri arsında kalan balast kütlesinin oluşturduğu direncin toplamı kadardır. Bu direnç şekil 1.29. b'de grldğu gibi lineer değildir. Bazı araştırmacılara göre  $r_o$  aksenal direnci sabit olduğu varsayılmakta ise de bu kabul güvenlik sıcaklık artışı TL değerlerini etkileyeceğinden bu analizde iki bölümde ele alınmıştır. şekil 1.30'da grldğu gibi 1. bölüm  $r_s$ 'den  $r_o$  değerlerine kadar lineer olarak artmakta 2. bölüm ise  $U_*$  kaymasından itibaren sabit kalmaktadır. Tipik denge halleri son derece düzgün bir hat için yukarıdaki kabule bağlı olarak şekil 1.31'de gösterilmiştir.



Eksenel yerdeğiştirme

şekil 1.30 Direnç-Yerdeğişimi değerleri



Şekil 1.31 Isınmış düz yollar için tipik denge halleri

Şekil 1.31'deki denge halinin her noktası yolun bir denge durumuna karşı gelir.

HAL 1: Düz bükülmemiş denge durumlarına,

HAL 2: yanal deformasyon durumlarına karşı gelir.

Resim 1.31'e göre hat bir  $\Delta T < T_L$  sıcaklık artışına tabi olduğunda sadece düz denge biçimi ortaya çıkar. ( $T_L$ : güvenli sıcaklık artışı) Buna karşılık  $\Delta T > T_L$  olduğunda 3 çeşit denge durumu ortaya çıkar. (1) kararlı düz durum, (2) kararsız durum (AL arası), (3) kararlı durum (LB arası). Yukarıdaki incelemeden bir düz hat için sıcaklık artışının bükmeye karşı güvenli olması  $\Delta T < T_L$  ye bağlıdır.

Demiryolu hattının bükülme analizi termal iç basınç kuvvetlerine bağlıdır. Bu analiz iki bölümü içerir.

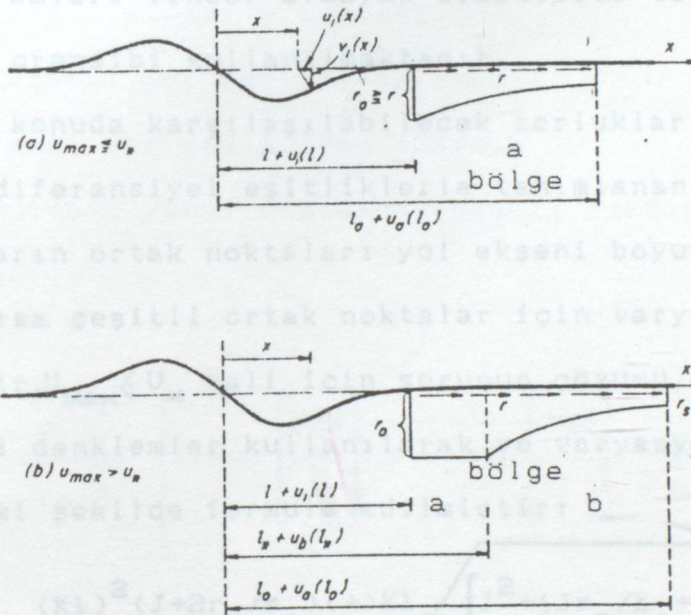
1- Butün denge durumlarının tesbiti,

2- Denge durumlarının hangilerinin kararlı ya da kararsız olduğunun tesbiti.

Daha önceki hat analizleri denge biçimini AL hattında (Şekil 1.31)eksenel kaymanın nispete az oluşunu kabul eder.Komşu bölgelerde en büyük ekstenel kayma genellikle  $U_{max} < U_*$  olur.

$U_{max}$  =Maksimum ekstenel yer değiştirme

$U_*$  =Ekstenel direncin lineer artışının bitip, ilk sabit olduğu değere ulaştığı noktaya karşı gelen ekstenel yer değiştirme.



Şekil 1.32

Denge durumlarının ekonomik analizi için komşu bölgelerde ekstenel direnç şekil 1.30'a göre şöyle ifade edilir:

$$r_u = r_s + K_a \cdot U$$

Şekil (1.32.a).L noktasından B'ye doğru denge durumları için  $U_{max} > U_*$  dir.Bu durum için (Şekil 1.32.b)

$$r_u = r_0 = \text{sabit (} |U| > U_* \text{ bölgesi için).}$$

$$r_u = r_s + K_a \cdot U \quad (|U| < U_* \text{ bölgesi için).}$$

Bu iki durum ALB denge durumunda  $U_{max} = U_*$  noktası ile

birbirinden ayrılır.

#### 4.3.1. EKSENEL DİRENCİN DEĞİŞKEN BÜLGESİ ( $U_{\max} \leq U_*$ )

##### İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ İLE HESAP YÖNTEMİ

Bu yöntem esas olarak Meier yönteminin aynısıdır ve şekil 1.32'deki antisimetrik hata şekil için uygulanır. Me-kanik olarak anlamlı ve matematik olarak geçerli bir ana-liz formülünü elde etmek için ray-travers yapısı için den-ge denklemleri lineer olmayan elastisite teorisi ve virtu-el kayma prensibi kullanılmaktadır.

Bu konuda karşılaşılabilecek zorlukları yenmek için farklı diferansiyel eşitliklerle tanımlanan yol kesimleri ve bunların ortak noktaları yol eksenini boyunca tesbit e-dilmiyorsa çeşitli ortak noktalar için varyasyonlar hesabı uygulanır.  $U_{\max} < U_*$  hali için sorunun çözümü, çeşitli dife-ransiyel denklemler kullanılarak ve varyasyonlar hesabı aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

$$\alpha. \Delta T = \frac{F_{kr}}{E \cdot A_p} + \frac{(Kl)^2 (J + 2r_s/k_a) (+) Kl \sqrt{[J^2 + 4Jr_s/k_a + 4(Kl)^2 (r_s/k_a)^2]}}{2l [(Kl)^2 - 1]} \quad (1.33)$$

$$\lambda = \sqrt{F_{kr}/EI} \quad l = 2\pi/\lambda$$

$$k_a = (r_o - r_s)/U_*$$

$$p^* = \frac{P_o}{EI}$$

$$K = \sqrt{\left[ \frac{k_a}{E \cdot A_p} \right]}$$

$$J = \int_0^l v_1'^2(x) dx = 17430 \times 10^{-5} p^{*2} l^7$$

$$K_a = (r_o - r_s)/U_*$$

E	=Elastisite modulu	Kg/cm <sup>2</sup>
A <sub>p</sub>	=iki rayın kesit alanı	cm <sup>2</sup>
α	=Genleşme katsayısı	1/C
I=2Ir	=Atalet momenti	cm <sup>4</sup>
r <sub>o</sub>	=Eksenel kayma direnci	Kg/m
r <sub>s</sub>	=Başlangıç eksenel kayma direnci değeri	Kg/m
P <sub>o</sub>	=Yanal kayma direnci	Kg/m
ΔT	=Kritik sıcaklık artışı	C
F <sub>kr</sub>	=Kritik sıcaklık kuvveti	Ton
U	=Eksenel yer değiştirme (kayma)	cm
V	=Yanal yer değiştirme (kayma)	cm

Bukulmede yanal deplasman değeri aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$v_1(x) = \frac{\rho^* L^4}{16\pi^4} \left\{ 1 - \cos\left[\frac{2\pi x}{1}\right] + \pi \cdot \sin\left[\frac{2\pi x}{1}\right] - 2\pi^2 \left[ \left[\frac{x}{1}\right]^2 - \frac{x}{1} \right] \right\}$$

Maksimum yanal deplasman için ise bu denklem X'e göre türev alınıp sifıra eşitlenir ve aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$v_{\max} = 8,621 \times \rho^* \times L^4 / 16\pi^4$$

Bu analizin sayısal uygulamasında F<sub>kr</sub> değerleri için aşağıdaki verilere göre hesap yapılarak, sonuçlar şekil 1.33 de katı bir eğri AP\* ve noktalı eğri P\*b olarak gösterilmiştir. P\* noktası denge durumuna karşı gelir. Burada eksenel kayma U<sub>max</sub> = 0.5 cm dir. Bu x/L durumunda oluşur.

$$A_p = 146.16 \text{ cm}^2 \quad I = 2Ir = 900 \text{ cm}^4 \quad E = 2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$$
$$\alpha = 1.15 \times 10^{-5} \text{ I/C} \quad r_s = 300 \text{ Kg/M} \quad r_o = 800 \text{ Kg/M}$$
$$U_* = 0.5 \text{ cm} \quad P_o = 700 \text{ Kg/M}$$

Şekil 1.30'a göre  $U(x) > U_*$  aksenal kayma için direnç sabit kalır. Böyle hallerde komşu bölgeler iki ayrı bölgeyi içerir. (Şekil 1.32)  $U_{\max} > U_*$  denge şeklinin belirlenmesi aşağıda ele alınmıştır.

#### 4.3.2. EKSENEL DİRENCİN SABİT BÜLGESİ ( $U_{\max} > U_*$ ) İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ İLE HESAP YÖNTEMİ

$U_{\max} > U_*$  durumu için sorunun formülü çeşitli diferansiyel denklemlerden yararlanılarak aşağıdaki şekilde çözülmür:

$$\alpha \cdot \Delta T = \frac{F_{kr}}{E \cdot A_p} + \frac{r_o l}{E \cdot A_p} \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{E \cdot A_p}{r_o l^2} \left[ J + \frac{r_s - r_o}{r_o} \cdot U_* \right] \right)^2 - 1 \right] \right\} \quad (1.34)$$

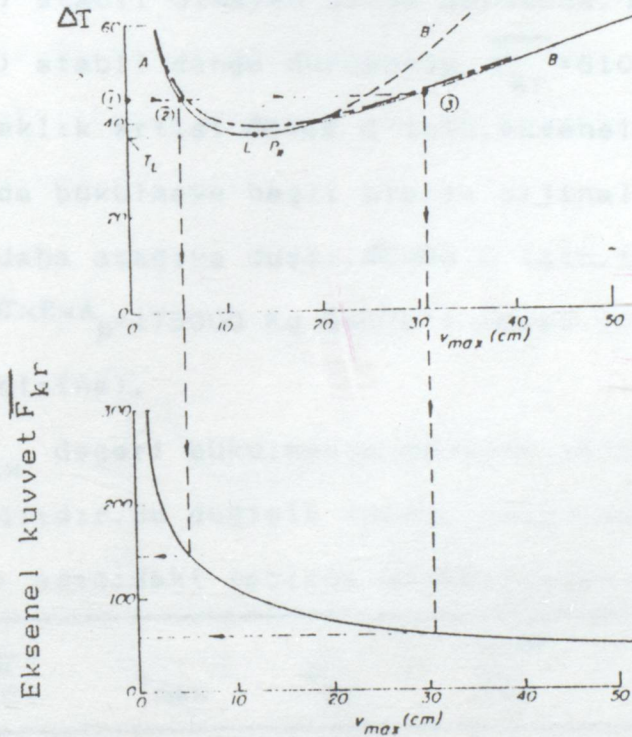
$$\lambda = \sqrt{F_{kr} / EI} \quad L = 2\pi / \lambda \quad P^* = P_o / EI \quad K = \sqrt{K_a / E \cdot I}$$
$$K_a = (r_o - r_s) / U_* \quad J = 17,430 \times 10^{-5} \times P^{*2} \cdot L^7$$

Yanal deplasman değeri aşağıdaki şekilde elde edilir:  
sonras; denge durumu (  $r(x)=r_0$  =sabit ) gsterir.

$$v_1(x) = \frac{\rho^* l^4}{16\pi^4} \left\{ 1 - \cos\left[\frac{2\pi x}{l}\right] + \pi \cdot \sin\left[\frac{2\pi x}{l}\right] - 2\pi^2 \left[ \left[\frac{x}{l}\right]^2 - \frac{x}{l} \right] \right\}$$

Maksimum yanal deplasman için ise bu denklemin X'e gbre turevi alınıp sifira eşitlenir ve aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$V_{\max} = 8,621 \times \rho^* \times l^4 / 16\pi^4$$



şekil 1.33

Bir nceki blumde listelenen yol parametreleri için sayısal değerlendirme sonuçları şekil 1.33'de kesiksiz  $P_B$  eğrisiyle gsterilmiştir. Kesikli eğri ise bukulme

sonrası denge durumu ( $r(x)=r_0=\text{sabit}$ ) gösterir.

$0 < \Delta T < T_L$  için, 1.33'e göre kullanılan yol parametreleri ile emniyetli sıcaklık artışı  $T_L=37.2$  C dir.  $\Delta T < T_L$  sıcaklığında bukulürse LB hattında yanal deformasyon olur. Örnek olarak yol  $\Delta T=45$  C sıcaklık artışında bukulürse (3) halindeki denge konumuna gelir ve en büyük yanal kayma  $V_{\max}=31$  cm olur. 45 C'lık sıcaklık artışı için aksenal basınç kuvvetleri:

(1) düz denge durumunda,  $F_{kr} = \alpha \times \Delta T \times E \times A_p = 158000$  Kg'dır

(2) stabil olmayan denge durumunda,  $F_{kr} = 143000$  Kg'dır.

(3) stabil denge durumunda,  $F_{kr} = 61000$  Kg'dır. Böylece

ray sıcaklık artışı  $\Delta T=45$  C için, aksenal kuvvet  $F_{kr}$ , her iki rayda bukulmeye bağlı olarak orjinal değerinin yarısından daha aşağıya düşer.  $\Delta T=50$  C için, termal kuvvet

$F_{kr} = \alpha \times \Delta T \times E \times A_p = 175000$  Kg 54000'e düşer. (Orjinal değer

dörtte birine).

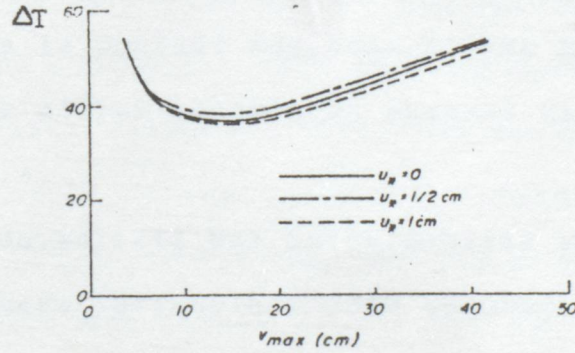
$V_{\max}$  değeri bukulmenin meydana geldiği sıcaklık artışına bağlıdır. Bu değişik durumu göstermek için karşı gelen değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

$\Delta T$ (C)	$v_{\max}$	$F_{kr}$	$F_{kr}$	$F_{kr}/F_{kr}$
$T_L=37.2$	12.9	130	94	72
40	21.7	140	72	51
50	39	175	54	31
60	53	210	46	22
70	67	245	41	17
80	81	280	38	14

$F_{kr}$  =Bukulmeden sonraki kuvvet.(bukulme bölgesinde)

$F_{kr}$  =Bukulmeden sonraki kuvvet.(bukulme bölgesinde)

$F_{kr}$  ve  $V_{max}$  değerleri yol parametrelerine de bağlıdır. Daha önceki sayısal uygulamadaki yol parametreleri kullanılarak  $U_*$ 'ın TL değerine olan etkisi ( $U_* = 0.0$ ,  $0.5$  ve  $1.0$  kabul edilerek) tayin edilmiştir. Sonuçlar 1.34'de gösterilmiştir. Bu sonuçlar ve yapılan deneyler  $U_* = 0.5$ 'in trafik yol hesapları için kabul edilebilir bir değer olduğunu göstermiştir. Gösterilen analizi demiryolu mühendisleri için basitleştirmek üzere sonuçlar nümerik olarak hesaplanmıştır. Bu değerlendirmenin sonuçları şekil 1.35'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre  $U_* = 0.5$  cm ve  $r_s = (3/8)r_o$  olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1.34



## 5-SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışmasında, Demiryolu Ustyapısının Yanal Stabilitesi (uzun kaynaklı yollarda) için, uç yöntem incelenmiştir. Bunlar Meier yöntemi, Nemesdy yöntemi ve Arnold D. Kerr tarafından geliştirilen analiz yöntemidir.

Bu yöntemlerin karşılaştırılması şöyledir:

Meier yönteminde, rayın bukulme (eğilme) rijitliği bir bütün olarak ele alınır, Yanal kayma direnci sabit varsayılır ve sinus eğrisi biçiminde bir yol hatası kabul edilir. Nemesdy yönteminde rayın bukulme rijitliği iki ayrı bölümde incelenir (bunlar iki rayın bukulme rijitliği ve dönme direncidir), Yanal kayma direnci değişken olarak gözönüne alınır ve olası yol hatalarının kabulünde pratikte en çok gözlenen hata şekillerinden hareket edilir. Bu yöntemde dirençlerin ayrı ayrı ele alınması sayesinde daha ayrıntılı bir analiz yapılabilir. Arnold D. Kerr tarafından geliştirilmiş analiz yöntemi ise, esas olarak Meier yönteminin aynısıdır, ek olarak hesaplarda aksenal kayma direnci göz önüne alınır.

Burada, belirli bir yolda, değişik yan al kayma dirençleri ve kurba yarıçapları için bulunan hesap yöntemlerine ait Kritik sıcaklık artışı ( $\Delta T$ ) değerleri, sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Bunun için önce Meier yöntemindeki denklemler kullanılarak, doğru yol ve kurbalardaki kritik sıcaklık artışları ve hatalı yol uzunlukları (L) hesaplanmıştır. Bulunan hatalı yol uzunlukları, Nemesdy yönteminde kritik kuvvet ile ilgili (1.19) ve (1.20) denklemler

lerindeki yerlerine konarak bu denklemlerden elde edilen sonuçlar kritik sıcaklık kuvvetine ( $F_{sıc} = \alpha \cdot \Delta T \cdot A_p \cdot E$ ) eşitlenmek suretiyle kritik sıcaklık artışı ( $\Delta T$ ) değerleri elde edilmiştir. Arnold D. Kerr tarafından geliştirilmiş analiz yönteminde de, Meier yönteminde doğru yollar için hesaplanan hatalı yol uzunlukları kullanılarak kritik burkulma kuvvetleri hesaplanmış,

$$F_{kr} = \frac{4\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2}$$

çıkaran değerler (1.33) denkleminde yerine konarak doğru yol hesap yapılarak, sonuçlar tablo ve grafikler halinde gösterilmektedir. Kritik sıcaklık artışları ( $\Delta T$ ) elde edilmiştir.

Sayısal örneğin sonucu, demiryolunda mevcut hata  $f=1,5$  cm için, yanal kayma direncinin cm başına  $10 \text{ N}$ 'luk artışı, kritik sıcaklık artışı değerlerinin, doğru yollarda, Meier yönteminde,  $5-6 \text{ C}$ , Nemesdy yönteminde,  $5-7 \text{ C}$ , Kerr tarafından geliştirilen analiz yönteminde ise  $1-2 \text{ C}$  büyümesine neden olmaktadır. Aynı şartlarda, kurbalarda kritik sıcaklık artışı değerleri, Meier yönteminde, küçük yarıçaplarda,  $5-7 \text{ C}$ , büyük yarıçaplarda  $6-8 \text{ C}$ , Nemesdy yönteminde, küçük yarıçaplarda,  $14-19 \text{ C}$ , büyük yarıçaplarda,  $15-21 \text{ C}$  artmaktadır. Demiryolunda mevcut hata  $f=2,5$  cm alındığında bu değerler biraz daha azalmaktadır.

Genel olarak bütün yöntemlerde, yanal kayma direncinin büyümesi, kritik sıcaklık artışı ( $\Delta T$ ) değerlerinin büyümesine neden olmaktadır. Bu da, uzun kaynaklı demiryollarında, sıcaklık farklarından doğan gerilmeleri karşılayabilmeyen en etkin yolunun, yanal kayma direncini arttırmak ol-

duğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, demiryollarının emniyeti bakımından, doğru yollarda, Kerr tarafından geliştirilmiş analiz yöntemine ait, kurbalarda ise Meier yöntemine ait, kritik sıcaklık değerleri önem kazanmaktadır. (Bu iki yöntemde, kritik sıcaklık artış değerleri en küçük çıkmaktadır.) Nemesdy yöntemi ile bulunan kritik sıcaklık artışı değerleri ise en ekonomik sonuçları oluşturmaktadır. (Kritik sıcaklık artışları en büyük olmaktadır.)

Sayısal değerlendirme için aşağıdaki verilere göre hesap yapılarak, sonuçlar, tablo ve grafikler halinde gösterilmiş ve hesap yöntemlerine ait bilgisayar programları tezin sonuna eklenmiştir.

Ray tipi: S49

Atalet momenti:  $2I_y = 638 \text{ cm}^4$

İki rayın kesit alanı:  $A_p = 125,94 \text{ cm}^2$

Yanal kayma direnci:  $P = 30, 40, 50, 60, 70 \text{ N/cm}$

Hata formu:  $C_R$

Döndürme momenti:  $M = 100000 \text{ Ncm}$

Eksenel direnç:  $R_0 = 6,7 \text{ Kg/cm}$

Travers aralığı:  $a = 60 \text{ cm}$

Mevcut hata:  $f = 1,5, 2,5 \text{ cm}$

Başlangıç hatası:  $f_0 = 0,5 \text{ cm}$

Sabit eksenel direnç bölg. eksenel yer değ.  $= U_{*} = 0,5 \text{ cm}$

Max. eksenel yer değiştirme:  $U_{\text{max}} = 0,5 \text{ cm}$

Elastisite modülü:  $E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}$

Genleşme katsayısı:  $\alpha = 1,15 \times 10^{-5} \text{ } 1/\text{C}$



MEIER YÖNTEMİYLE BULUNAN VE HESAP YÖNTEMLERİNİN SAYISAL  
KARŞILAŞTIRILMASI İÇİN KULLANILAN HATALI YOL UZUNLUĞU (L) DEĞERLERİ

Y.K.D. [N/cm]	f=1,5 [cm]						f=2,5 [cm]					
	R [m]						R [m]					
	Doğru yol	300	400	500	600	700	Doğru yol	300	400	500	600	700
30	13,74	12,00	10,96	10,32	9,59	8,59	15,09	12,49	11,43	10,55	10,47	10,20
40	12,78	10,70	9,80	9,28	8,24	8,70	14,00	11,05	10,28	9,81	9,50	9,79
50	12,09	9,74	9,01	8,58	8,20	8,09	13,29	10,15	9,42	9,09	8,84	8,95
60	11,55	9,06	8,43	8,05	7,80	7,82	12,59	9,45	8,90	8,56	8,34	8,18
70	11,12	8,54	7,97	7,64	7,42	7,26	12,21	8,95	8,44	8,14	7,94	7,80

MEIER YÖNTEMİ İLE HESAPLANMIŞ KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI DEĞERLERİ ( $\Delta T$ )

Y.K.D. [N/cm]	f=1,5 [cm]						f=2,5 [cm]					
	Doğru yol	R=300	R=400	R=500	R=600	R=700	Doğru yol	R=300	R=400	R=500	R=600	R=700
30	40	23	25	31	34	36	33	22	25	28	30	32
40	46	29	35	39	42	44	38	27	31	35	37	39
50	51	35	41	45	48	51	43	32	37	40	43	45
60	56	41	47	51	55	57	47	37	42	45	48	50
70	61	48	52	57	61	63	50	41	47	50	53	55

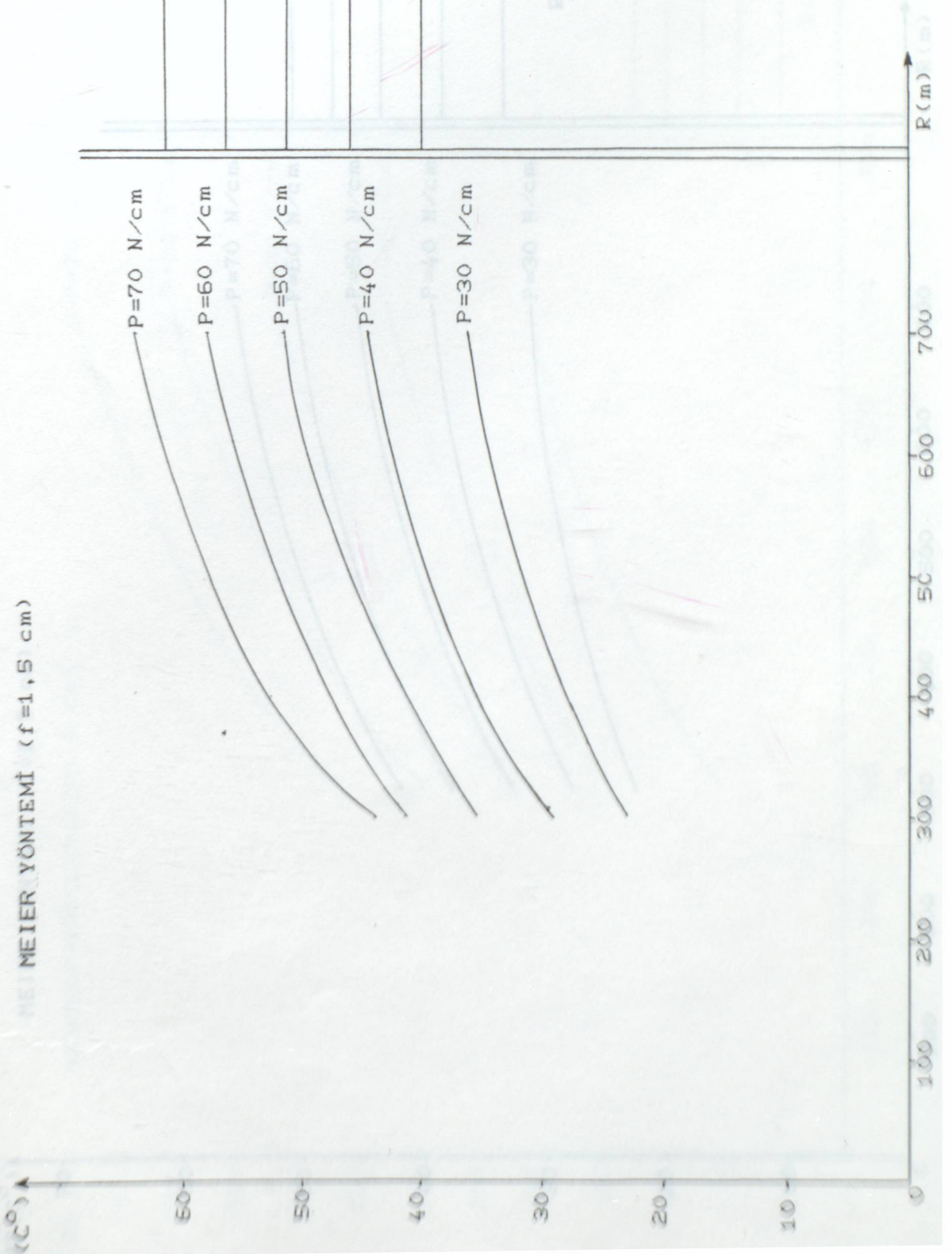
NEMESDY YÖNTEMİ İLE HESAPLANMIŞ KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI DEĞERLERİ ( $\Delta T$ )

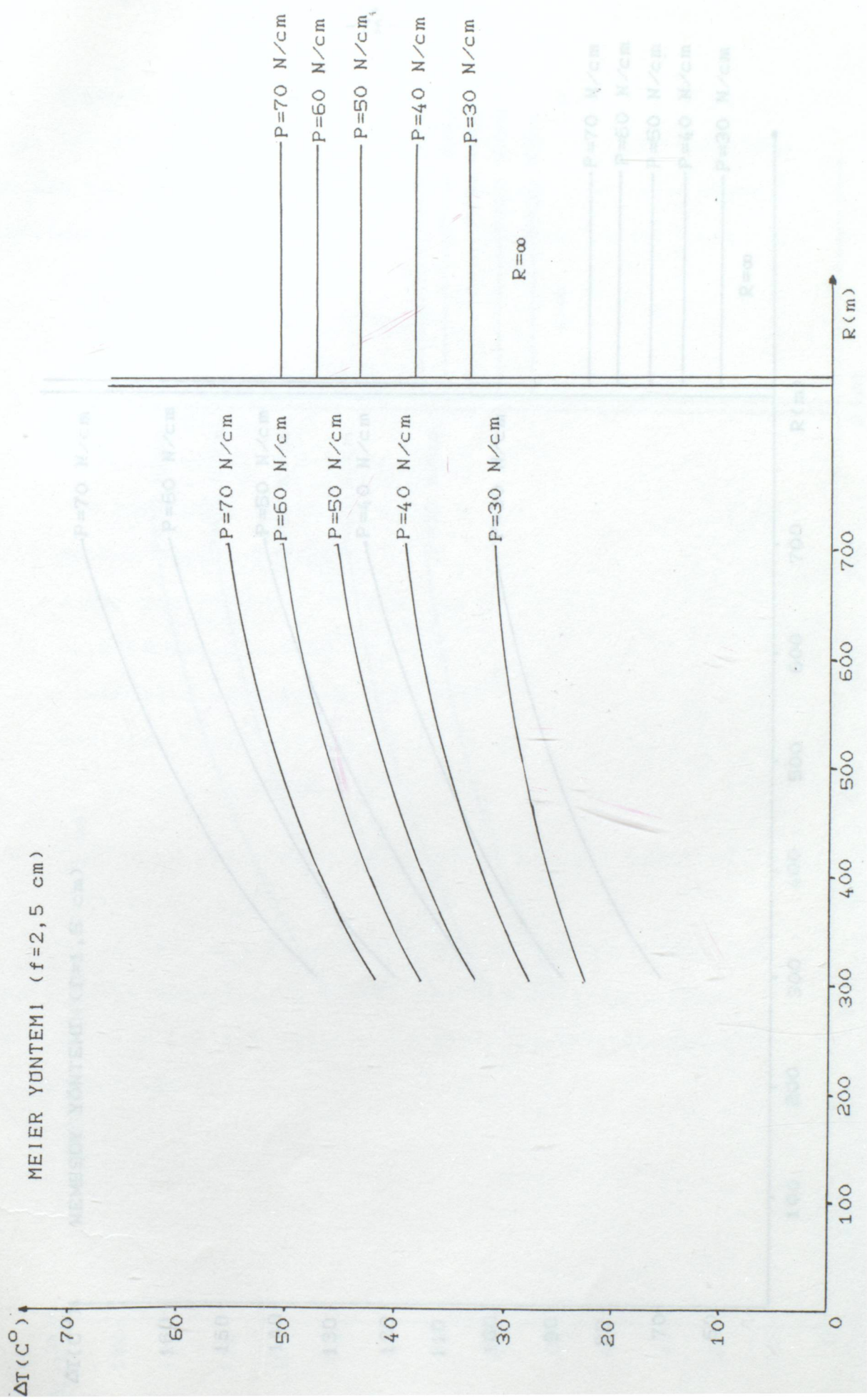
Y.K.D. [N/cm]	f=1,5 cm						f=2,5 cm					
	Doğru yol	R=300	R=400	R=500	R=600	R=700	Doğru yol	R=300	R=400	R=500	R=600	R=700
30	80	70	82	91	97	103	56	50	59	66	71	75
40	87	88	101	111	118	124	62	62	72	79	85	89
50	73	104	113	129	137	143	67	72	83	91	97	101
60	79	119	134	146	154	160	72	82	94	102	108	113
70	84	133	150	161	170	176	77	82	104	112	118	123

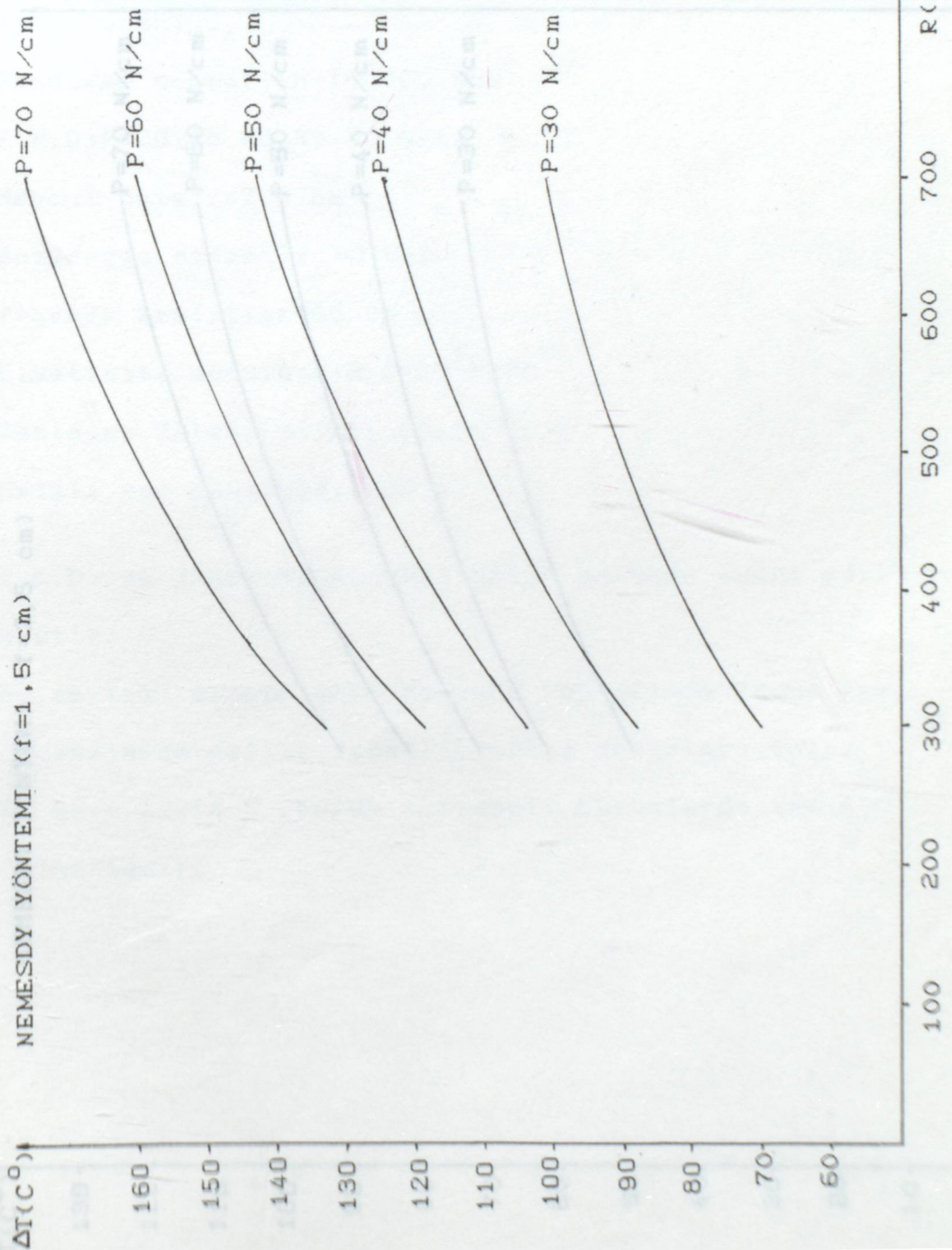
KERR TARAFINDAN GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ YÖNTEMİ  
İLE HESAPLANMIŞ KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI DEĞERLERİ ( $\Delta T$ )

Y.K.D. P[N/cm]	DOĞRU YOL			
	f=1,5 cm		f=2,5 cm	
	Ro=7 Kg/cm	Ro=6 Kg/cm	Ro=7 Kg/cm	Ro=6 Kg/cm
30	9	9	8	8
40	11	11	9	9
50	12	12	10	10
60	13	13	11	11
70	14	14	12	12

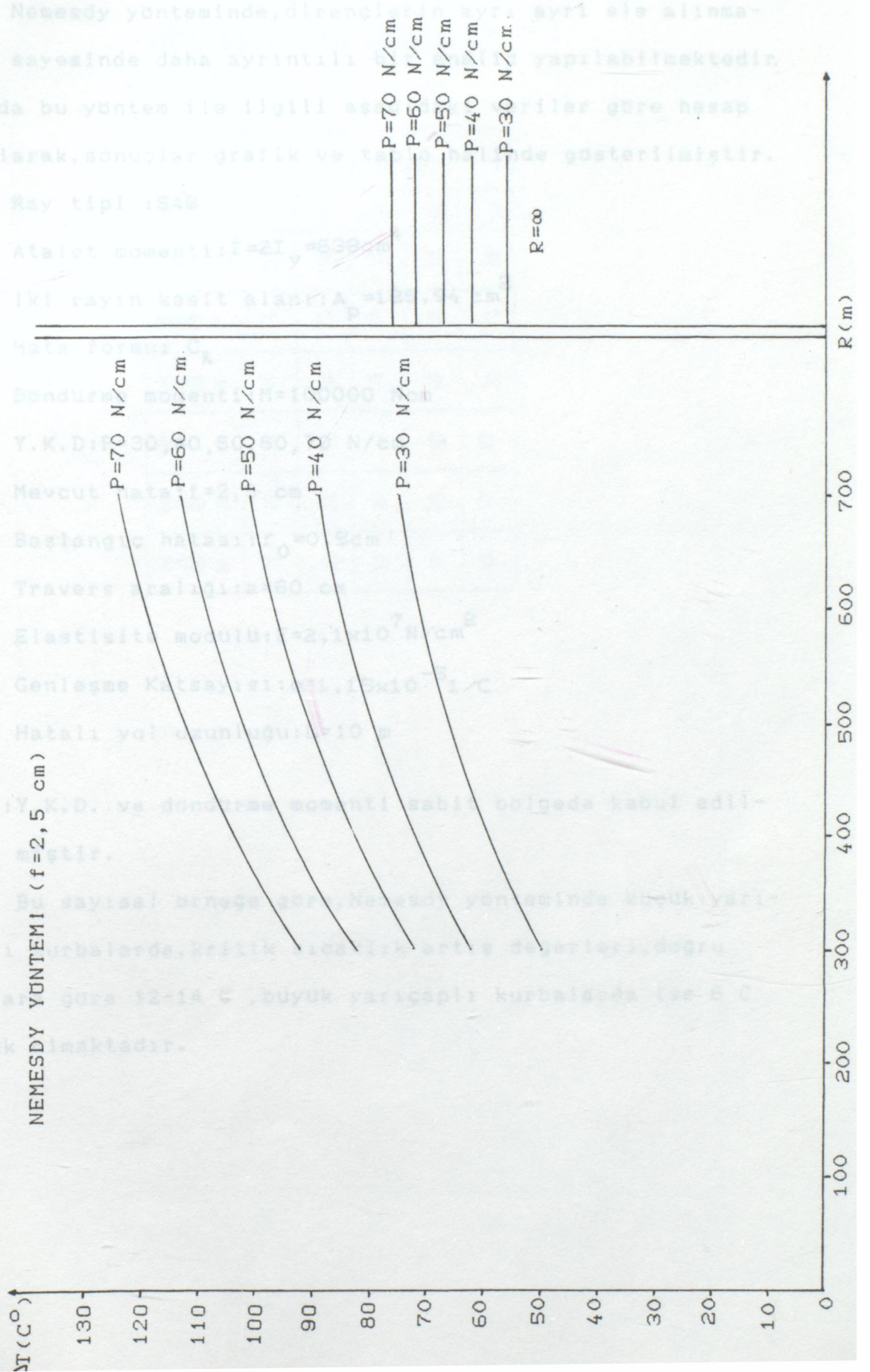
MEIER YÖNTEMİ (f=1,5 cm)







- P=70 N/cm
- P=60 N/cm
- P=50 N/cm
- P=40 N/cm
- P=30 N/cm
- R=∞



Nemesdy yönteminde, dirençlerin ayrı ayrı ele alınması sayesinde daha ayrıntılı bir analiz yapılabilir. Burada bu yöntem ile ilgili aşağıdaki veriler göre hesap yapılarak, sonuçlar grafik ve tablo halinde gösterilmiştir.

Ray tipi : S49

Atalet momenti:  $I = 2I_y = 638 \text{ cm}^4$

iki rayın kesit alanı:  $A_p = 125,94 \text{ cm}^2$

Hata formu:  $C_R$

Döndürme momenti:  $M = 100000 \text{ Ncm}$

Y.K.D:  $P = 30, 40, 50, 60, 70 \text{ N/cm}$

Mevcut hata:  $f = 2,5 \text{ cm}$

Başlangıç hatası:  $f_0 = 0,5 \text{ cm}$

Travers aralığı:  $a = 60 \text{ cm}$

Elastisite modülü:  $E = 2,1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$

Genleşme Katsayısı:  $\alpha = 1,15 \times 10^{-5} \text{ } 1/\text{C}$

Hatalı yol uzunluğu:  $L = 10 \text{ m}$

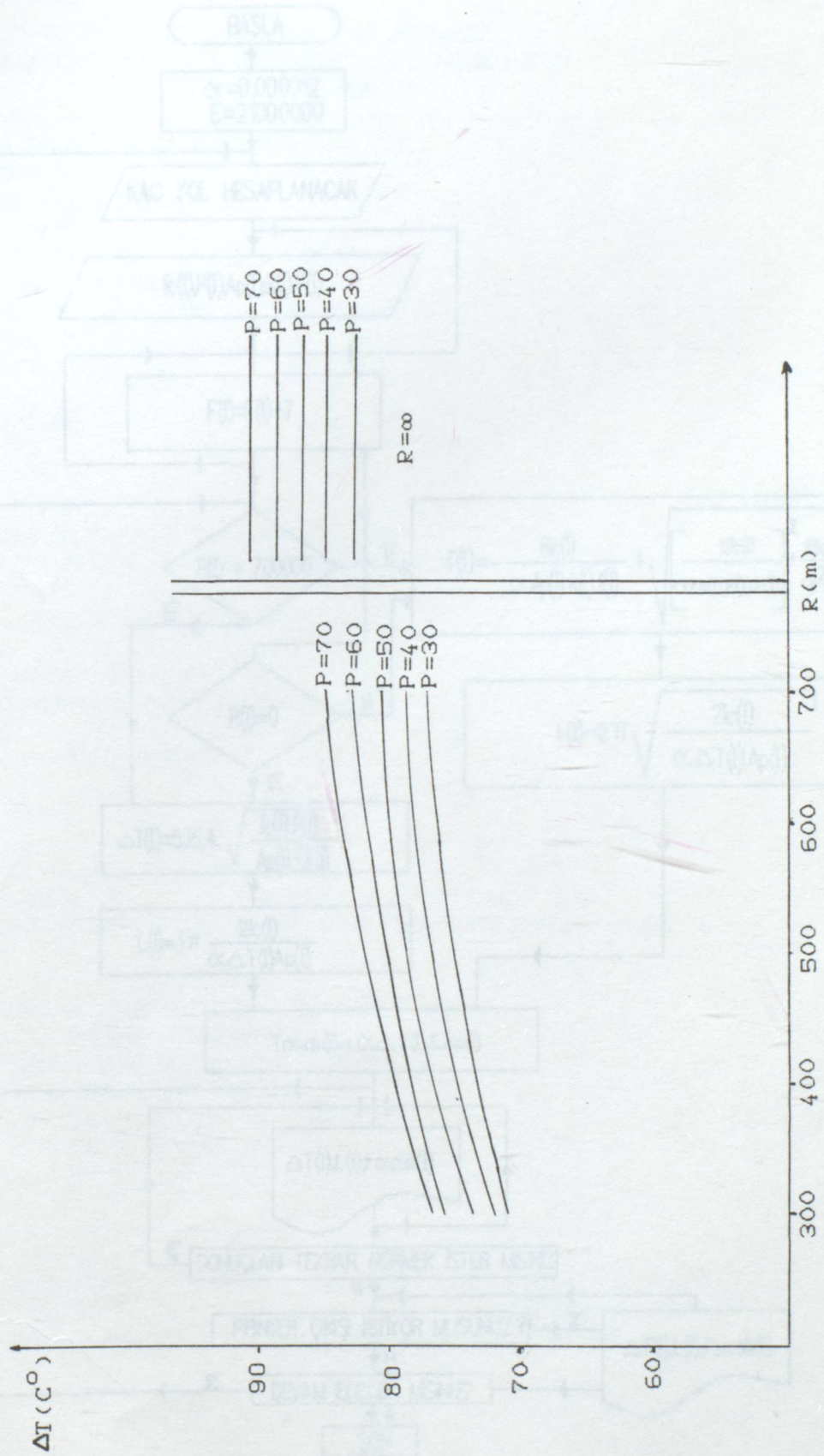
NOT: Y.K.D. ve döndürme momenti sabit bölgede kabul edilmiştir.

Bu sayısal örneğe göre, Nemesdy yönteminde küçük yarıçaplı kurbalarda, kritik sıcaklık artış değerleri, doğru yollara göre 12-14 C, büyük yarıçaplı kurbalarda ise 6 C küçük olmaktadır.

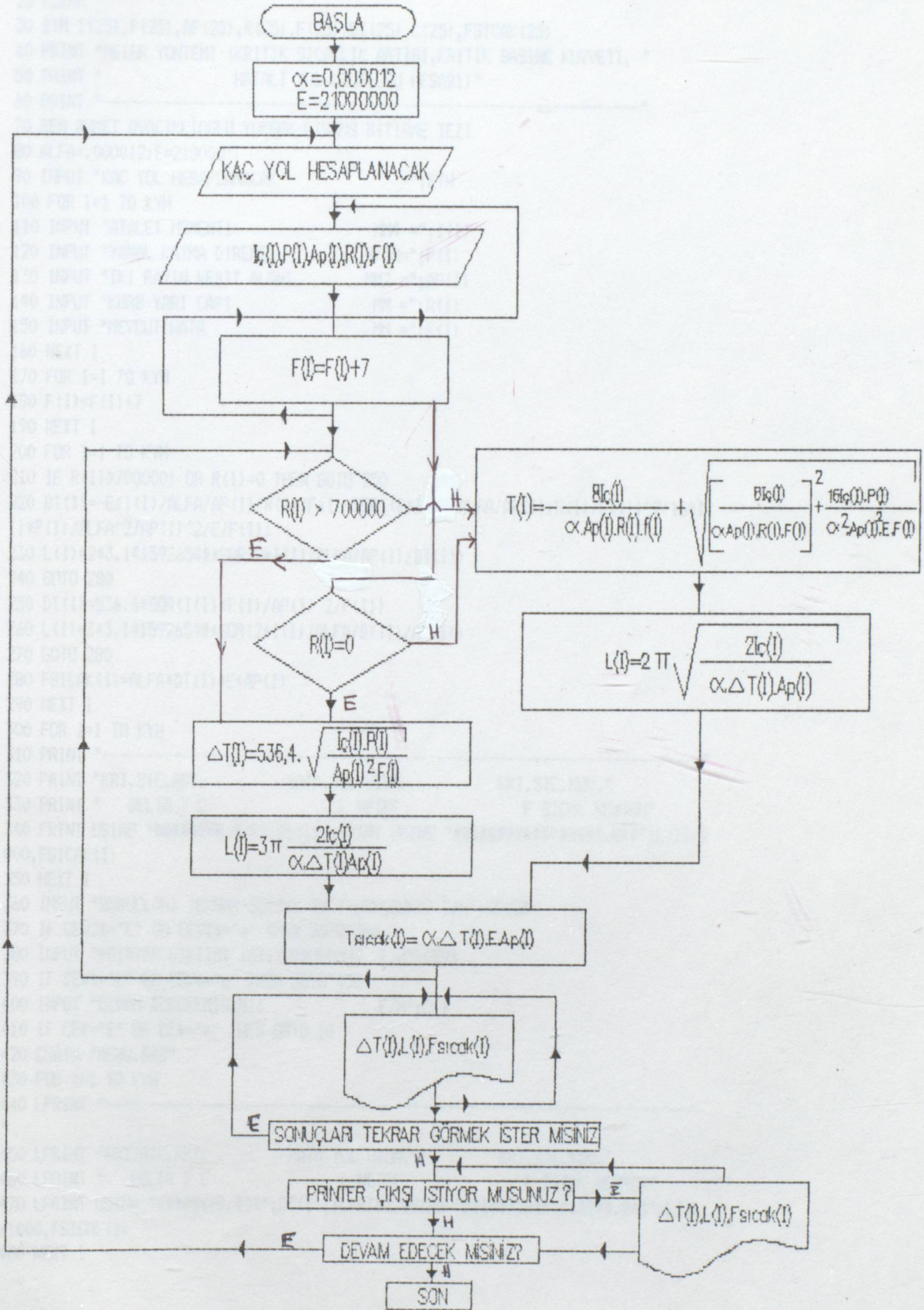
NEMESDY YÖNTEMİ İLE HESAPLANMIŞ  
KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI DEĞERLERİ ( $\Delta T$ )

YOL DURUMU	Y.K.D. (N/cm)				
	30	40	50	60	70
DOĞRU YOL	55	55	57	59	61
R=300 m	71	72	74	76	77
R=400 m	73	75	77	79	80
R=500 m	75	77	79	80	82
R=600 m	75	75	80	82	84
R=700 m	77	79	81	83	85

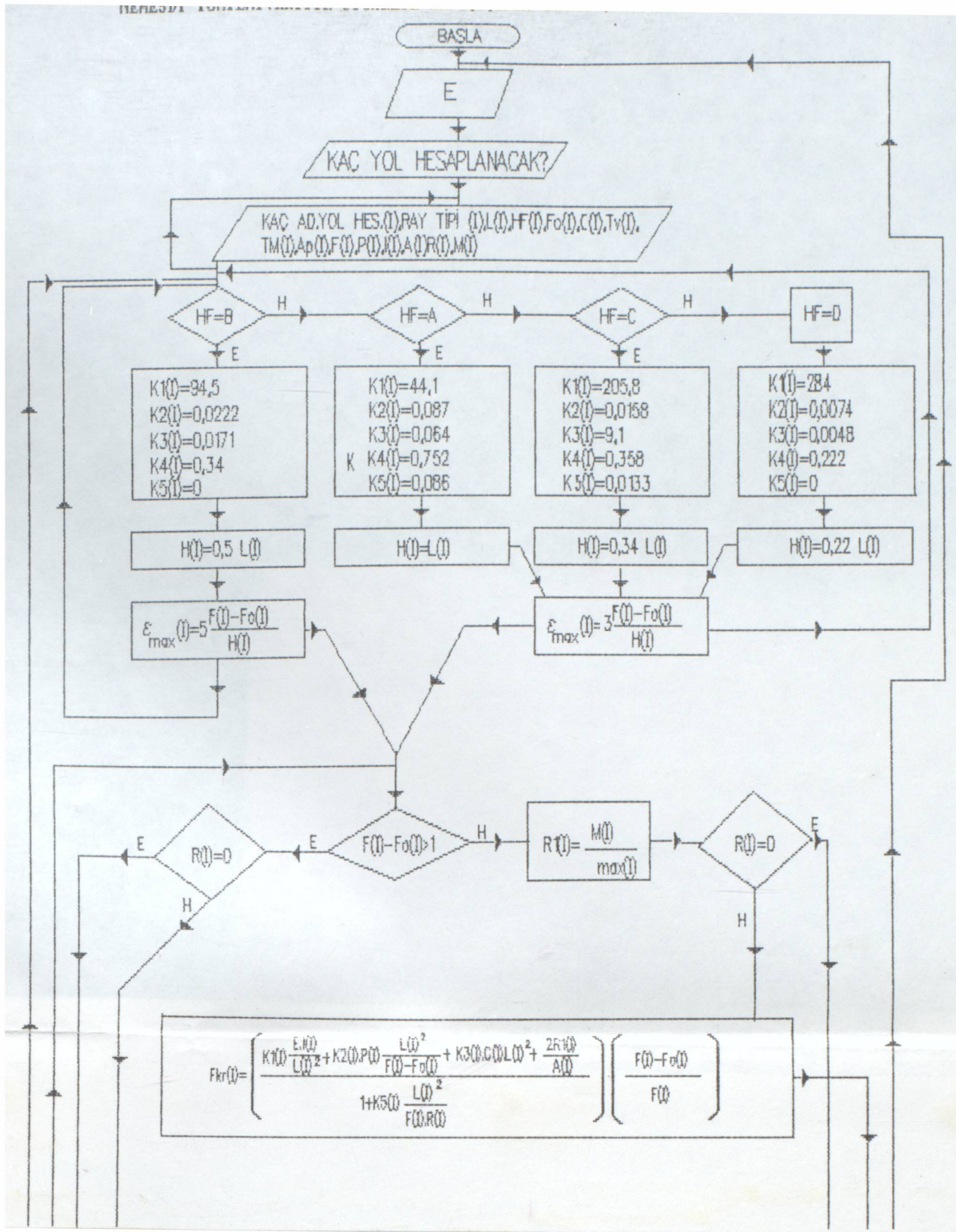
YERLEŞİMİNİN (ZEMİN SICAKLIK DEĞİŞİMİ, YERİN BASINÇ KUVVETİ VE BAĞLI YOL UZUNLUĞU)

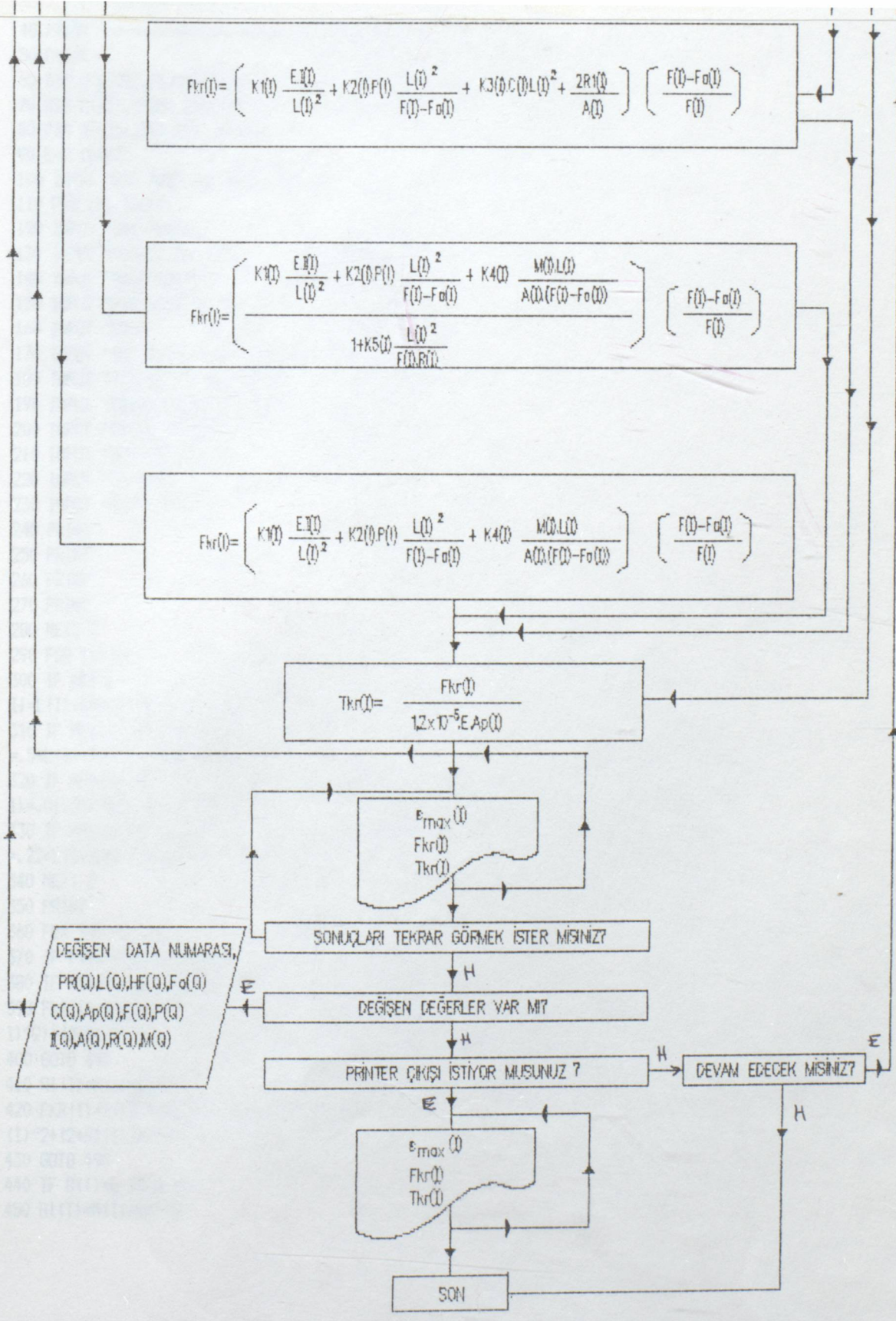


MEIER YÖNTEMİ ( KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI, KRİTİK BASINÇ KUVVETİ VE HATALI YOL UZUNLUĞU )



```
10 CLS:KEY OFF
20 CLEAR
30 DIM I(25),P(25),AP(25),R(25),F(25),DT(25),L(25),FSICAK(25)
40 PRINT "MEIER YONTEMI (KRITIK SICAKLIK ARTISI,KRITIK BASINC KUVVETI, "
50 PRINT "          HATALI YOL UZUNLUGU HESABI)"
60 PRINT "-----"
70 REM AHMET OVACIKLIOGLU YUKSEK LISANS BITIRME TEZI
80 ALFA=.000012:E=210000!
90 INPUT "KAC YOL HESAPLANACAK          =" ;KYH
100 FOR I=1 TO KYH
110 INPUT "ATALET MOMENTI                MM4 =" ;I(I)
120 INPUT "YANAL KAYMA DIRENCI          N/MM=" ;P(I)
130 INPUT "IKI RAYIN KESIT ALANI        MM2 =" ;AP(I)
140 INPUT "KURB YARI CAPI                MM =" ;R(I)
150 INPUT "MEVCUT HATA                    MM =" ;F(I)
160 NEXT I
170 FOR I=1 TO KYH
180 F(I)=F(I)+7
190 NEXT I
200 FOR I=1 TO KYH
210 IF R(I)>700000! OR R(I)=0 THEN GOTO 250
220 DT(I)=-8*I(I)/ALFA/AP(I)/R(I)/F(I)+SQR((8*I(I)/ALFA/AP(I)/R(I)/F(I))^2+16*I(I)*P(I)/ALFA^2/AP(I)^2/E/F(I))
230 L(I)=2*3.141592654#*SQR(2*I(I)/ALFA/AP(I)/DT(I))
240 GOTO 280
250 DT(I)=536.4*SQR(I(I)*P(I)/AP(I)^2/F(I))
260 L(I)=3*3.141592654#*SQR(2*I(I)/ALFA/DT(I)/AP(I))
270 GOTO 280
280 FSICAK(I)=ALFA*DT(I)*E*AP(I)
290 NEXT I
300 FOR I=1 TO KYH
310 PRINT "-----"
320 PRINT "KRI.SIC.ART.          HATA.YOL UZUN.          KRI.SIC.KUV."
330 PRINT "  DELTA T C          L METRE          F SICAK NEWTON"
340 PRINT USING "#####.###";DT(I);:PRINT USING "#####.###";L(I)/1000,FSICAK(I)
350 NEXT I
360 INPUT "SONUCLARI TEKRAR GORMEK ISTIYORMUSUNUZ E/H";CEV2#
370 IF CEV2#="E" OR CEV2#="e" THEN GOTO 300
380 INPUT "PRINTER CIKTISI ISTIYORMUSUNUZ E/H";CEV#
390 IF CEV#="E" OR CEV#="e" THEN GOTO 430
400 INPUT "DEVAM EDECEKMISINIZ          E/H";CE#
410 IF CE#="E" OR CE#="e" THEN GOTO 10
420 CHAIN "MENU.BAS"
430 FOR I=1 TO KYH
440 LPRINT "-----"
"
450 LPRINT "KRI.SIC.ART.          HATA.YOL UZUN.          KRI.SIC.KUV."
460 LPRINT "  DELTA T C          L METRE          F SICAK NEWTON"
470 LPRINT USING "#####.###";DT(I);:LPRINT USING "#####.###";L(I)/1000,FSICAK(I)
480 NEXT I
```

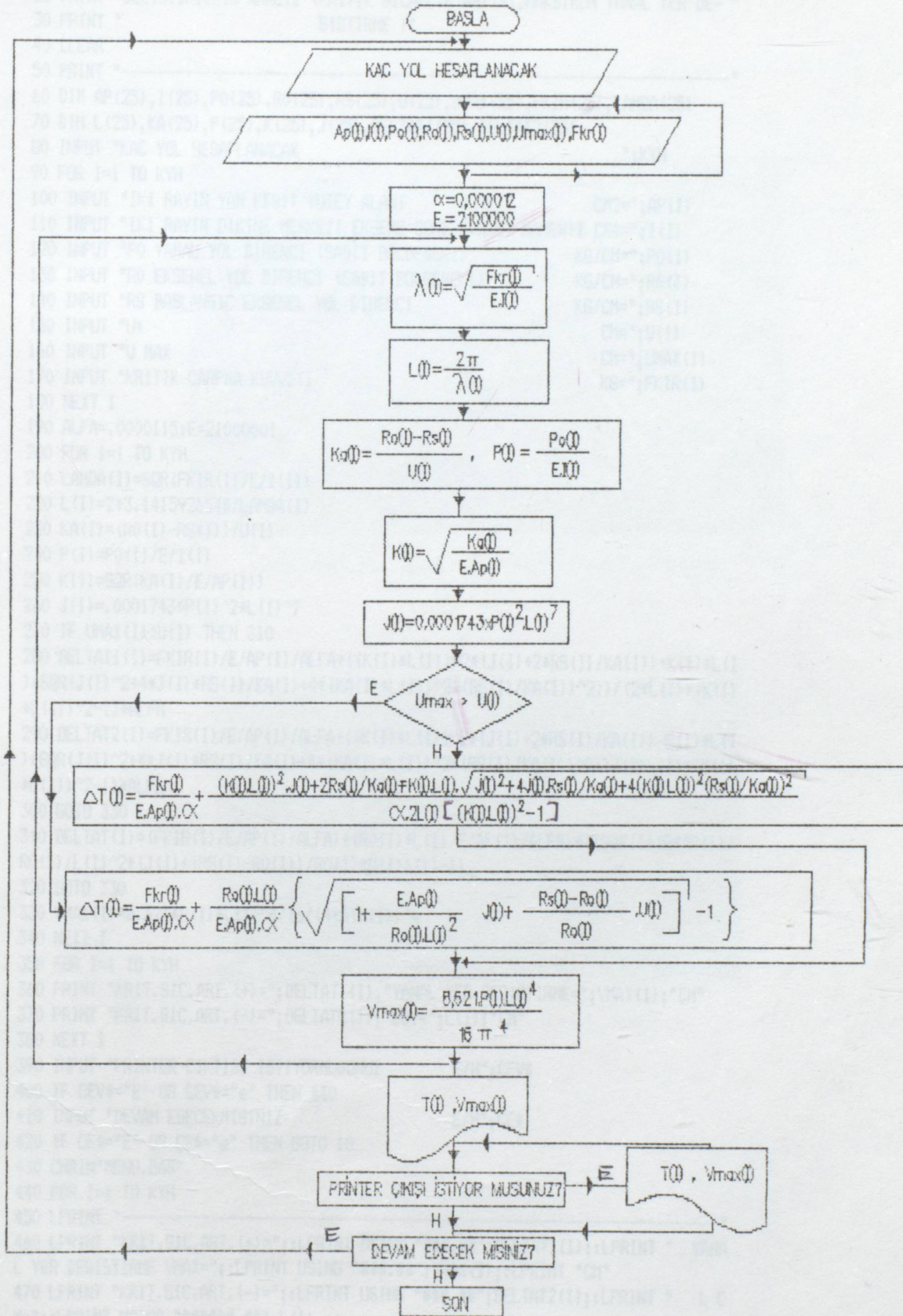




```
10 KEY OFF:CLS
20 REM AHMET OVACIKLIOGLU YUKSEK LISANS TEZI
30 PRINT "NEMESDY YONTEMI (KRITIK CARPILMA KUVVETI HESABI)"
40 PRINT "=====
50 CLEAR
60 DIM HF$(25),F0(25),F(25),L(25),C(25),P(25),I(25),A(25),PR$(25)
70 DIM R(25),M(25),EMX(25),K1(25),K2(25),K3(25),K4(25),K5(25),R1(25)
80 DIM AP(25),FKR(25),TKR(25)
90 E=2.1E+07
100 INPUT "KAC ADET YOL HESAPLANACAK   =";KCY
110 FOR I=1 TO KCY
120 INPUT "RAY PROFILI                   =";PR$(I)
130 INPUT "HATALI YOL BOYU               CM=";L(I)
140 INPUT "HATA FORMU                   A/B/C/D=";HF$(I)
150 INPUT "BASLANGIC HATASI            CM=";F0(I)
160 INPUT "EGIM       TAN ALFA         C   =";C(I)
170 INPUT "IKI RAYIN KESIT ALANI       CM2=";AP(I)
180 INPUT "TOPLAM YOL HATASI          CM=";F(I)
190 INPUT "YANAL KAYMA DIRENCI        N/CM=";P(I)
200 INPUT "ATALET MOMENTI             CM4=";I(I)
210 INPUT "TRAVERS ARALIGI           CM=";A(I)
220 INPUT "YARICAP                   CM=";R(I)
230 INPUT "DONME MOMENTI             NCM=";M(I)
240 PRINT
250 PRINT
260 PRINT
270 PRINT
280 NEXT I
290 FOR I=1 TO KCY
300 IF HF$(I)="A" THEN K1(I)=44.1:K2(I)=.087:K3(I)=.064:K4(I)=.752:K5(I)=.086:H(
I)=L(I):EMX(I)=3*(F(I)-F0(I))/H(I):GOTO 340
310 IF HF$(I)="B" THEN K1(I)=94.5:K2(I)=.0222:K3(I)=.0171:K4(I)=.34:K5(I)=0:H(I)
=.5*L(I):EMX(I)=5*(F(I)-F0(I))/H(I):GOTO 340
320 IF HF$(I)="C" THEN K1(I)=205.8:K2(I)=.0158:K3(I)=9.100001E-03:K4(I)=.358:K5(
I)=.0133:H(I)=.34*L(I):EMX(I)=3*(F(I)-F0(I))/H(I):GOTO 340
330 IF HF$(I)="D" THEN K1(I)=284:K2(I)=.0074:K3(I)=.0048:K4(I)=.222:K5(I)=0:H(I)
=.22*L(I):EMX(I)=3*(F(I)-F0(I))/H(I):GOTO 340
340 NEXT I
350 PRINT
360 FOR I=1 TO KCY
370 IF F(I)-F0(I)>1 THEN 440
380 IF R(I)=0 THEN 410
390 FKR(I)=((K1(I)*E*I(I)/L(I)^2)+(K2(I)*P(I)*L(I)^2/(F(I)-F0(I)))+(K3(I)*C(I)*L(
I)^2)+(2*R1(I)/A(I)))/(1+(K5(I)*L(I)^2/(F(I)*R(I))))*(F(I)-F0(I))/F(I)
400 GOTO 490
410 R1(I)=M(I)/EMX(I)
420 FKR(I)=((K1(I)*E*I(I)/L(I)^2)+(K2(I)*P(I)*L(I)^2/(F(I)-F0(I)))+(K3(I)*C(I)*L(
I)^2)+(2*R1(I)/A(I)))*(F(I)-F0(I))/F(I)
430 GOTO 490
440 IF R(I)=0 THEN 480
450 R1(I)=M(I)/EMX(I)
```

```
460 FKR(I)=(K1(I)*E*I(I)/L(I)^2)+(K2(I)*P(I)*L(I)^2/(F(I)-F0(I)))+(K4(I)*M(I)*L
(I)/(A(I)*(F(I)-F0(I))))/(1+(K5(I)*L(I)^2/(F(I)*R(I))))*(F(I)-F0(I))/F(I)
470 GOTO 490
480 FKR(I)=(K1(I)*E*I(I)/L(I)^2+K2(I)*P(I)*L(I)^2/(F(I)-F0(I))+K4(I)*M(I)*L(I)/
A(I)*(F(I)-F0(I)))*(F(I)-F0(I))/F(I)
490 TKR(I)=FKR(I)/(1.2*10^-5*E*AP(I))
500 NEXT I
510 PRINT "SONUCLAR":PRINT
520 FOR I=1 TO KCY
530 PRINT "      TKR      E max      F kritik      "
540 PRINT "-----"
550 PRINT USING "#####.##";TKR(I);:PRINT USING "#####.###";EMX(I);:PR
INT USING "#####";FKR(I)
560 PRINT
570 NEXT I
580 INPUT "SONUCLARI TEKRAR GORMEK ISTERMISINIZ E/H";CEV2#
590 IF CEV2#="E" OR CEV2#="e" THEN GOTO 510
600 INPUT "DEGISEN DEGERLER VARMI      E/H";DEG#
610 IF DEG#="E" OR DEG#="e" THEN GOTO 630
620 GOTO 770
630 INPUT "DEGISEN DATA NUMARASI      =";Q
640 INPUT "RAY PROFILI      =";PR$(Q)
650 INPUT "HATALI YOL BOYU      CM=";L(Q)
660 INPUT "HATA FORMU      A/B/C/D=";HF$(Q)
670 INPUT "BASLANGIC HATASI      CM=";FO(Q)
680 INPUT "EGIM      TAN ALFA      C      =";C(Q)
690 INPUT "IKI RAYIN KESIT ALANI      CM2=";AP(Q)
700 INPUT "TOPLAM YOL HATASI      CM=";F(Q)
710 INPUT "YANAL KAYMA DIRENCI      N/CN=";P(Q)
720 INPUT "ATALET MOMENTI      CM4=";I(Q)
730 INPUT "TRAVERS ARALIGI      CM=";A(Q)
740 INPUT "YARICAP      CM=";R(Q)
750 INPUT "DONME MOMENTI      NCM=";M(Q)
760 GOTO 290
770 INPUT "PRINTER CIKTISI ISTIYORMUSUNUZ E/H";CEV#
780 IF CEV#="E" OR CEV#="e" THEN GOTO 820
790 INPUT "DEVAM EDECEKMISINIZ      E/H";CE#
800 IF CE#="E" OR CE#="e" THEN GOTO 10
810 CHAIN "MENU.BAS"
820 LPRINT "SONUCLAR"
830 FOR I=1 TO KCY
840 LPRINT "      TKR      E max      F kritik      "
850 LPRINT "-----"
860 LPRINT USING "#####.##";TKR(I);:LPRINT USING "#####.###";EMX(I);:
LPRINT USING "#####";FKR(I)
870 LPRINT
880 NEXT I
890 GOTO 770
```

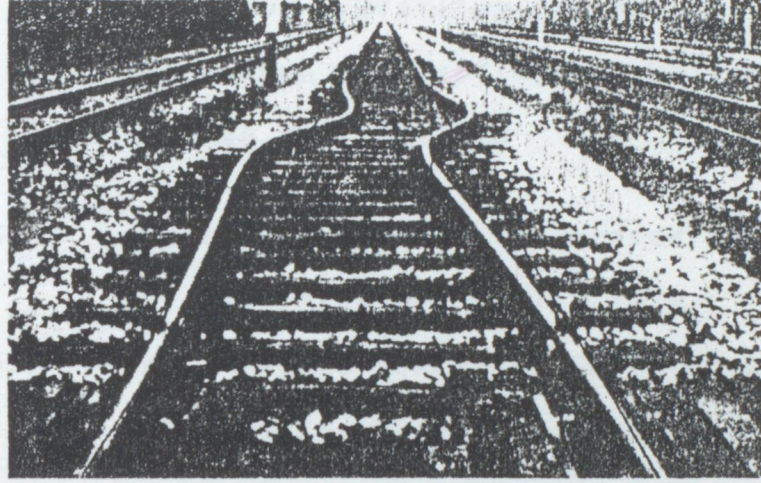
GELİŞTİRİLMİŞ ANALİZ YÖNTEMİ ( KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI, MAX. YANAL KAYMA)



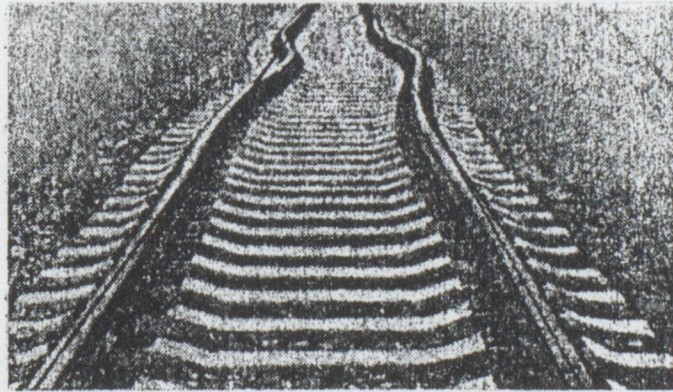
```
10 CLS:KEY OFF
20 PRINT "GELİSTİRİLMİŞ ANALİZ (KRİTİK SICAKLIK ARTIŞI,MAKSİMUM YANAL YER DE- "
30 PRINT "          GİSTİRME )"
40 CLEAR
50 PRINT "-----"
60 DIM AP(25),I(25),P0(25),R0(25),RS(25),U(25),UMAX(25),FKIR(25),LAMDA(25)
70 DIM L(25),KA(25),P(25),K(25),J(25),DELTAT1(25),DELTAT2(25)
80 INPUT "KAC YOL HESAPLANACAK          ";KYH
90 FOR I=1 TO KYH
100 INPUT "İKİ RAYIN YAN KESİT YÜZEY ALANI          CM2=";AP(I)
110 INPUT "İKİ RAYIN DİKİNE MERKEZİ EKSENE GÖRE ATALET MOMENTİ CM4=";I(I)
120 INPUT "P0 YANAL YOL DİRENCİ (SABİT BÖLGEDEKİ)          KG/CM=";P0(I)
130 INPUT "R0 EKSENEL YOL DİRENCİ (SABİT BÖLGEDEKİ)          KG/CM=";R0(I)
140 INPUT "RS BAŞLANGIÇ EKSENEL YOL DİRENCİ          KG/CM=";RS(I)
150 INPUT "U*          CM=";U(I)
160 INPUT "U MAX          CM=";UMAX(I)
170 INPUT "KRİTİK ÇARPMA KUVVETİ          KG=";FKIR(I)
180 NEXT I
190 ALFA=.0000115:E=2100000!
200 FOR I=1 TO KYH
210 LAMDA(I)=SQR(FKIR(I)/E/I(I))
220 L(I)=2*3.141592654#/LAMDA(I)
230 KA(I)=(R0(I)-RS(I))/U(I)
240 P(I)=P0(I)/E/I(I)
250 K(I)=SQR(KA(I)/E/AP(I))
260 J(I)=.0001743*P(I)^2*L(I)^7
270 IF UMAX(I)>U(I) THEN 310
280 DELTAT1(I)=FKIR(I)/E/AP(I)/ALFA+((K(I)*L(I))^2*(J(I)+2*RS(I)/KA(I))+K(I)*L(I)
)*SQR((J(I)^2+4*J(I)*RS(I)/KA(I)+4*(KA(I)*L(I))^2*(RS(I)/KA(I))^2)/(2*L(I)*(K(I)
)*L(I)^2-1)*ALFA
290 DELTAT2(I)=FKIR(I)/E/AP(I)/ALFA+((K(I)*L(I))^2*(J(I)+2*RS(I)/KA(I))-K(I)*L(I)
)*SQR((J(I)^2+4*J(I)*RS(I)/KA(I)+4*(KA(I)*L(I))^2*(RS(I)/KA(I))^2)/(2*L(I)*(K(I)
)*L(I)^2-1)*ALFA
300 GOTO 330
310 DELTAT(I)=(FKIR(I)/E/AP(I)/ALFA+(R0(I)*L(I)/E/AP(I)/ALFA)*(SQR(1+(E*AP(I)/
R0(I)/L(I)^2*(J(I)+(RS(I)-R0(I))/R0(I)*U(I)))))-1)
320 GOTO 330
330 VMAX(I)=8.621*P(I)*L(I)^4/16/(4*ATN(I))^4
340 NEXT I
350 FOR I=1 TO KYH
360 PRINT "KRİT.SIC.ART.(+)=";DELTAT1(I),"YANAL YER DEĞİSTİRME=";VMAX(I);"CM"
370 PRINT "KRİT.SIC.ART.(-)=";DELTAT2(I);"BOY=";L(I);"CM"
380 NEXT I
390 INPUT "PRİNER ÇIKTI İSTİYORMUSUNUZ          E/H";CEV#
400 IF CEV#="E" OR CEV#="e" THEN 440
410 INPUT "DEVAM EDECEKMİSİNİZ          E/H";CE#
420 IF CE#="E" OR CE#="e" THEN GOTO 10
430 CHAIN"MENU.BAS"
440 FOR I=1 TO KYH
450 LPRINT "-----"
460 LPRINT "KRİT.SIC.ART.(+)=";LPRINT USING "###.##";DELTAT1(I);:LPRINT " YANA
L YER DEĞİSTİRME VMAX=";LPRINT USING "###.##";VMAX(I);:LPRINT "CM"
470 LPRINT "KRİT.SIC.ART.(-)=";LPRINT USING "###.##";DELTAT2(I);:LPRINT " L C
M=";LPRINT USING "#####.##";L(I)
480 NEXT I
490 GOTO 410
```

KATILIMLAR

1-) Eisenmann, J. - Kottner, L. Gleisverstellung, Bauverfahren  
an die die und theoretische Analyse, Berlin



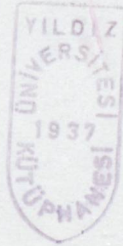
a) Antisimetrik Yer Değiştirme



b) Simetrik Yer Değiştirme

## KAYNAKLAR

- 1-)Eisenmann,J. - Mattner,L. Gleisverwerfung.Grossversuche  
im Gleis und theoretische Analyse,Mitteil  
ungen des prufanites für Bau Von Landver-  
kehrswegen der Tecnischen Universitat  
Munchen,Heft 52,1988
- 2-)Führer,G. - Oberbauberechnung Transpress,VEB Verlag  
für Verkehrswesen,Berlin,1979
- 3-)Kerr,A.D. - AN IMPROVED ANALYSIS FOR THERMAL TRUCK  
BUCKLING,Journal of Applied Mechanics Vol  
15,PP.99-114 pergaman press Ltd.1980  
Printed in Great Britain



## ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Ovacıklıoğlu,1960 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini,1971 yılında Bahariye İlkokulunda tamamladı.1974 yılında,Göztepe Ortaokulunu,1977 yılında,50. Yıl Tahran Lisesi'ni bitirdi.Aynı yıl öğrenime başladığı Yıldız Üniversitesi İnşaat Fakültesi bölümünden 1981 yılında mezun oldu.Askerlik görevini Ağrı'nın Eleşkirt ilçesinde Astegmen olarak yaptı.1982 yılında bir inşaat şirketinin Suudi Arabistan'daki İçme Suyu ve Pis Su Arıtma Tesisi İnşaatı Şantiyelerinde İnşaat Muhendisi olarak çalışmaya başladı.1985 yılında yurda döndükten sonra,Toplu Konut İnşaatı Şantiyelerinde görev aldı.1987 yılından bu yana,bir İnşaat Şirketinin Planlama Bölümünde,Planlama Muhendisi olarak çalışmaktadır.

