

A 2D grid of 20 squares arranged in 2 rows and 10 columns. The top row contains 10 squares, with the 7th square from the left containing a vertical line. The bottom row contains 10 squares, with the 4th square from the left containing a vertical line and the 5th square from the left containing a dot.

İnş. Müh. Fevzi Burak Yazıcıoğlu

□□□**i**ş□□□□□□□□□□**ğ**□□□□□□□□□□**i**□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□**i**□□□□□□□□□□

i i

□□□□□□□□□□İş□□□□□□□□□□Prof. Dr. Aydın EREL

i

6.2	Kritik Eksenel Basınç Kuvveti (F_{kr})	50
6.3	Parametrelerin Değişimi	57
6.4	Değişken Etki Parametrelerinin Değişimi (F_{kr})	59
6.4.1	Yol Hatasının (f) Etkisi	60
6.4.2	Kurp Yarıçapının (R) Etkisi	63
6.4.3	Ray Kesitinin (A_r) Etkisi	66
6.5	Değişken Etki Parametrelerinin Değişimi (ΔT_{kr})	68
6.5.1	Yol Hatasının (f) Etkisi	69
6.5.2	Kurp Yarıçapının (R) Etkisi	72
6.5.3	Ray Kesitinin (A_r) Etkisi	75
7.	ESVELD YÖNTEMİ	77
7.1	Genel	77
7.2	Hatasız Yol ve Değişken Yanal Kayma Direnci	77
7.3	Hatalı Yol ve Sabit Yanal Kayma Direnci	84
7.4	Değişken Etki Parametrelerinin Değişimi (F_{kr})	88
7.4.1	Yol Hatasının (f) Etkisi	89
7.4.2	Ray Kesitinin (A_r) Etkisi	92
7.5	Değişken Etki Parametrelerinin Değişimi (ΔT_{kr})	94
7.5.1	Yol Hatasının (f) Etkisi	95
7.5.2	Ray Kesitinin (A_r) Etkisi	98
8.	YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	100
9.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	102
	KAYNAKLAR	104
	ÖZGEÇMİŞ	105

α	Ray çeliğinin genleşme katsayısı
α_a	YKD'nin değişken olduğu bölgenin açısı
β	Orantı sabiti
ε	Traversin dönme açısı
$\varepsilon_{\max}$	Maksimum dönme açısı
λ	Eğilme eğrisinin kurba yayına (raya) göre uzaması
γ	Dönme direncinin değişken olduğu bölgenin açısı



Şekil 2.1 Demiryolu üstyapısı (Erel, 2004).....	2
Şekil 3.1 Basınç etkisi altındaki yol sistemi (Führer, 1979)	6
Şekil 3.2 Mafsallı bağlantı (Führer, 1979)	7
Şekil 3.3 Rijit bağlantı (Führer, 1979)	7
Şekil 3.4 Raylar ve traversler arasındaki dönme (Führer, 1979)	7
Şekil 3.5 Boyuna kuvvet ile boyuna kayma direnci arasındaki kayma direnci (Führer, 1979) .	8
Şekil 3.6 Burkulan rayda yanal kayma direnci (Führer, 1979)	8
Şekil 3.7 Kurptaki ray burkulması (Führer, 1979)	9
Şekil 4.1 Burkulma direnci (Führer, 1979)	10
Şekil 4.2 Ray ile travers arasındaki dönme (Führer, 1979).....	11
Şekil 4.3 Bağlantı dönme direnci (Führer, 1979).....	11
Şekil 4.4 Rayın sela üzerinde dönme açısı (Führer, 1979).....	12
Şekil 4.5 Yanal kayma direncinin kayma miktarı ile değişimi (Führer, 1979).....	13
Şekil 5.1 Kritik burkulma durumu (Eisenmann, Mattner, 1988)	15
Şekil 5.2 Yapılan toplam iş (Eisenmann, Mattner, 1988)	18
Şekil 5.3 Yol çerçevesinin atalet momentinin tayini (Führer, 1979)	20
Şekil 5.4 Yolun balast içindeki kayması (Eisenmann, Mattner, 1988)	22
Şekil 5.5 YKD - Yer değiştirme grafiği (Eisenmann, Mattner, 1988)	22
Şekil 5.6 Yanal kayma direncinin travers ve bağlantı türüne göre değişimi-S 49 (Eisenmann, Mattner, 1988).....	23
Şekil 5.7 Yanal kayma direncinin travers ve bağlantı türüne göre değişimi-UIC 60 (Eisenmann, Mattner, 1988).....	23
Şekil 5.8 Kurbalarda yol hatası (Eisenmann, Mattner, 1988)	25
Şekil 5.9 Doğru yol kesiminde yol hatası (Eisenmann, Mattner, 1988)	25
Şekil 5.10 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49	28
Şekil 5.11 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60	29
Şekil 5.12 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49 rayı	31
Şekil 5.13 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı	32
Şekil 5.14 Ray kesitinin (A_r) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi.....	34
Şekil 5.15 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49.....	37
Şekil 5.16 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60.....	38
Şekil 5.17 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49 rayı.....	40
Şekil 5.18 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.....	41
Şekil 5.19 Ray kesitinin (A_r) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi	43
Şekil 6.1 Yol hata formları (Führer, 1979).....	45
Şekil 6.2 Yolun burkulmasına karşı koyan dirençler ve etkime şekilleri (Führer, 1979)	46
Şekil 6.3 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49.....	60
Şekil 6.4 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60.....	61
Şekil 6.5 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49 rayı	63
Şekil 6.6 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı	64
Şekil 6.7 Ray kesitinin (A_r) , YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi.....	66
Şekil 6.8 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49.....	69
Şekil 6.9 Toplam yol hatasının (f) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60.....	70
Şekil 6.10 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49 rayı.....	72
Şekil 6.11 Kurp yarıçapının (R) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.....	73
Şekil 6.12 Ray kesitinin (A_r) , YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi	75
Şekil 7.1 Tipik burkulma olayı (Esveld, 2001)	77
Şekil 7.2 Değişken yanal kayma direnci durumunda burkulma şekli (Esveld, 2001)	77
Şekil 7.3 Burkulan ray elemanı (Esveld, 2001)	79

Şekil 7.4 Değişken yanal kayma direnci durumunda burkulma diyagramı (Esveld, 2001).....	83
Şekil 7.5 Yanal kayma direncinin sabit olması durumunda burkulma eğrisi.....	84
Şekil 7.6 Başlangıç yol hatasının (f_0), YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49	89
Şekil 7.7 Başlangıç yol hatasının (f_0), YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60	90
Şekil 7.8 Ray kesitinin (A_r), YKD (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi.....	92
Şekil 7.9 Toplam yol hatasının (f), YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49	95
Şekil 7.10 Toplam yol hatasının (f), YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60.....	96
Şekil 7.11 Ray kesitinin (A_r), YKD (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi	98
Şekil 8.1 Yöntemlerin karşılaştırılması	100

Çizelge 2.1 Yanal stabilite konusunda söz sahibi etkiler ve dirençler (Erel, 2004).....	3
Çizelge 2.2 Üstyapı elemanlarının yanal stabilitede etkili özellikleri (Erel, 2004)	4
Çizelge 4.1 Çeşitli yol durumları için YKD değerleri (Erel, 2004)	14
Çizelge 5.1 Yol durumuna göre I_{ϕ} değerleri (Erel, 2004)	21
Çizelge 6.1 A, B, C ve D hata formları için c sabitleri (Führer, 1979)	46
Çizelge 6.2 A, B, C ve D hata formları için K sabitleri (Führer, 1979)	50
Çizelge 6.3 A, B, C ve D hata formları için a sabitleri (Führer, 1979).....	56

□ □ □ □ □

Bu tez çalışmasında son yıllarda demiryollarımızda meydana gelen üzücü kazalar neticesinde önemi tekrar göz önüne serilen yanal stabilite konusu ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntemler anlatılmış ve hesap yöntemleri incelenmiştir.

Konu anlatımları sırasında konunun anlaşılmasını kolaylaştırması amacıyla mümkün olduğu kadar çok açıklayıcı şekil ve tablo kullanılmıştır. Ayrıca her bir yöntemin anlatıldığı bölümün sonunda, çeşitli parametrelerle bazı varyasyonlar yapılarak grafikler oluşturulmuştur. Kullanılan şekil, tablo ve grafiklerin listesi de tez içerisinde verilmiştir.

Gerek ders aşamasında gerekse kaynak araştırması ve tezin hazırlanması aşamalarında kıymetli bilgisini benimle paylaşan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam Aydın Erel'e teşekkür ediyorum. Ayrıca bu çalışmada emeği geçen çalışkan arkadaşım Araş. Gör. Sevgi Yalçın ve değerli hocam İsmail Şahin'e de teşekkür ederim.

Ülkemizdeki demiryolları yıllar süren ihmaller ve ilgisizlik sonucu modern teknolojinin oldukça gerisinde kalmıştır. Bununla birlikte, artan yük ve yolcu ulaşım talebi karşısında demiryollarımız diğer ulaştırma sistemlerine nazaran oldukça verimsiz kalmıştır. Günümüzde demiryollarında yapılan çeşitli iyileştirme çalışmaları ise zaman zaman trajik kazalarla sonuçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında uzun kaynaklı demiryolu hatlarında yanal stabilite konusu incelenmiş ve burkulmaya neden olan parametreler irdelenmiştir. Bu bağlamda öncelikle demiryolu yapısının zorlanması anlatılmıştır. Sonra sırasıyla demiryolu üstyapısı mekanik bir sistem olarak incelenmiş ve yolda ortaya çıkan dirençler ele alınmıştır. Daha sonra, uzun kaynaklı demiryollarında yanal stabiliteyi inceleyen başlıca yöntemler sırasıyla anlatılmıştır. Her yöntem anlatımı sonunda etki parametrelerine bağlı olarak yanal stabilitenin değişiminin incelendiği grafikler verilmiştir. Çalışmanın son kısmında ise bu yöntemlerin bir karşılaştırması yapılmıştır.

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Yanal stabilite, burkulma, kritik sıcaklık artışı, kritik eksenel basınç kuvveti, yanal kayma direnci. ☐

□□□□□□□□

As a consequence of years of negligence and lack of attention, railways in our country have stayed far behind the modern technology. Therefore, the railway system has become inefficient and incompetent in meeting the increasing demand of passenger travel and goods transportation. Recently made rehabilitations on the railways have resulted in tragic accidents so far.

In this thesis, ‘lateral stability on continuous welded railways’ issue has been investigated and parameters leading to buckling have been scrutinised. In this sense, the strain of railway structure has been analysed and then, the railway superstructure has been reviewed as a mechanical system, resistances emerged on the railway structure have been analysed accordingly. The methods, which are used to analyse the lateral stability on continuous welded railways, have been analysed respectively. After analysing each method, graphics representing the variation of lateral stability related with concerned parameters are produced. In the final section of this study, a comparison of these methods is given.

□□□□□□□□□□ Lateral stability, buckling, critical temperature increase, critical axial compressive force, lateral sliding resistance

1

II. Dünya Savaşı'nın ardından, raylı sistemlerde cebire ile eklenmiş raylar yerine uzun kaynaklı raylar kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulama, rayların ek yerlerindeki dinamik etkileri, gürültüyü ve yol-taşıt bakım masraflarını azaltmasına karşın, raylardaki termal genleşme olanağını kısıtlaması nedeniyle yol çerçevesinde yanal yönde oluşan gerilmeleri artırmakta, böylece yolun yanal stabilitesini bozarak burkulmasına, dolayısıyla da kazalara neden olabilmektedir.

Kaynaklı ray uygulaması yaygınlaştıkça, işletme hızı ve dingil yükleri arttıkça burkulma probleminin önemi de artmaktadır.

Ülkemizde şehirlerarası ve şehir içi demiryollarında kaynaklı raylar kullanılmakta ise de, bu konuda yeterli bilgi ve veri birikimi bulunmadığından birtakım sorunlarla karşılaşmaktadır. Son birkaç yılda TCDD hatlarında yanal stabilite bozulmasından kaynaklanan kazalar meydana gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, raylı sistemlerde yanal stabilite konusu işlenecek ve dünyada ulaşılmış olan bilgi birikiminin ışığında üstyapının boyutlandırılması için MEIER, NEMESDY ve ESVELD yöntemleri incelenerek bazı öneriler sunulacaktır.

Kaynaklı rayların kullanıldığı üstyapılarda yanal stabiliteyi zorlayan bazı etkiler ve dirençler

ortaya çıkmaktadır. Düşey, boyuna ve yatay doğrultuda görülen bu etkiler ve dirençler Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Yanal stabilite konusunda söz sahibi etkiler ve dirençler (Erel, 2004).

□□Ğ□□□□□□	□□□İ□□□□	□İ□□□□□□□□
□□Ş□□□	-Dingil yükleri etkisinde yolun kalkması -Taşıtların oluşturdıkları titreşimler -Bakım sırasında yolun gevşemesi	-Üstyapının ve altyapının rijitliği -Üstyapının ve altyapının esnekliği
□□□□□□□	-Ray genişleme kuvvetleri -Hızlanma-yavaşlama kuvvetleri -Buden-bandaj sürtünme kuvvetleri -Doğrultu bozuklukları	-Cebire direnci -Ray-travers bağlantı direnci -Travers-balast boyuna kayma direnci
□□□□□□	-Lase kuvvetleri -Kurplardaki kılavuzlama kuvvetleri -Kurplardaki dengelenmemiş yanal kuvvetler	-Rayın eğilme rijitliği -Ray-travers bağlantı dönme direnci -Travers-balast yanal kayma direnci

Şekil 2.1’de gösterilen üstyapı elemanlarının, yanal stabilitede etkili özellikleri Çizelge 2.2’de sıralanmıştır.

Çizelge 2.2 Üstyapı elemanlarının yanal stabilitede etkili özellikleri (Erel, 2004).

ÜSTYAPI ELEMANI	YANAL STABİLİTEDE ETKİLİ ÖZELLİKLERİ
RAY	-Boyutu -Sıcaklık değişimi -Uzunluğu -Mevcut bağlantı koşulları
TRAVERS	-Tipi -Boyutu -Ağırlığı -Travers tabanının pürüzlülüğü -Mesnet levhası özellikleri
BAĞLANTI ELEMANI	-Tipi (direkt, indirekt, elastik, rijit) -Hata oranı
BALAST	-Omuz genişliği ve yüksekliği -Kalınlığı -Sıklığı -Malzeme özelliği
GENEL	-Doğrultu hataları

ÜSTYAPI ELEMANI YANAL STABİLİTEDE ETKİLİ ÖZELLİKLERİ

Burkulma olayı üç ana faktörün kombinasyonu sonucu görülmektedir. Bunlar; yüksek eksenel basınç kuvvetleri, zayıf yol koşulları ve taşıt yükleri ile titreşimleridir.

Basınç kuvvetleri; rayların montaj sıcaklığının üzerinde maruz kaldığı sıcaklık değişimleri ile frenleme, hızlanma ve kurplardaki tekerlek zorlanmaları gibi etkiler nedeniyle ortaya çıkar.

Montaj sıcaklığı, rayların ilk döşendiği andaki sıcaklık olup, rayların doğal sıcaklığıdır. Yani rayda boyuna kuvvet oluşturmeyen sıcaklıktır. Bu yüzden doğal sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar rayda eksenel basınç kuvvetleri oluşturduğu gibi; doğal sıcaklığın altındaki sıcaklıklar da rayda çekme kuvveti oluşturur.

Yolun burkulmasına yol açan zayıf yol koşulları şunlardır; yolun boyuna ve yanal yöndeki kayma direncindeki azalma, yanal doğrultu hataları ve rayların düşük sıcaklıkta döşenmesidir. Yol direnci; balastın özellikleri sayesinde sağladığı direnç ile travers ve bağlantı elemanlarının sağladığı boyuna ve enine yöndeki dirençlerdir. Eğer traverslerin altındaki veya omuzlardaki balast yetersiz ise veya bu bölgelerde boşluklar oluşmuşsa yol direnci azalır. Özellikle kurplarda balast sıklığı ve kalınlığı büyük önem taşımaktadır. Kurpların yükseltilmiş tarafında balast kalınlığının, yeterli yanal stabiliteyi sağlayabilmek için 30-45 cm civarında olması önerilmektedir. Yüzey çalışmaları, travers yenileme ve bazı altyapı çalışmalarının balast direncini, oturmuş bir yola oranla %40-%60 oranında azalttığı bilinmektedir. Bu yüzden bu gibi bakım çalışmaları yapıldığı zaman balast direncinin aşılmaması için tren hızlarına kısıtlamalar getirerek kazalara yol açabilecek tren kuvvetlerini azaltmak yaygın bir uygulamadır.

Yanal doğrultu hataları da yolun burkulma direncini azaltan önemli etkenlerden biridir. Doğrultu hatası ne kadar artarsa yolun burkulma eğilimi de o kadar artar. Doğrultu hatalarını düzeltme çalışmaları yolların kış aylarından sonra uzayıp kendilerini düzelttikleri, havaların sıcak olduğu bahar ve yaz aylarında yapılmalıdır. Burkulma olayı ayrıca kaynak uygulamaları kötü yapılmış yollarda da görülebilir.

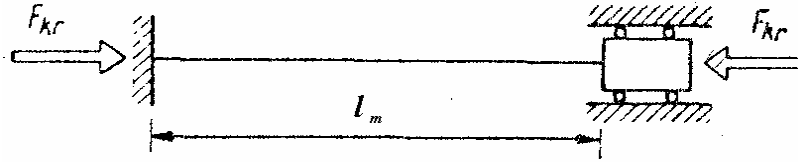
Stabil ve yüksek bir doğal ray sıcaklığı sağlamak, burkulmayı önlemede kritik bir önem arz etmektedir. Uzun kaynaklı yollarda doğal sıcaklık veya gerilmesiz sıcaklık genellikle montaj sıcaklığından farklıdır. Bu sıcaklık farkı; yolun boyuna hareketi, yol oturmaları ve bakım çalışmaları sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Yolun boyuna hareketi ise trenin hızlanma-frenleme sırasında uyguladığı kuvvetler ve farklı termal kuvvetler (güneş ve gölge gibi) sebebiyle meydana gelmektedir. Farklı dikey oturmalar yeni yapılmış ya da bakımdan geçirilmiş yollar ile zayıf altyapı koşullarının görüldüğü yollarda meydana gelmektedir.

Burkulma olayı genellikle küçük doğrultu sapmalarının olduğu yerlerde görülür. Tekerlek yükleri ve trenin dinamik etkileri (kaldırma kuvveti ve titreşimler gibi) burkulma olayını tetikleyen etkilere [1]

□□ □ □□□□□ □□ □□□□□□ □□□□□□

□□□ □ □□□□□□

Homojen kesitli elastik ve doğru bir kirişte iki yönlü gerilme için (Şekil 3.1) kritik eksenel basınç kuvveti Euler'e göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir;



Şekil 3.1 Basınç etkisi altındaki yol sistemi (Führer, 1979).

$$F_{kr} = \frac{4\pi^2 EI}{l_m^2} \quad (3.1)$$

F_{kr} (N) : Kritik eksenel basınç kuvveti

E (N/mm²) : Elastisite modülü

I (mm⁴) : Burkulma doğrultusundaki atalet momenti

l_m (mm) : Mesnetler arasındaki açıklık

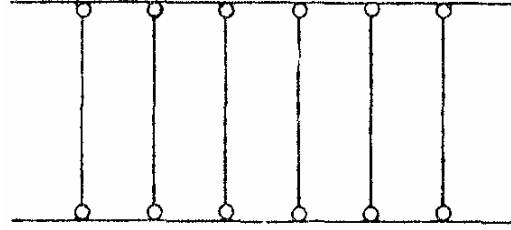
Demiryolu çerçevesi, ince kesitli ve ideal elastik bir kirişe benzer şekilde, ancak yüksek basınç kuvvetlerinde erişilebilen bir stabilite sınırına sahiptir. Bu düşünceyle yol öyle bir stabil duruma gelebilir ki; yol doğrultusundaki çok küçük bir düzensizlik ani bir burkulma için yeterli olabilir.

Gerçek demiryolundaki eğilme problemi şüphesiz homojen kesitli elastik kirişe göre daha karmaşıktır. Şöyle ki;

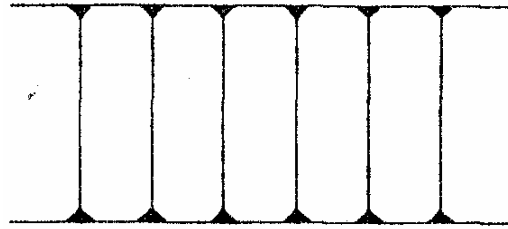
Yol çerçevesinin eğilmeye karşı direnci ray bağlantı elemanlarına, traverslere ve raylara bağlı olmakla birlikte, sabit değildir ve teorik olarak mafsallı ve rijit bağlı olmak üzere iki sınır değere sahiptir.

Mafsallı bağlantı durumunda (Şekil 3.2), yolun eğilme rijitliği $2EI_y$ 'dir. Burada I_y , ray enkesitinin (y) eksenine göre atalet momentidir.

Rijit bağlantı durumunda ise (Şekil 3.3), raylar traverslere rijit olarak bağlanmıştır. Bu durum, statik olarak belirsiz 4 uçlu bir çerçevedir. Halbuki ray bağlantısında rayla travers arasında küçük bir dönmeye müsaade eden elastik bir bağlantı mevcuttur.

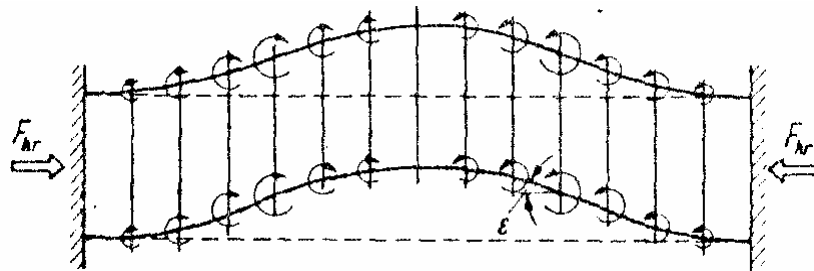


Şekil 3.2 Mafsallı bağlantı, Eğilme rijitliği: $2EI_y$ (Führer, 1979).



Şekil 3.3 Rijit bağlantı: Eğilme rijitliği $> 2EI_y$ (Führer, 1979).

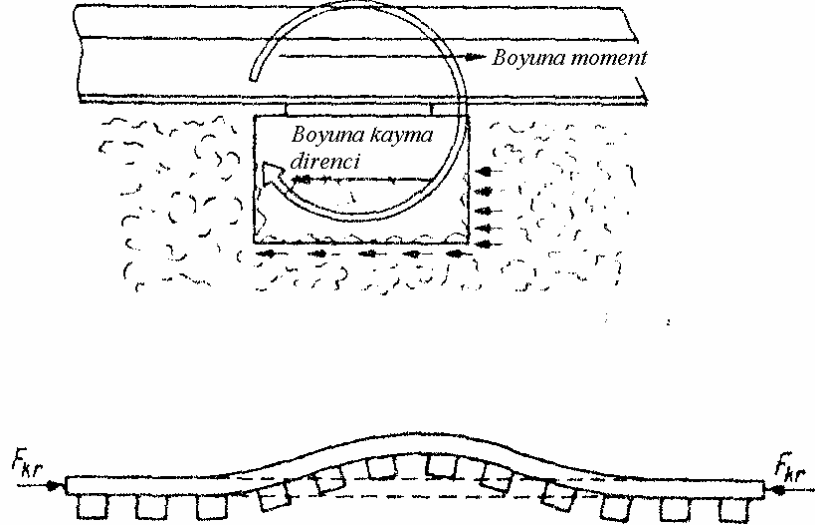
Bu durumda yolun gerçek eğilme rijitliği, mafsallı bağlantı ve rijit bağlantı sınır durumları arasında değişmektedir. Yolun eğilmesinde travers ile ray arasındaki açı sabit kalmaz (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Raylar ve traversler arasındaki dönme (Führer, 1979).

Yukarıda sözü edilen nedenlere bağlı olarak normal basınç kuvveti ile yükleme durumu ortaya çıkarsa rayda şekil değiştirme olayı gerçekleşir. Bu olay şu şekilde gerçekleşir; önce

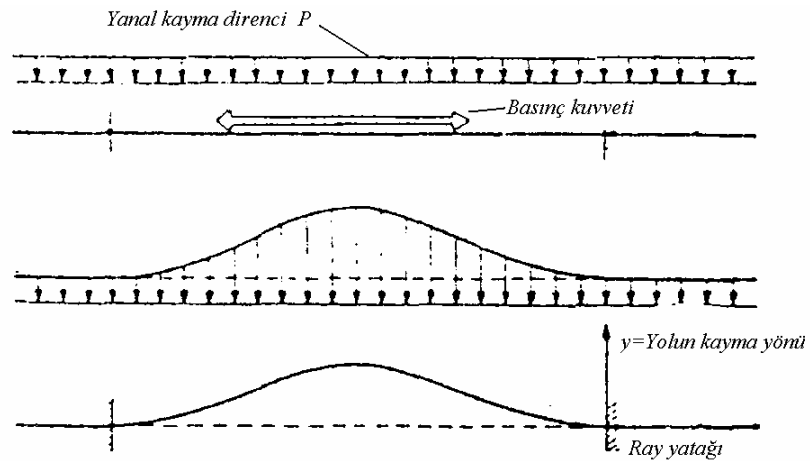
ray ile travers arasındaki eksen açıklığı nedeniyle ray bir miktar kalkar sonra burkulur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Boyuna kuvvet ile boyuna kayma direnci arasındaki kayma direnci (Führer, 1979).

Travers ile balast arasındaki sürtünmenin azalması sonucunda da yol burkulur.

Yol, balast yatağına elastik ve sürtülmeli bir şekilde oturmaktadır. Özellikle yatay düzlemlerdeki burkulmalarda balast direncinin yenilmesi gerekir (Şekil 3.6).

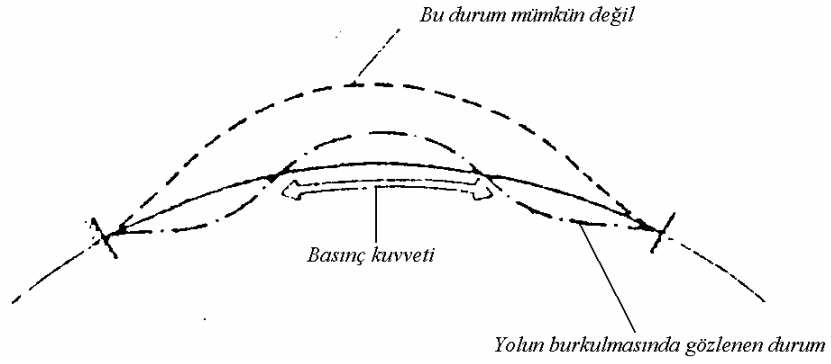


Şekil 3.6 Burkulan rayda yanal kayma direnci (Führer, 1979).

Bu nedenle yoldaki davranış ideal elastik bir çubuğun davranışından farklıdır. “P” yanal kayma direnci, yolun başlangıçtaki kayması ile artış gösterir.

İdeal elastik çubuktan bir diğer farklılık da, yol yapısının özelliğinden ötürü bir raydan diğerine hiçbir boyuna kuvvetin aktarılmasına müsaade edilmemesidir.

Kaynaklı yollar, boyuna kuvvetlerin etkisiyle yatay düzlemlerde eğilirler. Bu hiçbir zaman rayların farklı genişlemesinden meydana gelmez. Buradan hareketle, “yatay kurplarda, basınç kuvvetleri etkisindeki yolda yalnızca kurp dışına doğru kayma meydana gelir”, demek yanlış olur; çünkü bunun olabilmesi için raylarda farklı genişleme durumu ortaya çıkmalıdır. Şekil 3.7’de bu durum görülmektedir (Ovacıklıoğlu, 1991).

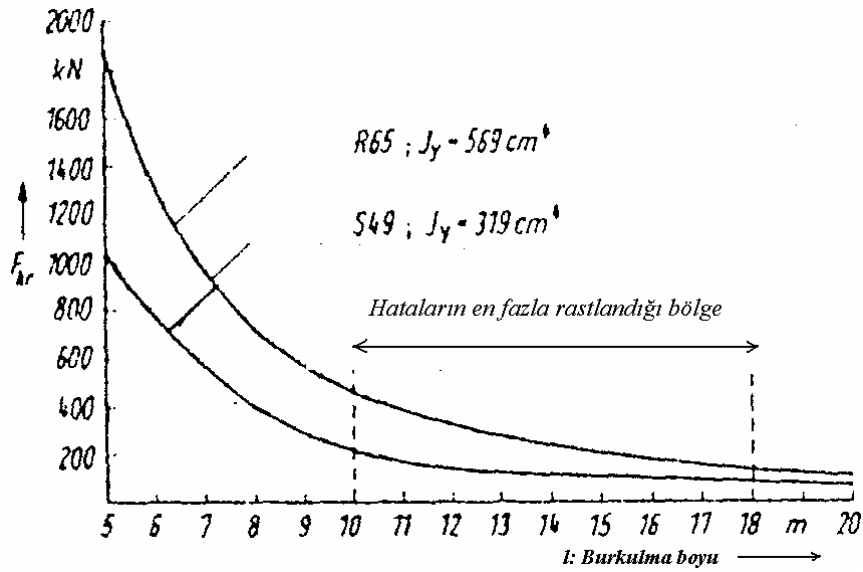


Şekil 3.7 Kurptaki ray burkulması (Führer, 1979).

□ □ □ □ **i** □ □ □ □ **i** □ □

□ □ **1** □ **ğ** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

3.1 eşitliğine göre, tek bir ray basınç çubuğu olarak alındığından, bu çubuğun eğilme direnci EI_y veya EI_x olur. Şekil 4.1’de, R65 ve S49 raylarının burkulma direnci grafiği görülmektedir.

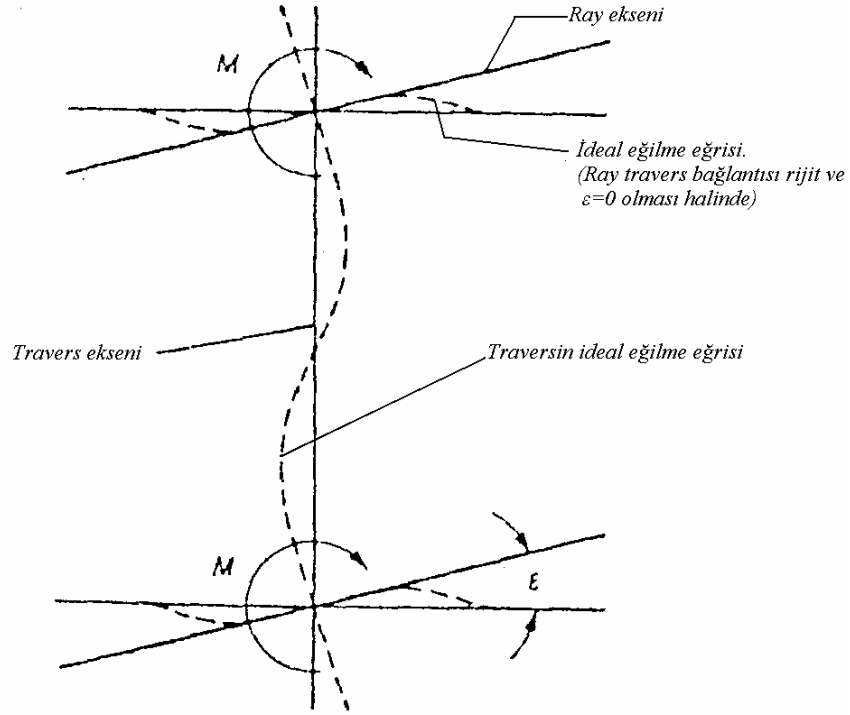


Şekil 4.1 Burkulma direnci (Führer, 1979).

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **§** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

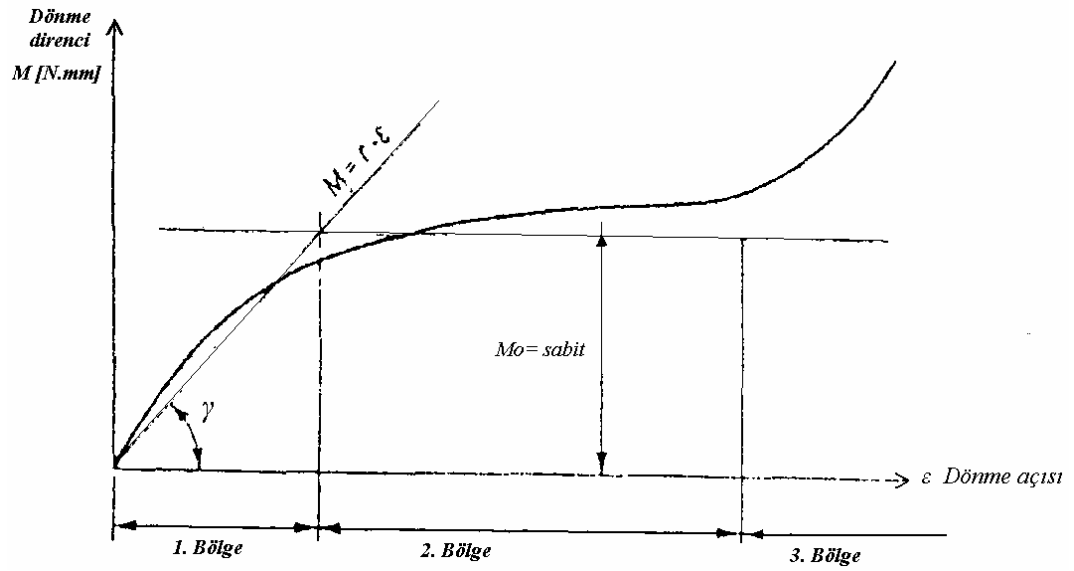
Şekil 3.4’te görüldüğü gibi, yolda oluşacak bir kayma, ray ve travers eksenleri arasında bir dönme meydana getirecektir. Bu olay, bağlantı elemanlarının sağladığı dönme direncinin yenilmesiyle mümkün olabilir. Bağlantı elemanlarının dönme mukavemetleri, rayın eğilme mukavemeti ile birlikte yol çerçevesinin rijitliğini oluşturur.

Dönme direnci değeri deney yoluyla saptanabilir. Bunun için ray traverse sıkı bir şekilde bağlanır. Sonra ray parçası yüklenir ve traverse göre dönme açısı hesaplanır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Ray ile travers arasındaki dönme (Führer, 1979).

Bu şekilden elde edilen eğri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Bağlantı dönme direnci (Führer, 1979).

Şekil 4.3'te;

M : Bağlantı dönme direnci, (N.mm)

M_0 : Dönme direncinin sabit kabul edilen değeri, (N.mm)

r : Dönme direncinin değişken olduğu bölgenin eğimi

γ : Dönme direncinin değişken olduğu bölgenin açısı

ε : Traversin dönme açısı

Küçük dönme açıları (1. Bölge) M bağlantı dönme direnci, dönme açısı ile birlikte lineer (doğrusal) olarak artar. Bu durumda dönme direnci,

$$M = r\varepsilon \quad (4.1)$$

ε 'un büyük değerlerinde dönme direnci, yeterli bir yaklaşımla $M = M_0$ kabul edilebilir.

Dönme açısının 2. bölgenin ötesinde artması durumunda, ray tabanı selalara takılır ve dönme direnci şiddetli bir şekilde artış gösterir (3. bölge).

$M = f(\varepsilon)$ fonksiyonu aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Üstyapı türü,
- Üstyapı elemanlarının ölçülerini koruyabilirliği,
- Bağlantı elemanlarının etkinliği,
- Yolun bakım durumu.

Rayın selaya göre dönme olanağı, 3. bölgeye geçinceye kadar iki tipik durum gösterir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Rayın sela üzerinde dönme açısı (Führer, 1979).

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

Yanal kayma direnci (YKD), yolun stabilitesinde en önemli faktördür. Yolun toplam direnci içindeki yerine göz atacak olursak;

Travers-Balast yanal kayma direnci : % 55 – 70

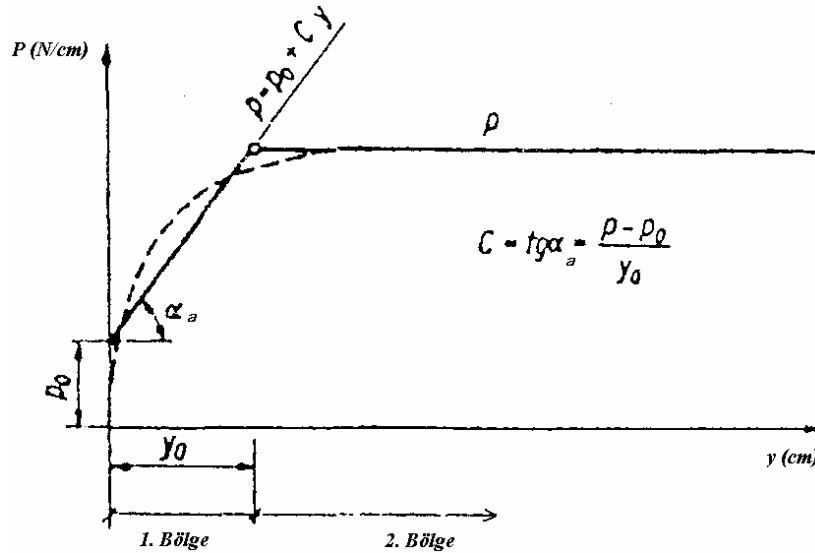
Bağlantı elemanlarının dönme direnci : % 15 – 30

Rayların eğilme rijitliği : % 12 – 15

Yanal kayma direnci değerinde etkili olan faktörler şunlardır:

- Travers türü, ağırlığı, boyutları ve aralığı,
- Balast malzemesinin granülometrisi,
- Travers aralarındaki ve omuzlardaki balast miktarı,
- Balastın sıkılığı.

Şekil 4.5'te yanal kayma direncinin, (y) kayma miktarı ile değişimi görülmektedir. Kaymanın başlayabilmesi için traverslerin omuz ve yanal yüzeyleri ile tabandaki sürtünmenin yenilmesi gerekir.



Şekil 4.5 Yanal kayma direncinin kayma miktarı ile değişimi (Führer, 1979).

Şekil 4.5'te;

P (N/mm) : Yanal kayma direnci

P_0 (N/mm) : Başlangıçtaki yanal kayma direnci

C : Değişken YKD bölgesinin eğimi

y (mm) : Yanal yer değiştirme

y_0 (mm) : YKD'nin değişken olduğu bölge

α_a : YKD'nin değişken olduğu bölgenin açısı

Eğri, 10 mm civarında bir kayma oluşuncaya kadar dik olarak yükselir, daha sonra hemen hemen sabit devam eder. Bunun anlamı traversin yatak üzerinde kaymaya başlamasıdır. “ y_0 ” bölgesinin yaklaşık tamamı trafik yükleri etkisiyle yolun yanal kayması sırasında kat edilir. Bu nedenle burkulma güvenliği hesabında (P) sabit alınabilir. Bir yoldaki mümkün koşullar için Çizelge 4.1'deki YKD değerleri geçerlidir. (Führer, 1979).

Çizelge 4.1 Çeşitli yol durumları için YKD değerleri (Erel, 2004).

Yol Durumu		Travers başına YKD (N)	Yol uzunluğu başına YKD (N/mm)
Serbest döşenmiş, balast takviyesi yapılmamış yol		750	1,15
Gevşek, balast takviyesi yapılmış yol		1.800	2,77
Buraj ve doğrultma yapılmış yol	Ahşap travers	2.300	3,54
	Betonarme travers	4.500	6,92
İyi doldurulmuş ve sıkıştırılmış yol		10.000'e kadar	15,5'e kadar

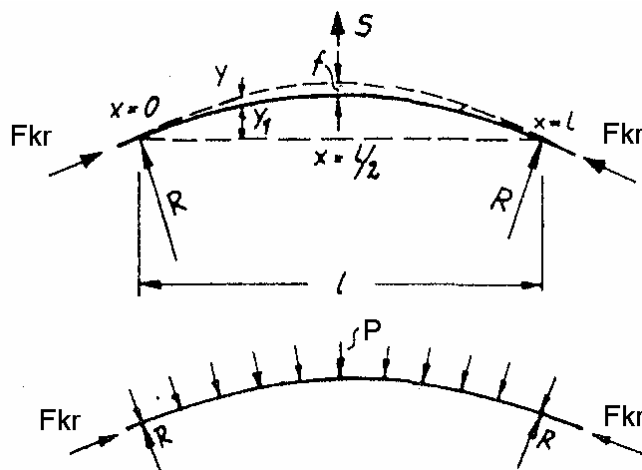
Kritik eksenel basınç kuvveti (F_{kr}), yol hatası (f) ve hatalı yol uzunluğunu (l) hesaplamak için genellikle enerji yöntemleri kullanılır (Şekil 5.1).

$$W_T : \text{Yapılan toplam iş (N.mm)}$$

W_e : Eğilme momentinin yaptığı iş ($N.mm$)

W_k : Yolun kayma direncini yenmek için yapılan iş (N.mm)

W_b : Basınç kuvvetinin yaptığı iş (N.mm)



Şekil 5.1 Kritik burkulma durumu (Eisenmann, Mattner, 1988).

Eğrilik denklemi : $y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right)$ (5.2)

Burkulma momenti : $M_{(x)} = F_{kr} y$ (5.3)

Demiryolu yapısının yatay doğrultuda burkulması sırasında yapılan işler aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Eğilme momentinin yaptığı iş (W_e):

$$W_e = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{EI} dx \Rightarrow W_e = \frac{1}{2EI} \int_0^l \left[\frac{4\pi EI}{l^2} \frac{f}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right) \right]^2 dx \quad (5.4)$$

$$W_e = 8\pi^2 f^2 EI \int_0^l \frac{1}{4l^4} + \frac{\cos^2 \left(\frac{2\pi x}{l} \right)}{4l^4} - \frac{2f^2 \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right)}{4l^4} dx \quad (5.5)$$

$$\cos^2 x = \frac{1}{2} (1 + \cos 2x) \quad (5.6)$$

$$W_e = 8\pi^2 f^2 EI \int_0^l \frac{1}{4l^4} + \frac{\left(1 + \cos \left(\frac{4\pi x}{l} \right) \right)}{8l^4} dx - 0 \quad (5.7)$$

$$W_e = 8\pi^2 f^2 EI \int_0^l \frac{1}{4l^4} + \frac{1}{8l^4} dx \quad (5.8)$$

$$W_e = \frac{\pi^4 f^2 EI}{l^3} \Leftrightarrow \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \frac{\pi^2 f^2}{4l} = \frac{K\pi^2 f^2}{4l} \quad (5.9)$$

$$K = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad (5.10)$$

Yolun kayma direncini yenmek için yapılan iş (W_k):

$$W_k = P \int_0^l y dx \quad (5.11)$$

$$y = \frac{f}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right) \right) \quad (5.12)$$

$$W_k = P \int_0^l \frac{f}{2} - \frac{f}{2} \cos \left(\frac{2\pi x}{l} \right) dx \quad (5.13)$$

$$W_k = P \left(\frac{fl}{2} - 0 \right) \Rightarrow W_k = \frac{Pfl}{2} \quad (5.14)$$

Basınç kuvvetinin yaptığı iş (W_b):

$$W_b = - \left[F_k \lambda + \frac{F_k}{R} \frac{fl}{2} \right] \Leftrightarrow -F_k \left[\frac{\pi^2 f^2}{4l} + \frac{fl}{2R} \right] \quad (5.15)$$

$$\lambda = \frac{\pi^2 f^2}{4l} \quad (5.16)$$

Eşitliklerdeki sembollerin açıklamaları ve birimleri aşağıda verilmiştir;

P (N/mm) : Yanal kayma direnci

λ (mm) : Eğilme eğrisinin kurba yayına (raya) göre uzaması

l (mm) : Hatalı yol uzunluğu

I_φ (mm⁴) : Yol çerçevesinin yanal yöndeki atalet momenti

F_{kr} (N) : Kritik eksenel basınç kuvveti

R (mm) : Kurp yarıçapı

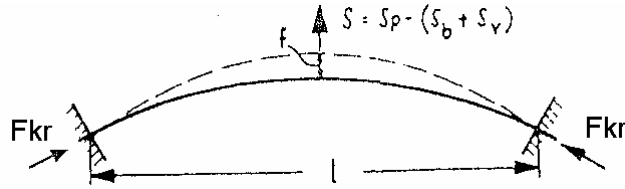
f (mm) : Yol hatası

Yapılan toplam iş (W_T):

$$W_T = \sum W_i = W_e + W_k + W_b \quad (5.17)$$

$$W_T = \frac{fl}{2} \left(P - \frac{F_{kr}}{R} \right) + \frac{f^2 \pi}{4l} (K - F_{kr}) \quad (5.18)$$

Bu aşamada yolda normal duruma göre $x = l/2$ noktasında (f) kadar bir burkulma oluşturacak (S) yanal kuvveti hesaplanacaktır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Yapılan toplam iş (Eisenmann, Mattner, 1988).

$$W_i = \int_0^f S_i df \Rightarrow S_i \text{ 'yi çekersek} \quad (5.19)$$

$$S_i = \frac{dW_i}{df} \quad (5.20)$$

$$S = \sum S_i = \sum \frac{W_i}{df} = \frac{dW}{df} = \frac{l}{2} \left(P - \frac{F_{kr}}{R} \right) + \frac{\pi^2 f}{2l} (K - F_{kr}) \quad (5.21)$$

S (N) : Burkulma oluşturacak toplam yanal kuvvet

Aynı şekilde;

$$\frac{dW}{dl} = \frac{f}{l} \left(P - \frac{F_{kr}}{R} \right) - \frac{f^2 \pi^4}{l^4} KEI + \frac{f^2 \pi^2}{4l^2} F_{kr} \quad (5.22)$$

Kritik durum, (S) yanal kuvvetinin maksimum olduğu, bu arada (f) değerinin de minimum olduğu durumdur.

Bunun için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

$$1) S = \frac{l}{2} \left(P - \frac{F_{kr}}{R} \right) + \frac{\pi^2 f}{2l} (K - F_{kr}) = 0 \text{ ve} \quad (5.23)$$

$$2) \frac{df}{dl} = \frac{dW}{dl} = 0 \text{ yani; } \frac{df}{dl} = \frac{dW}{dl} \cdot \frac{df}{dW} = \frac{dW}{dl} \cdot \frac{1}{S} \quad (5.24)$$

Bu şekilde kritik hatalı yol uzunluğu (l) ile kritik yol hatası (f^*); kritik eksenel basınç kuvveti (F_{kr}) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) bağlı olarak bulunur.

$$l = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_{\varphi}}{F_{kr}}} \quad (mm) \quad (5.25)$$

$$f^* = \left(P - \frac{F_{kr}}{R} \right) \frac{16EI_{\varphi}}{F_{kr}^2} \quad (mm) \quad (5.26)$$

$$F_{kr} = \alpha \cdot \Delta T_{kr} \cdot E \cdot A_r \quad (N) \quad (5.27)$$

$F_{kr} \text{ (N)}$: Kritik eksenel basınç kuvveti

$\alpha \text{ (} 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}C \text{)}$: Ray çeliğinin genleşme katsayısı

$E \text{ (} 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{)}$: Ray çeliğinin elastisite modülü

$A_r \text{ (mm}^2 \text{)}$: İki rayın kesit alanı

$\Delta T_{kr} \text{ (} ^{\circ}C \text{)}$: Kritik sıcaklık artışı

Yapılan araştırmalar sonucunda kritik yol hatasının (f^*), gerçekte mevcut olan yol hatasından (f_0) beş metre uzunluğundaki yolda 5-9 mm daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır.

Bu yüzden (f^*) yerine $f = f_0 + 7mm$ konulması önerilmektedir.

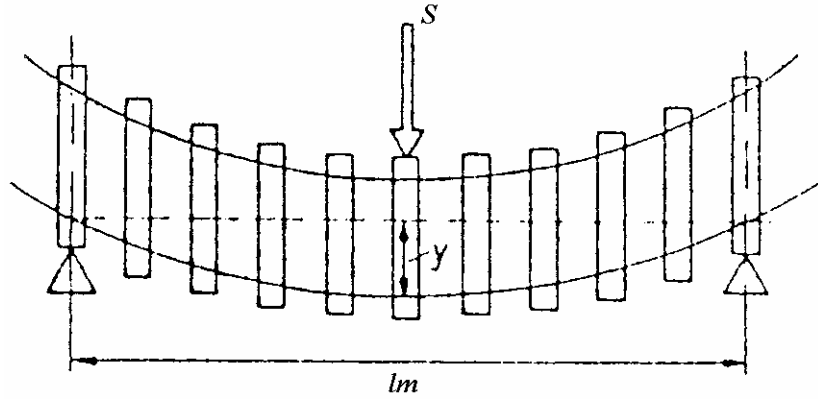
$$\Delta T_{kr} = -\frac{8I_{\varphi}}{\alpha A_r R f} + \sqrt{\left(\frac{8I_{\varphi}}{\alpha A_r R f} \right)^2 + \frac{16I_{\varphi} P}{\alpha^2 A_r^2 E f}} \quad (^{\circ}C) \quad (5.28)$$

Raydaki hesaplanan sıcaklık farkı ΔT , ΔT_{kr} 'den küçük olduğu sürece yolda burkulma meydana gelmez. Yüksek hızlarda ΔT_{kr} , ΔT 'den 40-50 °C büyük olduğu sürece yeterli bir güvenlik sağlanmış olur. Düşük hızların uygulandığı küçük yarıçaplı kurplarda bu aralık daraltılmalıdır.

Teori ve deneyler göstermiştir ki, yolun yanal stabilitesi büyük ölçüde YKD'ne bağlıdır. Bunun yanı sıra çerçevenin eşdeğer atalet momenti (I_ϕ) de yanal stabilite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

$$I_\phi = \frac{S l_m^3}{48 E y}$$

Yol çerçevesin atalet momenti deney yolu ile bulunabilir. Bunun için yol çerçevesi Şekil 5.3'teki gibi eğilmeye zorlanan iki mesnetli bir kiriş olarak ele alınır.



Şekil 5.3 Yol çerçevesinin atalet momentinin tayini (Führer, 1979).

Buradan elde edilen I_ϕ değeri üstyapı şekline ve özelliklerine, rayların traverslere bağlantı şekillerine bağlı olarak değişir. Bağlantının gevşek olması durumunda $I_\phi = 2I_y$ olur.

Ayrıca S , y ve E 'nin bilinmesi durumunda;

$$I_\phi = \frac{S l_m^3}{48 E y} \quad (mm^4) \quad (5.29)$$

formülü de I_ϕ 'yi hesaplamak için kullanılabilir.

S (N) : Burkulma oluşturacak toplam yanal kuvvet

l_m (mm) : Mesnetler arasındaki açıklık

E (N / mm²) : Ray eliğinin elastisite modülü

y (mm) : Yanal yer değiştirme

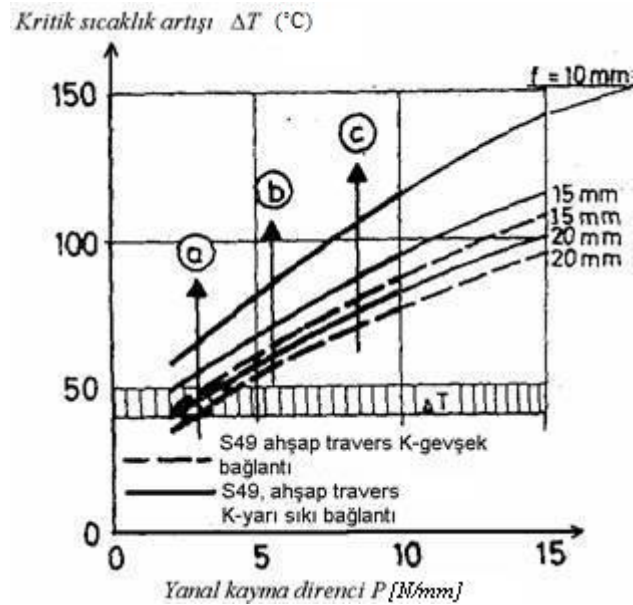
Meier'in hazırladığı aşağıdaki izelge 5.1'de $I_$ 'nin yol durumuna göre değişimi görülmektedir. Hesap aşamasında bu tabloda verilmeyen S 49 rayı, beton travers için $I_$ değeri orantı yapılarak 8680.10^4 mm^4 alınmıştır.

Çizelge 5.1 Yol durumuna göre $I_$ değerleri (Erel, 2004).

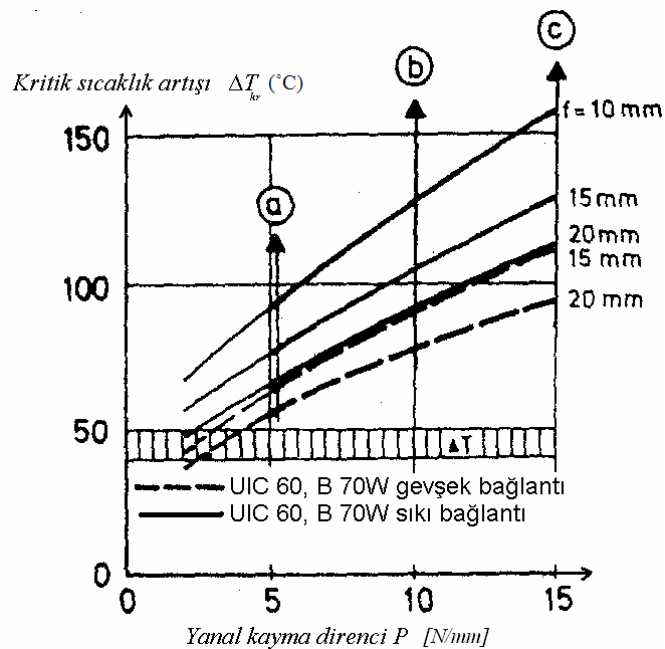
$I_(mm^4)$	RAY		S 49	UIC 60	
	GERİLME	GEVŞEK	638.10 ⁴	1026.10 ⁴	
		SIKI	1100.10 ⁴		1400.10 ⁴
	TRAVERS-BAğLANTI		AHŞAP TRAVERS - K		BETON 70 W

A schematic diagram of a beam supported by nine vertical columns. A downward force P is applied to the center of the beam. The vertical displacement of the central column is labeled y .

Bakım yapıldıktan sonra bir yolda ancak 200.000 ton yük geçtikten sonra yeterli kayma direncine ulaşılır. Bakım yapıldıktan sonra yol, stabilizasyon aracıyla sıkıştırılırsa istenilen dirence daha çabuk ulaşılabilir. (Eisenmann, Mattner, 1988).



Şekil 5.6 Yanal kayma direncinin travers ve bağlantı türüne göre değişimi-S 49 rayı (Eisenmann, Mattner, 1988).



Şekil 5.7 Yanal kayma direncinin travers ve bağlantı türüne göre değişimi-UIC 60 rayı (Eisenmann, Mattner, 1988).

a : Yol bakımından sonra dinamik değer

b : Yol bakımından önce dinamik değer

c : Yol bakımından önce statik değer

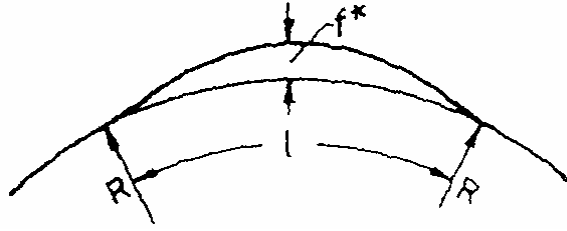
Şekil 5.6’da S 49 rayı için yol hatası değerinin, yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik sıcaklık artış değeri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bağlantı elemanlarının sıklığı da kritik sıcaklık artış değerini etkilemektedir.

Aynı şekilde Şekil 5.7’de de UIC 60 rayı için yol hatası değerinin yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik sıcaklık artış değeri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Fakat bu grafikte UIC 60 rayının daha kararlı olduğu görülmektedir. UIC 60 rayının kritik sıcaklık artış değerleri daha büyüktür. Bağlantı elemanlarının sıklığı aynı şekilde kritik sıcaklık artış değerini etkilemektedir.

Bunlara ek olarak, yolda bakım çalışması yapılması durumunda YKD değerinde düşüş meydana gelmektedir.

Yolların makas kısımları, küçük yarıçaplı kurplar gibi burkulma açısından kritik kesimlerinde balast omuz genişliği 40 cm’den 50 cm’ye çıkarılarak ve kaymaya karşı takozlar kullanılarak kayma direnci artırılabilir.

Kurplu yolda ($R \leq 700$ m) yanal stabilitenin incelenmesi (Şekil 5.8);



Şekil 5.8 Kurbalarda yol hatası (Eisenmann, Mattner, 1988).

Kritik yol hatası;

$$f^* = (P - \frac{F_{kr}}{R}) \frac{16EI_{\varphi}}{F_{kr}^2} \quad (mm) \quad (5.30)$$

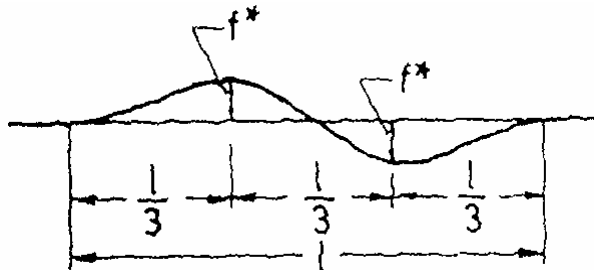
Kritik burkulma boyu;

$$l_{kr} = 2\pi \sqrt{\frac{2EI_\varphi}{F_{kr}}} = 2\pi \sqrt{\frac{2I_\varphi}{\alpha \Delta T A_r}} \quad (mm) \quad (5.31)$$

Kritik sıcaklık artışı;

$$\Delta T_{kr} = -\frac{8I_{\zeta}}{\alpha A_r Rf} + \sqrt{\left[\frac{8I_{\zeta}}{\alpha A_r Rf}\right]^2 + \frac{16I_{\zeta}P}{\alpha^2 A_r^2 Ef}} \quad (^{\circ}C) \quad (5.32)$$

Yolun doğru kesimlerinde ($R > 700$ m) yanal stabilitenin incelenmesi (Şekil 5.9);



Şekil 5.9 Doğru yol kesiminde yol hatası (Eisenmann, Mattner, 1988).

Kritik yol hatası;

$$f^* = 8,7P \frac{EI_{\varphi}}{F_{kr}^2} \quad (mm) \quad (5.33)$$

Kritik burkulma boyu;

$$l_{kr} = 3\pi \sqrt{\frac{2EI_{\varphi}}{F_{kr}}} = 3\pi \sqrt{\frac{2I_{\varphi}}{\alpha \Delta T A_r}} = 0,174 \sqrt{\frac{I_{\varphi} f}{P}} 10^3 \quad (mm) \quad (5.34)$$

Kritik sıcaklık artışı;

$$\Delta T_{kr} = \sqrt{\frac{8,7I_{\varphi} P}{\alpha^2 A_r^2 E f}} = 536,4 \sqrt{\frac{I_{\varphi} P}{A_r^2 f}} \quad (^\circ C) \quad (5.35)$$

Kritik eksenel basınç kuvveti;

$$F_{kr} = EA_r \alpha \Delta T_{kr} \quad (5.36)$$

F_{kr} (N) : Kritik eksenel basınç kuvveti

E (N/mm²) : Ray çeliğinin elastisite modülü

α (1/°C) : Ray çeliğinin genleşme katsayısı

A_r (mm²) : İki rayın kesit alanı

I_{φ} (mm⁴) : Yol çerçevesinin yanal yöndeki atalet momenti

R (mm) : Kurp yarıçapı

P (N/mm) : Yanal kayma direnci

f (mm) : Toplam yol hatası; $f_0 + 7 \text{ mm}$

f^* (mm) : Kritik yol hatası

ΔT_{kr} (°C) : Kritik sıcaklık artışı

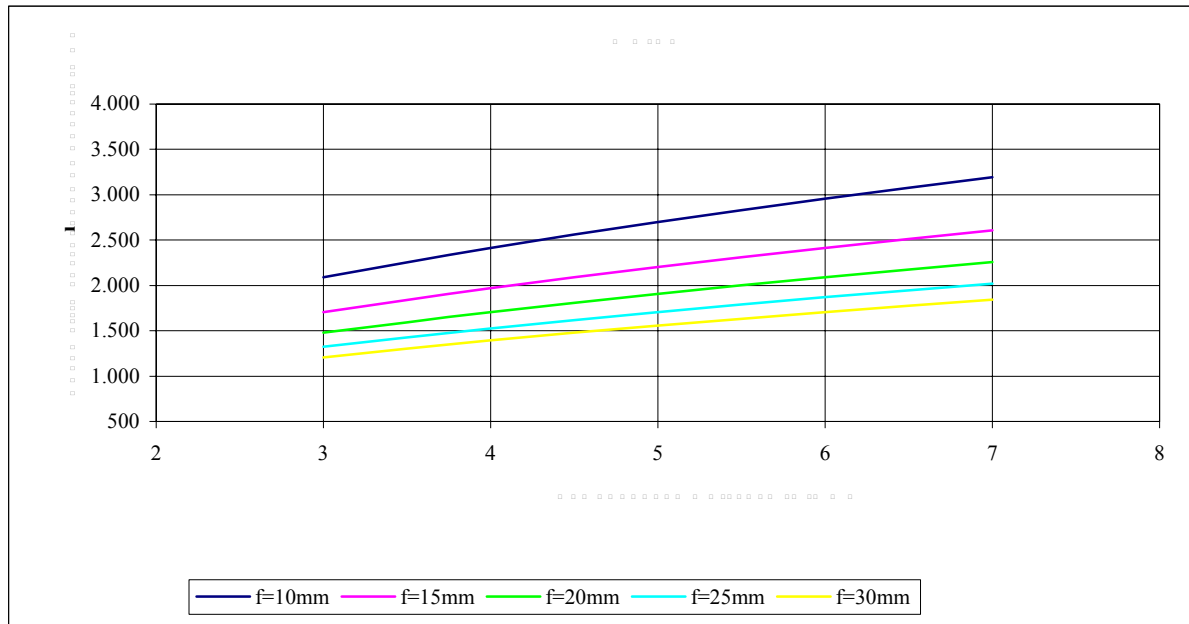
l_{kr} (mm) : Kritik burkulma boyu

Ş İ (F_{kr})

Meier hesap yöntemine göre; *kritik eksenel basınç kuvveti* (F_{kr}) ve *yanal kayma direnci* (P) değerlerinin *yol hatası* (f), *kurp yarıçapı* (R) ve *ray kesitine* (ray tipi: A_r) bağlı olarak değişimleri Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'teki grafiklerle gösterilmiştir.

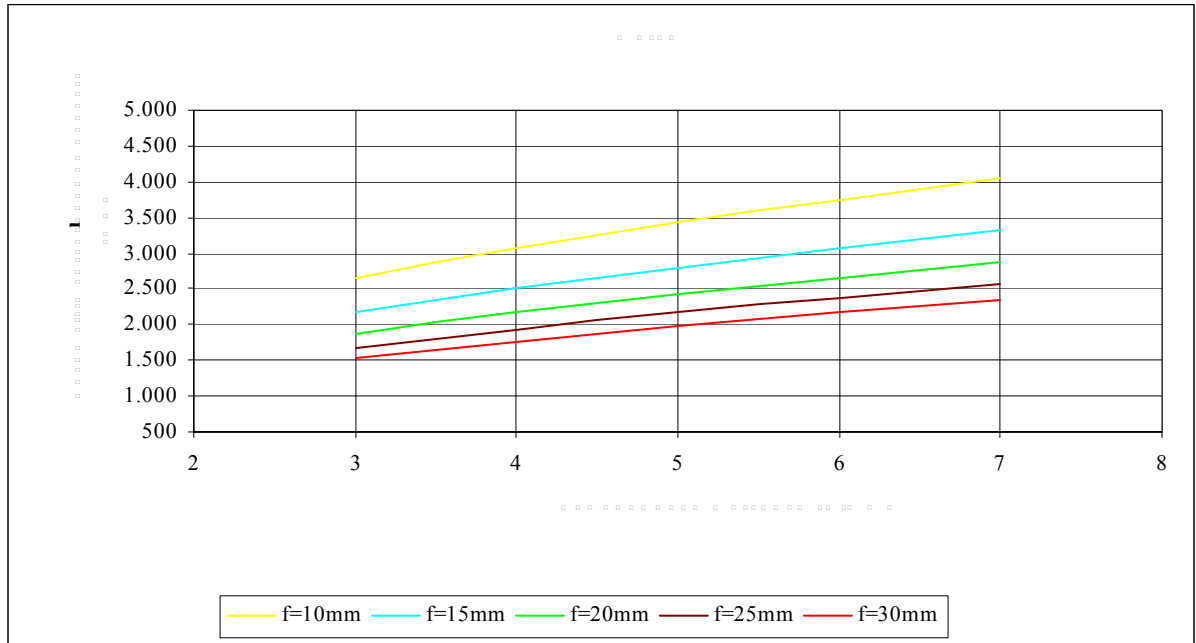
11f

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Toplam yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.10 Toplam yol hatasının (f), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Toplam yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.11 Toplam yol hatasının (f), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de görüldüğü gibi toplam yol hatası (f) büyüdükçe, kritik eksenel basınç kuvveti (F_{kr}) küçülmektedir. Yani açıkça anlaşılabileceği üzere; yol hatasının büyüklüğünün yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik eksenel basınç kuvveti üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Bu gibi büyük yol hatası olan demiryolu kesimlerinde

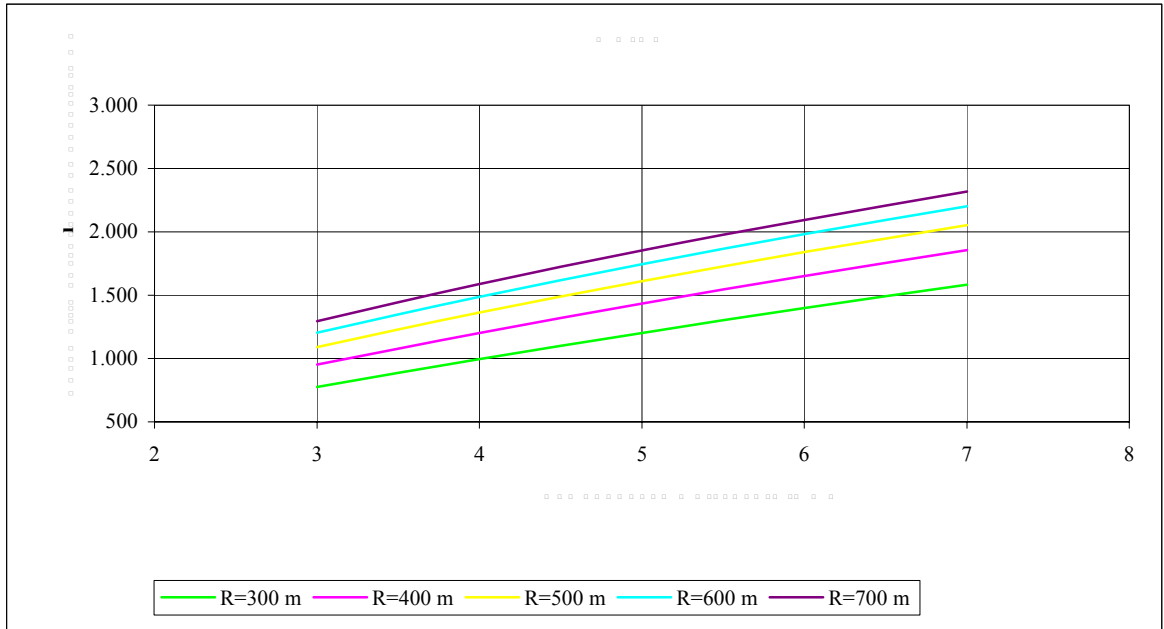
özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında rayların ısınması sonucu eksenel basınç kuvvetinin de artması ve raydaki gerilimi yükseltmesi ile, taşıt titreşimlerinin tetikleyici etkisi birleşince demiryollarında burkulmaların meydana gelmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

Bununla birlikte UIC 60 rayının, az da olsa, S 49 rayına olan üstünlüğü Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 karşılaştırıldığında görülebilmektedir. UIC 60 rayının grafiğinde eğriler daha yukarıda oluşmuştur. Yani UIC 60 rayının kritik eksenel basınç kuvveti değerleri (F_{kr}) daha büyüktür.

Buradaki hesaplamalarda bağlantı elemanlarının yol çerçevesinin toplam direncine etkisi Meier'in öngördüğü gibi rayın atalet momenti değerinin artırılması yoluyla dikkate alınmıştır (Bakınız Çizelge 5.1). Ayrıca demiryolunda betonarme travers kullanıldığı varsayılarak Çizelge 5.1'den ilgili değerler alınmıştır.

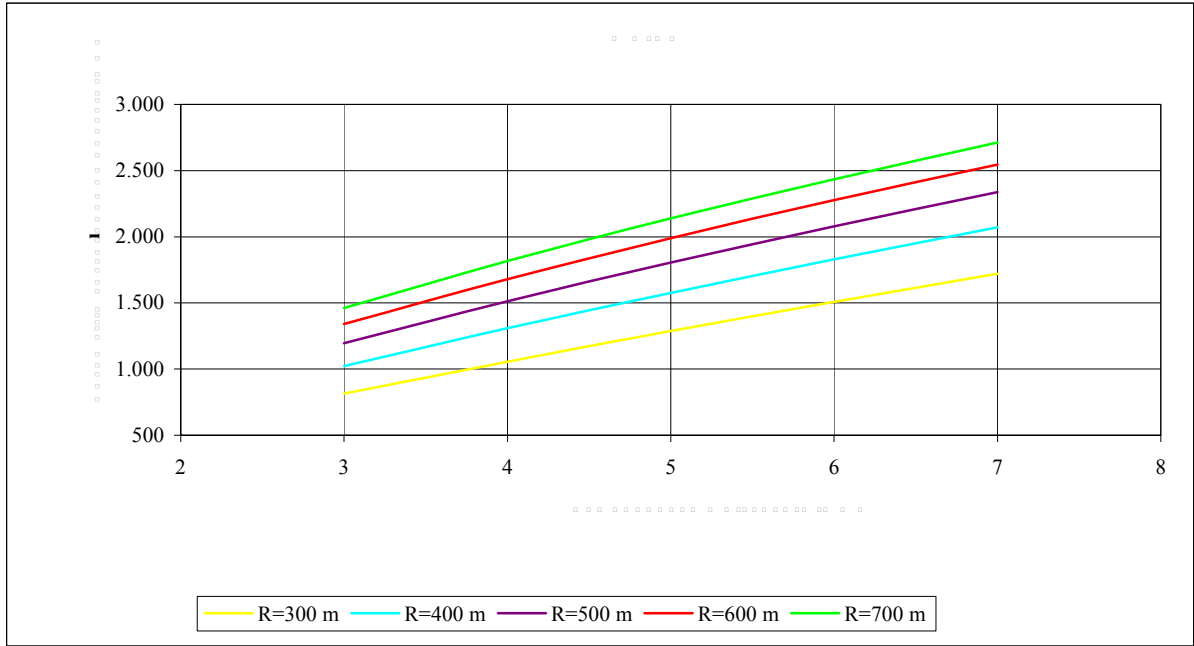
□ □ □ □ □ □ □ □ **I** □ □ □ □ **I** □ □ **R** □ □ □ □ □ □ □ □

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.12 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.13 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

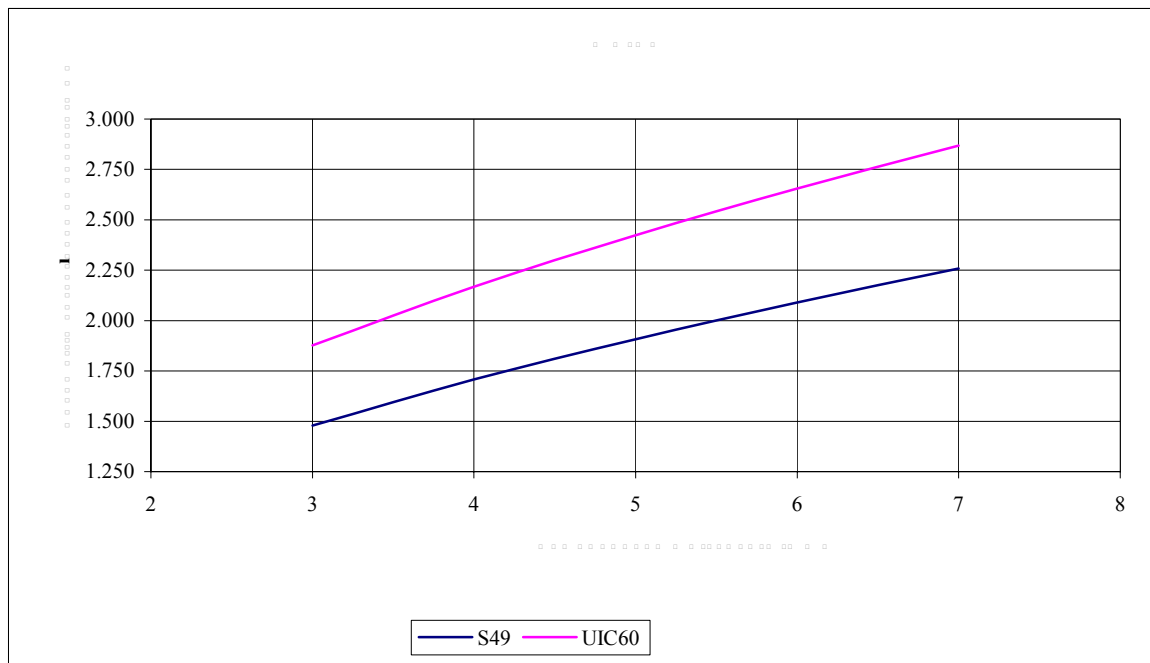
Burkulma güvenliği nedeniyle uzun kaynaklı yollardaki kurp uygulamaları özel bir önem arz etmektedir. Çünkü kurp yarıçapı küçüldükçe yolun güvenli bir şekilde karşılayabileceği F_{kr} (kritik eksenel basınç kuvveti) azalır. Kurp yarıçapı küçüldükçe demiryolu araçlarının sınırlı bir dönme kabiliyeti olan rijit dingil ve tekerleklerle sahip olması nedeniyle bir başka sınırlama

ortaya çıkmaktadır. Bu arada F_{kr} değerinin azalması ΔT_{kr} (kritik sıcaklık artışı) değerinin de azalması anlamına gelmektedir. Yani yolun güvenli karşılayabileceği F_{kr} (kritik eksenel basınç kuvveti) azaldıkça yol, sıcaklık artışlarına daha hassas hale gelecektir. Bu da yolun daha küçük bir eksenel basınç kuvveti (F_{kr}) sonucu burkulabileceği anlamına gelmektedir (Şekil 5.12 ve Şekil 5.13).

Buradaki hesaplamalarda bağlantı elemanlarının yol çerçevesinin toplam direncine etkisi Meier'in öngördüğü gibi rayın atalet momenti değerinin artırılması yolu ile dikkate alınmıştır (Bakınız Çizelge 5.1). Ayrıca demiryolunda betonarme travers kullanıldığı varsayılarak Çizelge 5.1'den ilgili değerler alınmıştır.

$$A_i$$

Ray tipi	: S 49 - UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2 - 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ - $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.14 Ray kesitinin (A_r), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi.

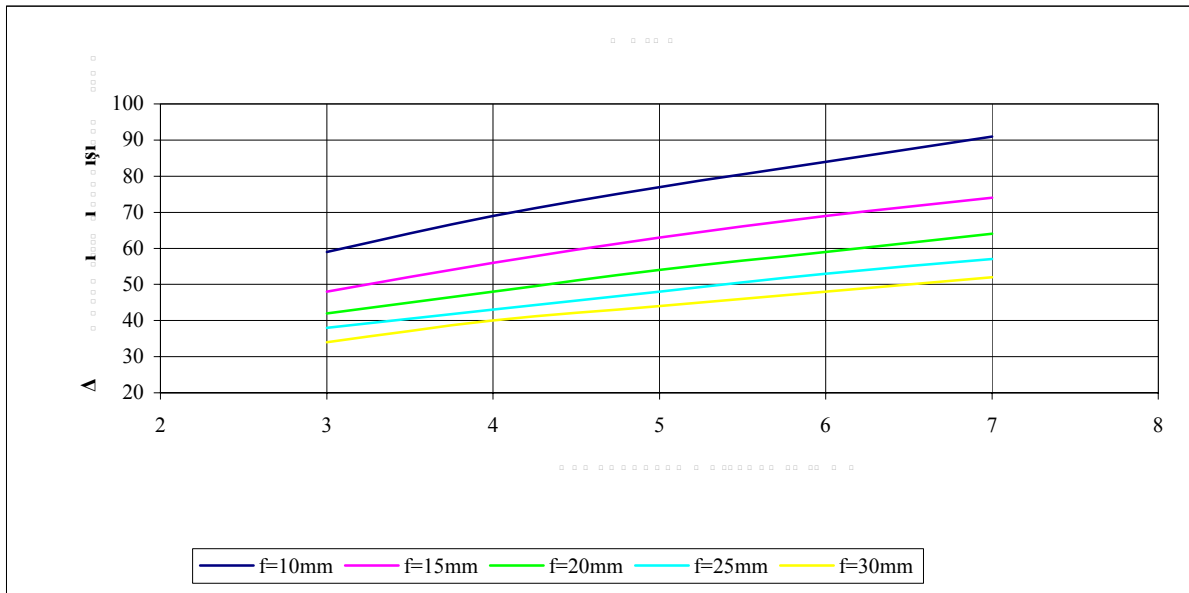
Şekil 5.14'te UIC 60 rayının S 49 rayına göre, yolun yanal stabilitesi açısından daha üstün

olduğu gör÷lmektedir. Rayın kesitinin büyümesi, yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik eksenel basınç kuvveti değerini artırmaktadır. Ayrıca UIC 60 ray kesiti, eksenel basınç kuvveti açısından daha büyük bir değer aralığı sağlamaktadır. Yani UIC 60 rayı daha büyük eksenel kuvvetlere burkulmadan mukavemet edebilmektedir.

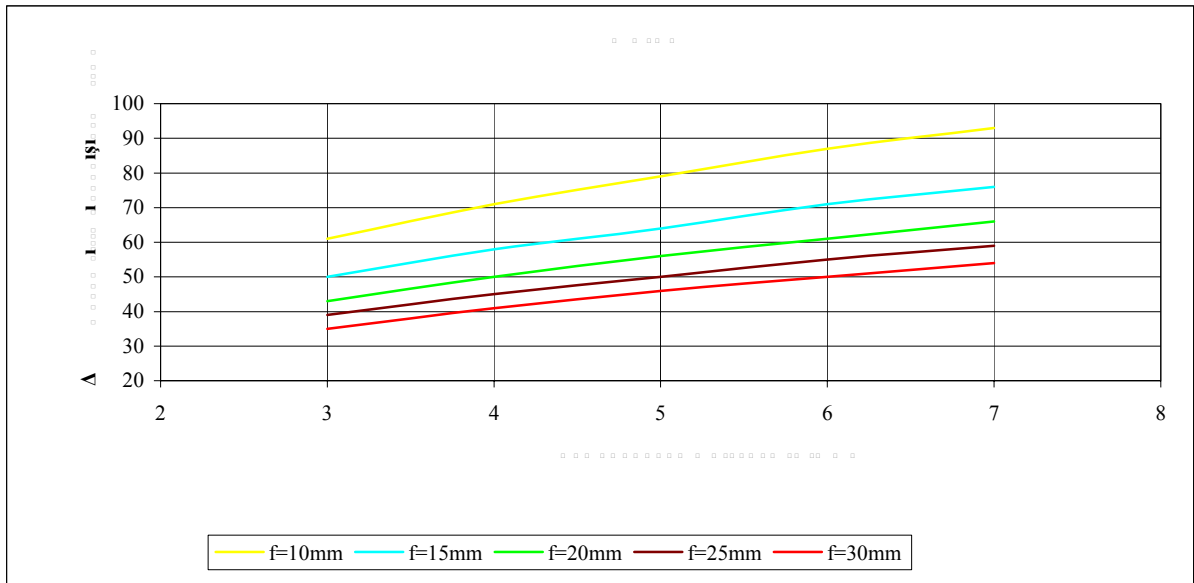
§ 5.15. İhtiyaç (ΔT_{kr})

Meier hesap yöntemine göre; *kritik sıcaklık artışı* (ΔT_{kr}) ve *yanal kayma direnci* (P) değerlerinin *yol hatası* (f), *kurp yarıçapı* (R) ve *ray kesatine* (ray tipi: A_r) bağlı olarak değişimleri Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'daki grafiklerle gösterilmiştir.

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N / mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Toplam yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Toplam yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.16 Toplam yol hatasının (f), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

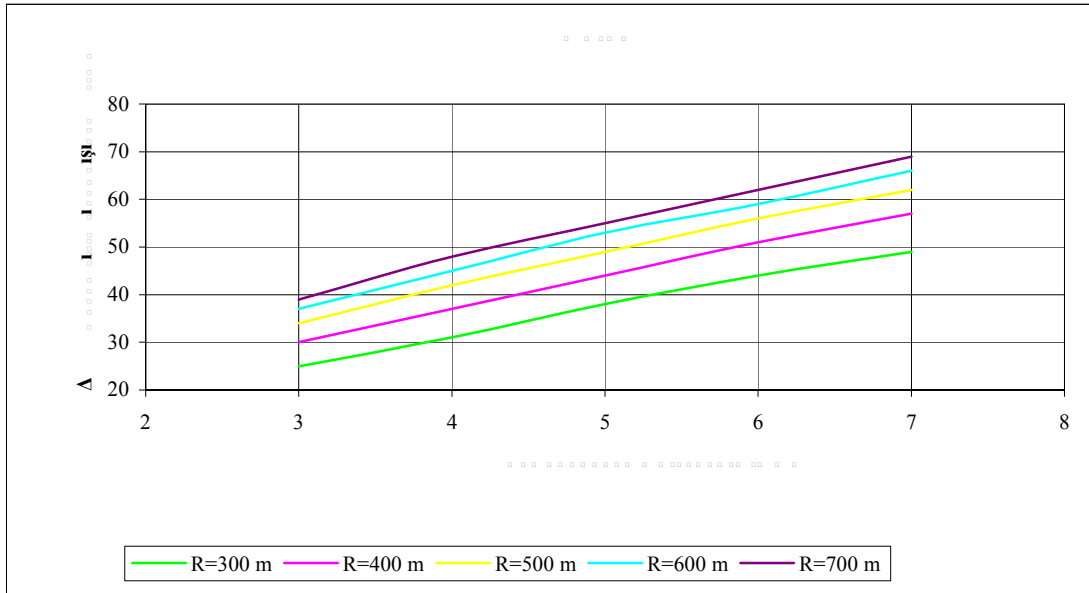
Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'de görüldüğü gibi toplam yol hatası (f) büyüdükçe, kritik sıcaklık artış değeri (ΔT_{kr}) küçülmektedir. Yani açıkça anlaşılabileceği üzere; yol hatasının büyüklüğünün yolun stabil kalabileceği sıcaklık aralığı üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Bu gibi büyük yol hatası olan demiryolu kesimlerinde özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında aksenal basınç kuvvetinin de artması ve raydaki gerilimi yükseltmesi ile, taşıt titreşimlerinin tetikleyici etkisi birleşince demiryollarında burkulmaların meydana gelmesi

kaçınılmaz hale gelmektedir.

Bununla birlikte UIC 60 rayının, az da olsa, S 49 rayına olan üstünlüğü Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 karşılaştırıldığında görülebilmektedir. UIC 60 rayının grafiğinde eğriler az da olsa daha yukarıda oluşmuştur. Yani UIC 60 rayının kritik sıcaklık artış değeri daha büyüktür.

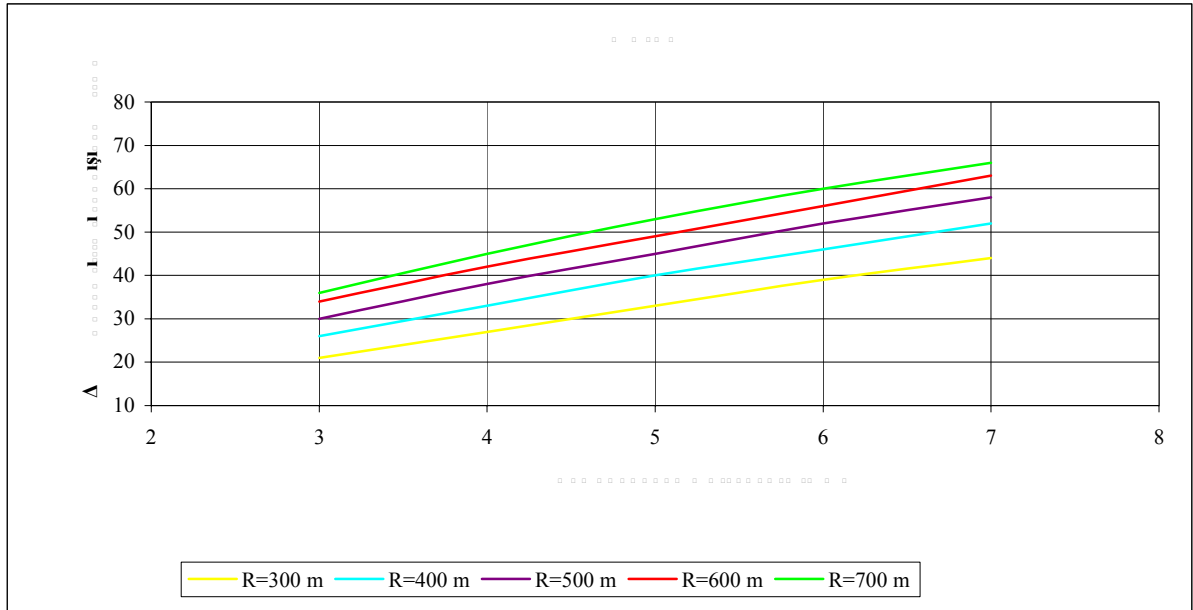
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **I** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **R** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.17 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



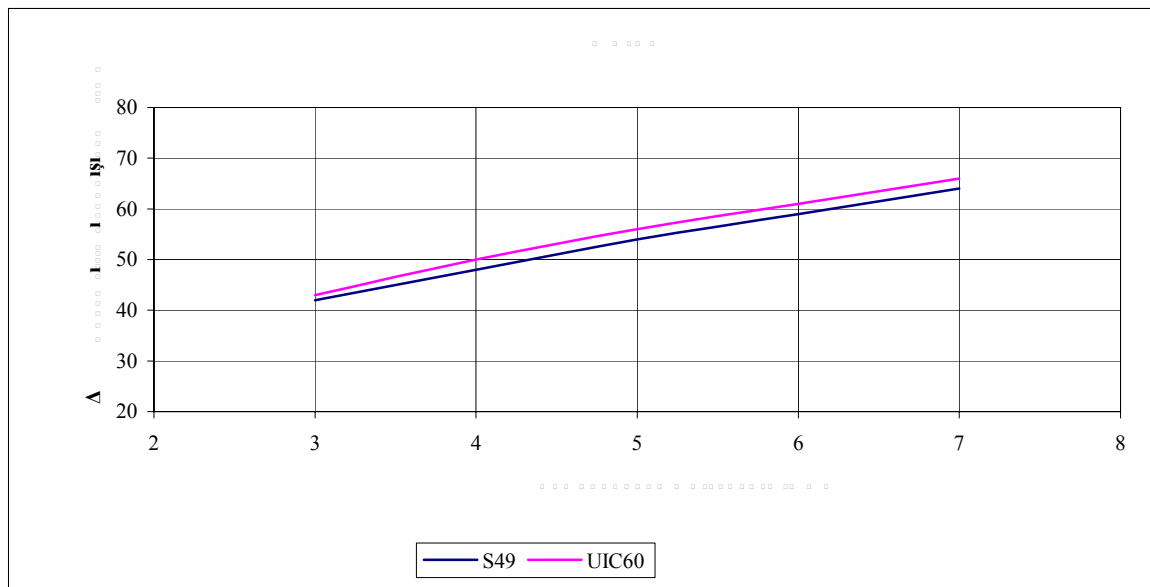
Şekil 5.18 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

Burkulma güvenliği nedeniyle uzun kaynaklı yollardaki kurp uygulamaları özel bir önem arz etmektedir. Çünkü kurp yarıçapı küçüldükçe yolun güvenli bir şekilde karşılayabileceği F_{kr} (kritik eksenel basınç kuvveti) azalır. Kurp yarıçapı küçüldükçe demiryolu araçlarının sınırlı bir dönme kabiliyeti olan rijit dingil ve tekerleklerle sahip olması nedeniyle bir başka sınırlama ortaya çıkmaktadır. Bu arada F_{kr} değerinin azalması ΔT_{kr} (kritik sıcaklık artışı) değerinin de

azalması anlamına gelmektedir (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18). Yani yolun güvenle karşılayabileceği F_{kr} (kritik eksenel basınç kuvveti) azaldıkça yol, sıcaklık artışlarına daha hassas hale gelecektir. Bu da yolun daha küçük bir eksenel basınç kuvveti sonucu burkulabileceği anlamına gelmektedir.

$$A_i$$

Ray tipi	: S 49 - UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2 - 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ - $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi



Şekil 5.19 Ray kesitinin (A_r), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi.

Şekil 5.19’da UIC 60 rayının S 49 rayına göre, yolun yanal stabilitesi açısından daha üstün olduğu görülmektedir. Rayın kesitinin büyümesi, yolun stabil kalacağı sıcaklık aralığını artırmaktadır. Ayrıca UIC 60 ray kesiti, sıcaklık değişimleri açısından daha büyük genleşme

aralığı sağlamaktadır. Yani UIC 60 rayı daha büyük aksenal kuvvetlere burkulmadan mukavemet edebilmektedir.

- İki rayın eğilme rijitliği; ($2EI_y = EI_\varphi$) ve
- Dönme direnci

Nemesdy, dönme direncini, rayların rijitliğinden ayırarak daha karmaşık ve aynı zamanda daha gerçekçi bir sonuca ulaşmak istemiştir.

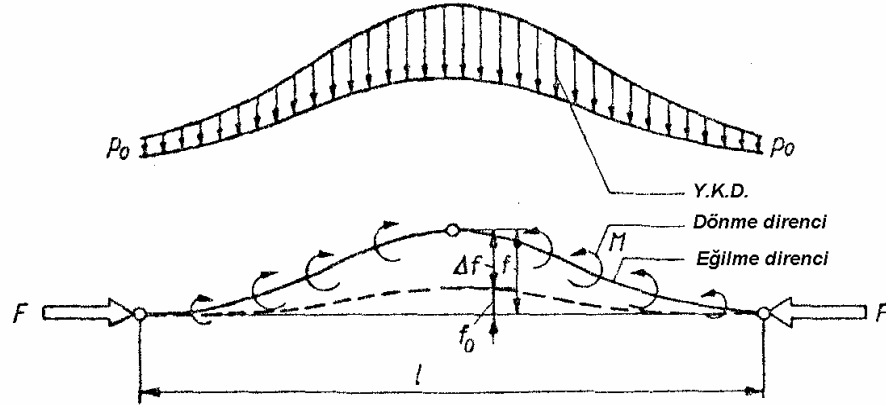
YKD, Meier yönteminden farklı olarak, değişken alınır (Şekil 4.5).Yol hatalarının kabulünde ise pratikte en çok görülen hata şekilleri göz önüne alınır (Şekil 6.1). Bu hata şekillerinin rastlanma sıklığı A'dan D'ye doğru azalmaktadır. Minimum kritik eksenel basınç kuvveti ise A'dan D'ye doğru artmaktadır (Führer, 1979).



Çizelge 6.1 A, B, C ve D hata formları için c sabitleri (Führer, 1979).

	□ □ □ □ □ □ □ □ □ □			
□ □ □ □	□	□	□	□
c_1	2,660	11,790	7,810	21,597
c_2	0,457	0,000	0,104	0,000
c_3	117,030	1.112,400	1.604,170	6.146,000
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

Nemesdy yönteminde de burkulma olayının incelenmesinde enerji yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 6.2’de yolun burkulmasına karşı koyan dirençler ve etkiye şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Yolun burkulmasına karşı koyan dirençler ve etkiye şekilleri (Führer, 1979).

Eğilme momentinin yaptığı iş (W_e):

$$W_e = c_3 EI \frac{f^2}{l^3} \quad (N.mm) \quad (6.1)$$

c_3 : Yol hatası şekline bağlı sabit (Bakınız Çizelge 6.1)

EI ($N.mm^2$) : Çerçevenin eğilme rijitliği ($I=2I_y$)

f (mm) : Yol hatası (Bakınız Şekil 6.1)

l (mm) : Hatalı yol uzunluğu (Bakınız Şekil 6.1)

Bu eşitliğe göre eğilme işi, kurp yarıçapından bağımsızdır.

Yolun kayma direncini yenmek için yapılan iş (W_k):

Yolun kayma direncini yenmek için yapılan iş, iki bölgede incelenir (Şekil 4.5);

1. Bölge:

$$W_k = c_4 P f l + c_5 C f^2 l \quad (N.mm) \quad (6.2)$$

c_4, c_5 : Yol hatası şekline bağlı sabit (Bakınız Çizelge 6.1)

P_0 (N/mm) : YKD'nin başlangıç değeri (Bakınız Şekil 4.5)

C : YKD'nin 1. bölümdeki eğimi (Bakınız Şekil 4.5)

f (mm) : Yol hatası (Bakınız Şekil 6.1)

l (mm) : Hatalı yol uzunluğu (Bakınız Şekil 6.1)

Sonucu önemli ölçüde etkilemeksizin, P değerinin sabit olduğu ikinci bölgeden hesap yapılabilir. Bu durumda (6.2) eşitliğindeki ikinci terim düşer ve birinci terimdeki P_0 yerine de P değeri yazılır.

Böylece;

2. Bölge:

$$W_k = c_4 P f l \quad (N.mm) \quad (6.3)$$

olur.

Basınç kuvvetinin yaptığı iş (W_b):

Yol ekseninde yatay ya da düşey olarak etki eden bir F kuvveti rayda Δl kadar bir uzamaya neden olur.

$$W_b = F\Delta l \quad (N.mm) \quad (6.4)$$

$$\Delta l = c_1 \frac{f^2}{l} + c_2 \frac{fl}{R} \quad (mm) \quad (6.5)$$

c_1, c_2 : Yol hatası şekline bağlı sabit (Bakınız Çizelge 6.1)

f (mm) : Yol hatası (Bakınız Şekil 6.1)

l (mm) : Hatalı yol uzunluğu (Bakınız Şekil 6.1)

R (mm) : Kurp yarıçapı

F (N) : Eksenel basınç kuvveti

(6.4) ve (6.5) eşitliklerinden;

$$W_b = F\Delta l \Rightarrow F \left[c_1 \frac{f^2}{l} + c_2 \frac{fl}{R} \right] \quad (6.6)$$

Dönme direncini yenmek için yapılan iş (W_d, W_{d0}):

Şekil 4.3'e göre dönme direnci üç kritik bölgede incelenebilir. Birinci bölgede $M = f(\varepsilon)$ ve ikinci bölgede $M_0 = \text{sabit}$ alınır. Üçüncü bölgede ise burkulma başlamıştır. Bu yüzden 3. bölge hesaplarda dikkate alınmaz. Döndürme direncini yenmek için yapılan işin hesabında aşağıdaki hesap yolu izlenir;

1. Bölgede:

$$M = f(\varepsilon) \quad (N.mm) \quad (6.7)$$

$$W_d = c_1 \frac{(f - f_0)^2 2r}{l.L} \quad (N.mm) \quad (6.8)$$

2. Bölgede:

$$M_0 = \text{sabit} \quad (6.9)$$

$$W_{d0} = c_6 \frac{2M_0}{L} f \quad (N.mm) \quad (6.10)$$

c_1, c_6 : Yol hatası şekline bağlı sabit (Bakınız Çizelge 6.1)

L (mm) : Travers aralığı

r : 1. bölgedeki doğrunun eğimi (Bakınız Şekil 4.3)

M_0 (N/mm) : Sabit dönme direnci (Bakınız Şekil 4.3, 2. bölge)

Toplam yapılan iş (W_T):

$$W_T = W_e + W_k + W_d - W_b \quad (N.mm) \quad (6.11)$$

$$W_T = c_3 EI \frac{f^2}{l^3} + c_4 P_0 f l + c_1 \frac{f^2}{l} \frac{2r}{L} - F \Delta l \quad (N.mm) \quad (6.12)$$

W_b ve W_d terimleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.5'te belirtilen birinci bölgeden hesaplanmaktadır. (6.12) denklemindeki f terimiyle, f toplam yol hatası ile f_0 başlangıç yol hatası arasındaki “ Δf ” hata artışı kastedilmektedir. Bu yüzden eşitlikte f yerine $f - f_0$ yazılmalıdır.

Ayrıca değişiklik Δl için de yapılmalıdır. Şöyle ki;

$$\Delta l = c_1 \frac{(f - f_0)^2}{l} + \frac{(f - f_0)l}{R} \quad (mm) \quad (6.13)$$

hesabı doğru kesim için yaptığımız için denklemin ikinci bileşeni düşer ve;

$$\Delta l = c_1 \frac{f^2}{l} - c_1 \frac{f_0^2}{l} \quad (mm) \quad (6.14)$$

olur. Bu hususlar göz önünde bulundurularak (6.12) eşitliğinden:

$$W_T = c_3 EI \frac{(f - f_0)^2}{l^3} + c_4 P_0 (f - f_0) l + c_5 C (f - f_0)^2 l + c_1 \frac{(f - f_0)^2}{l} \frac{2r}{L} - F c_1 \frac{(f - f_0)^2}{l} \quad (6.15)$$

bulunur.

$P = \text{sabit}$ ve $M_0 = \text{sabit}$ durumu için ise (6.3) ve (6.10) eşitliklerinden;

$$W_T = c_3 EI \frac{(f - f_0)^2}{l^3} + c_4 P (f - f_0) l + c_6 \frac{2M_0}{L} (f - f_0) - F c_1 \frac{(f - f_0)^2}{l} \quad (6.16)$$

elde edilir.

$$\frac{dW_r}{df} = 0 \text{ yazılabilir.} \quad (6.17)$$

kabulü yapılarak (6.15) denklemiyle;

denkleminde F çekilir ve $\frac{f-f_0}{f}$ ile çarpılarak F_{kr} değeri aşağıdaki gibi bulunur;

$$F_{kr} = \left[\frac{c_3 EI}{c_1 l^2} + \frac{c_4 P_0 l^2}{2c_1 (f - f_0)} + \frac{c_5 Cl^2}{c_1} + \frac{2r}{L} \right] \frac{f - f_0}{f} \quad (6.19)$$

Çizelge 6.2 A, B, C ve D hata formları için K sabitleri (Führer, 1979).

	□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □			
□ □ □ □	□	□	□	□
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	0,0100	0,0133	0,0001

Çizelge 6.2'deki değerler kullanılarak (6.19) denklemi daha sade bir şekilde düzenlenebilir.

Doğru yol kesiminde M ve P 'nin değişken olması durumu için;

$$F_{kr} = \left(K_1 \frac{EI}{l^2} + K_2 P_0 \frac{l^2}{(f - f_0)} + K_3 Cl^2 + \frac{2r}{L} \right) \frac{(f - f_0)}{f} \quad (6.20)$$

şeklinde ifade edilir.

$F_{kr} \text{ (N)}$	: Kritik eksenel basınç kuvveti
K_1, K_2, K_3	: Yol hata sabitleri
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	: Ray çeliğinin elastisite modülü
$I \text{ (mm}^4\text{)}$	: İki rayın atalet momenti
$l \text{ (mm)}$	: Hatalı yol uzunluğu
$P_0 \text{ (N/mm)}$	: Başlangıçtaki (sabit) yanal kayma direnci
C	: YKD'nin 1. bölgedeki eğimi (Bakınız Şekil 4.5)
r	: Dönme direnci eğrisinin 1. bölgedeki eğimi (Bakınız Şekil 4.3)
$L \text{ (mm)}$	: Travers aralığı
$f_0 \text{ (mm)}$	: Başlangıç yol hatası
$f \text{ (mm)}$	: Toplam yol hatası
$f - f_0 \text{ (mm)}$	: Gerçek yol hatası

Doğru yolda M ve P 'nin sabit olması durumunda (6.16) denklemi ile;

$$\frac{dW_T}{df} = \frac{2c_3 EI(f - f_0)}{l^3} + c_4 Pl + 2c_5 C(f - f_0)l + c_6 \frac{2M_0}{L} - \frac{2Fc_1(f - f_0)}{l} \quad (6.21)$$

yazılır ve yukarıdaki gibi F çekilir ve $\frac{f - f_0}{f}$ ile çarpılarak F_{kr} değeri aşağıdaki gibi bulunur;

$$F_{kr} = \left[K_1 \frac{EI}{l^2} + K_2 P \frac{l^2}{(f - f_0)} + K_4 \frac{Ml}{L(f - f_0)} \right] \frac{(f - f_0)}{f} \quad (N) \quad (6.22)$$

$F_{kr} (N)$	: Kritik eksenel basınç kuvveti
K_1, K_2, K_4	: Yol hata sabitleri
$E (N/mm^2)$	: Ray çeliğinin elastisite modülü
$I (mm^4)$	: İki rayın atalet momenti
$l (mm)$	: Hatalı yol uzunluğu
$P (N/mm)$	: Yanal kayma direnci
$L (mm)$	: Travers aralığı
$M (N.mm)$	: Bağlantı dönme direnci
$f_0 (mm)$	: Başlangıç yol hatası
$f (mm)$	: Toplam yol hatası
$f - f_0 (mm)$	: Gerçek yol hatası

Kurplu kesimler için de doğru yol kesimleri için kullanılan (6.12) ifadesi geçerlidir. Ancak toplam enerji denklemi yazılırken W_b değeri yerine (6.6) eşitliğinin tamamı alınır. Daha sonra

kritik eksenel basınç kuvvetini bulmak için $\frac{dW_T}{df} = 0$ yazılıp, $\frac{f - f_0}{f}$ ile çarpılır.

Kurplu yol kesimi için, M ve P 'nin değişken olması durumunda:

$$W_T = c_3 EI \frac{f^2}{l^3} + c_4 P_0 l + c_5 C f^2 l + c_1 \frac{f^2}{l} \frac{2r}{L} - F \left(c_1 \frac{f^2}{l} + c_2 \frac{fl}{R} \right) \quad (6.23)$$

$$\frac{dW_T}{df} = \frac{2c_3 EI f}{l^3 c_1} + \frac{c_4 P_0 l}{c_1} + \frac{2c_5 C f l}{c_1} + \frac{2c_1 f 2r}{l L c_1} - F \left(\frac{2c_1 f}{l c_1} + \frac{c_2 l}{R c_1} \right) \quad (6.24)$$

$$\frac{2c_3 E I f}{l^3 c_1} + \frac{c_4 P_0 l}{c_1} + \frac{2c_5 C f l}{c_1} + \frac{2c_1 f 2r}{l L c_1} = F \left(\frac{2c_1 f}{l c_1} + \frac{c_2 l}{R c_1} \right) \quad (6.25)$$

eşitlikleri elde edilir ve “ F_{kr} ” kritik eksenel basınç kuvveti;

$$F_{kr} = \left[\frac{K_1 \frac{EI}{l^2} + K_2 P_0 \frac{l^2}{2(f-f_0)} + K_3 C l^2 + \frac{2r}{L}}{1 + K_5 \frac{l^2}{fR}} \right] \frac{(f-f_0)}{f} \quad (6.26)$$

şeklinde hesaplanır.

$F_{kr} \text{ (N)}$	: Kritik eksenel basınç kuvveti
K_1, K_2, K_4, K_5	: Yol hata sabitleri
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	: Ray çeliğinin elastisite modülü
$I \text{ (mm}^4\text{)}$	: İki rayın atalet momenti
$l \text{ (mm)}$	: Hatalı yol uzunluğu
$P \text{ (N/mm)}$	: Yanal kayma direnci
C	: YKD'nin 1. bölgedeki eğimi (Bakınız Şekil 4.5)
r	: Dönme direnci eğrisinin 1. bölgedeki eğimi (Bakınız Şekil 4.3)
$L \text{ (mm)}$	: Travers aralığı
$M \text{ (N.mm)}$	: Bağlantı dönme direnci
$R \text{ (mm)}$	: Kurp yarıçapı
$f_0 \text{ (mm)}$	: Başlangıç yol hatası
$f \text{ (mm)}$	: Toplam yol hatası
$f - f_0 \text{ (mm)}$	: Gerçek yol hatası

Kurplu yol kesiminde, M ve P 'nin sabit olması durumu için yukarıdaki işlemlere benzer şekilde işlem yapılırsa, (F_{kr}) kritik eksenel basınç kuvveti 6.27 eşitliği ile elde edilir;

$$F_{kr} = \left[\frac{K_1 \frac{EI}{l^2} + K_2 P \frac{l^2}{(f-f_0)_0} + K_4 \frac{M_0 l}{L(f-f_0)}}{1 + K_5 \frac{l^2}{fR}} \right] \frac{(f-f_0)}{f} \quad (6.27)$$

$F_{kr} \text{ (N)}$	: Kritik eksenel basınç kuvveti
K_1, K_2, K_4, K_5	: Yol hata sabitleri
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	: Ray çeliğinin elastisite modülü
$I \text{ (mm}^4\text{)}$	: İki rayın atalet momenti
$l \text{ (mm)}$	: Hatalı yol uzunluğu
$P \text{ (N/mm)}$	: Yanal kayma direnci
$L \text{ (mm)}$	: Travers aralığı
$M \text{ (N.mm)}$	: Bağlantı dönme direnci
$R \text{ (mm)}$	: Kurp yarıçapı
$f_0 \text{ (mm)}$	: Başlangıç yol hatası
$f \text{ (mm)}$	: Toplam yol hatası
$f - f_0 \text{ (mm)}$	: Gerçek yol hatası

F_{kr} değerleri, sabit bir yol hatası (f), ve değişken yol hatası uzunlukları (l) için incelendiğinde bir eğri elde edilir. Bu eğrinin minimum noktasındaki F_{kr} değeri yolun stabilite güvenliği açısından çok kritik bir değerdir. Bu minimum kritik eksenel basınç kuvveti şöyle bulunur;

$$\frac{dF_{kr}}{dl} = 0 \quad (6.28)$$

Bu aşamada dönme direncinin değişken olduğu 1. bölge dikkate alınır (Bakınız Şekil 4.3, $M = r \cdot \varepsilon$).

Çizelge 6.3 A, B, C ve D hata formları için a sabitleri (Führer, 1979).

	□ □ □ □ □ □ □ □ □ □			
□ □ □ □	□	□	□	□
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

Kurplu yol kesimi için aynı şekilde;

$$(F_{kr})_{\min} = a_3 \sqrt{\frac{EI}{f} P_0 + a_2 CEI + a_4 \left(\frac{EI}{fR} \right)^2} - a_5 \frac{EI 2r}{fRa} - a_6 \frac{EI}{fR} + \frac{2r}{L} \quad (6.35)$$

elde edilir. Eşitliklerde yer alan sembollerin anlamları ve birimleri aşağıda verilmiştir;

$l_{kr} \text{ (mm)}$	: Kritik burkulma boyu
$F_{kr} \text{ (N)}$	: Kritik eksenel basınç kuvveti
$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$	: Yol hata sabitleri
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	: Ray çeliğinin elastisite modülü
$I \text{ (mm}^4\text{)}$	: İki rayın atalet momenti
$l \text{ (mm)}$	: Hatalı yol uzunluğu
$P \text{ (N/mm)}$	: Yanal kayma direnci
C	: YKD'nin 1. bölgedeki eğimi (Bakınız Şekil 4.5)

r	: Dönme direnci eğrisinin 1. bölgedeki eğimi (Bakınız Şekil 4.3)
L (mm)	: Travers aralığı
M (N.mm)	: Bağlantı dönme direnci
R (mm)	: Kurp yarıçapı
f_0 (mm)	: Başlangıç yol hatası
f (mm)	: Toplam yol hatası
$f - f_0$ (mm)	: Gerçek yol hatası

Maksimum dönme açısı ε_{maks} 'ın yol hata formları (Şekil 6.1) için belirlenmesinde aşağıdaki denklem kullanılır;

A, C ve D hata formları için ε_{maks} değeri;

$$\mathcal{E}_{maks} = 3 \frac{(f - f_0)}{h} \quad (6.36)$$

 h (mm) : Kiriş uzunluğu

B hata formu için ε_{maks} değeri;

$$\mathcal{E}_{maks} = 5 \frac{(f - f_0)}{h} \quad (6.37)$$

ε_{maks} , sehim farkı $(f - f_0)$ ve kiriş uzunluğundan (h) elde edilir (kiriş uzunluğu hata şekline bağlıdır).

A, B, C ve D hata formları için kiriş uzunlukları;

$$h_A = 1l \quad (6.38)$$

$$h_B = 0,34l \quad (6.39)$$

$$h_C = 0,5l \quad (6.40)$$

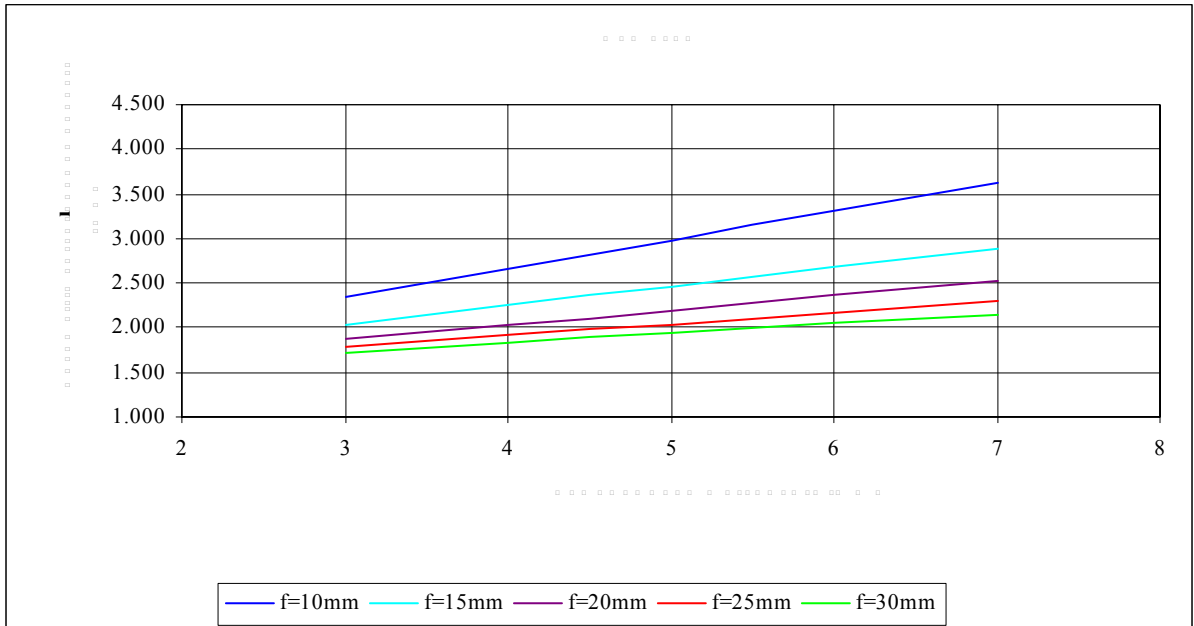
$$h_D = 0,22l \quad (6.41)$$

Üçüncü bölgede oluşan dönmeler bir burkulmaya neden olacak kadar büyük olduğundan, bu bölgede daha fazla araştırma yapmaya gerek yoktur (Şekil 4.4) (Führer, 1979).

§ İ (F_{kr})

Nemesdy hesap yöntemine göre; *kritik eksenel basınç kuvveti* (F_{kr}) ve *yanal kayma direnci* (P) değerlerinin *yol hatası* (f), *kurp yarıçapı* (R) ve *ray kesitine* (ray tipi: A_r) bağlı olarak değişimleri Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'deki grafiklerle gösterilmiştir.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $10.260.000 \text{ mm}^4$
Bağlantı elemanlarının dönme direnci	: $1.000.000 \text{ N.mm}$
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: B (Çizelge 6.2)



Şekil 6.4 Toplam yol hatasının (f), yanıl kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te görüldüğü gibi toplam yol hatası (f) büyüdükçe, kritik eksenel basınç kuvveti (F_{kr}) küçülmektedir. Yani açıkça anlaşılabileceği üzere; yol hatasının büyüklüğünün yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik eksenel basınç kuvveti üzerinde olumsuz

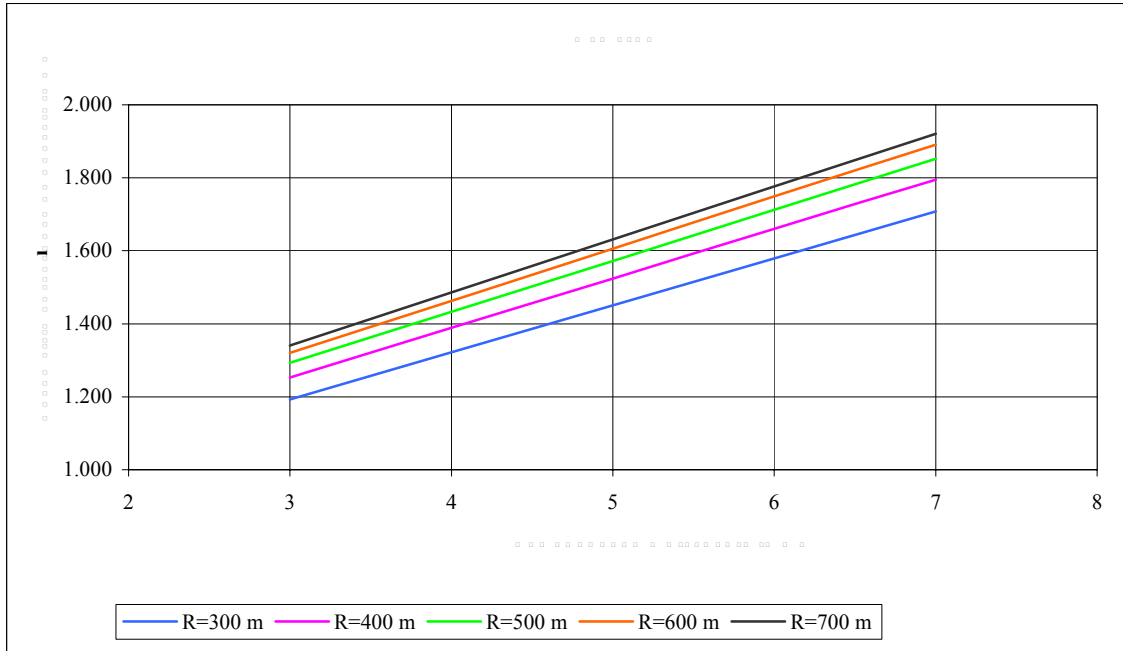
bir etkisi vardır. Bu gibi büyük yol hatası olan demiryolu kesimlerinde özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında rayların ısınması sonucu eksenel basınç kuvvetinin de artması ve raydaki gerilimi yükseltmesi ile, taşıt titreşimlerinin tetikleyici etkisi birleşince demiryollarında burkulmaların meydana gelmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

Bununla birlikte UIC 60 rayının S 49 rayına olan üstünlüğü Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 karşılaştırıldığında görülebilmektedir. UIC 60 rayının grafiğinde eğriler daha yukarıda oluşmuştur. Yani UIC 60 rayının kritik eksenel basınç kuvveti değerleri (F_{kr}) daha büyüktür.

Nemesdy yönteminde bağlantı elemanlarının demiryolunun yanal stabilitesine olan katkısı rayın atalet momentini artırmak yerine ayrıntılı bir şekilde münferit olarak hesaplanmıştır. Bunun da Meier yöntemindeki kabuller yardımıyla elde edilen sonuçlara nazaran daha gerçekçi bir sonuç verdiği görülmektedir. Nemesdy yönteminde ray tipleri arasındaki fark daha açık bir şekilde görülebilmektedir.

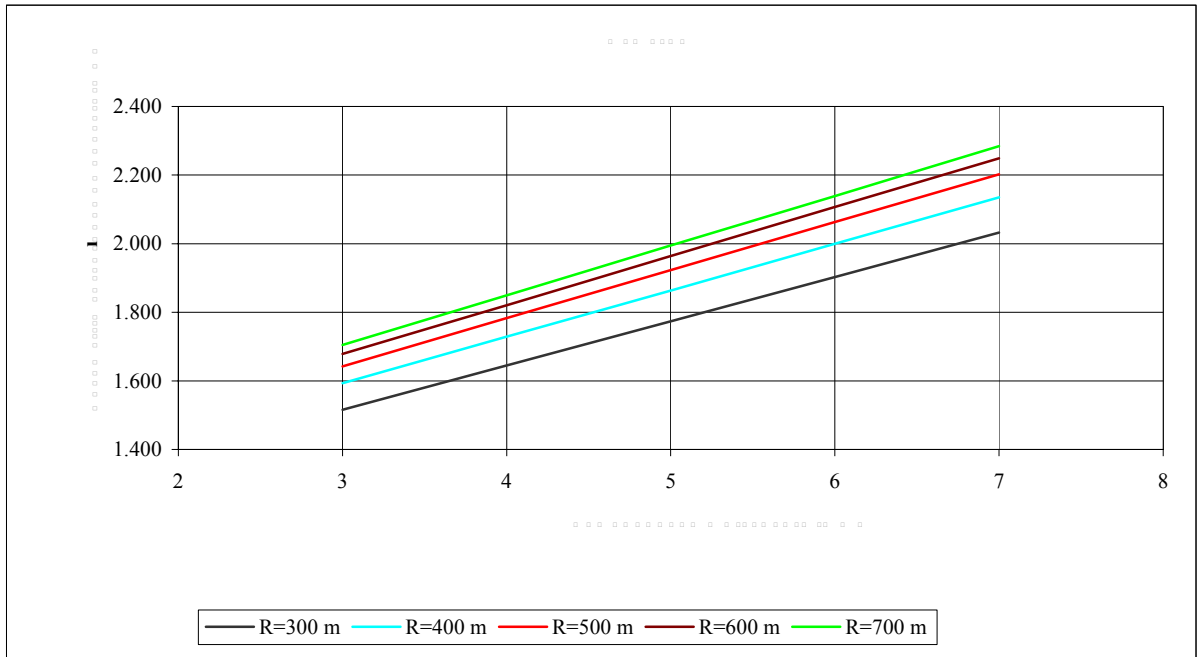
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **I** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **R** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $6.380.000 \text{ mm}^4$
Bağlantı elemanlarının dönme direnci	: $1.000.000 \text{ N.mm}$
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: B (Çizelge 6.2)



Şekil 6.5 Kurp yarıçapının (R), yanıl kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $10.260.000 \text{ mm}^4$
Bağlantı elemanlarının dönme direnci	: $1.000.000 \text{ N.mm}$
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: B (Çizelge 6.2)



Şekil 6.6 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

Burkulma güvenliği nedeniyle uzun kaynaklı yollardaki kurp uygulamaları özel bir önem arz etmektedir. Çünkü kurp yarıçapı küçüldükçe yolun güvenli bir şekilde karşılayabileceği F_{kr}

(kritik eksenel basınç kuvveti) azalır. Kurp yarıçapı küçüldükçe demiryolu araçlarının sınırları 

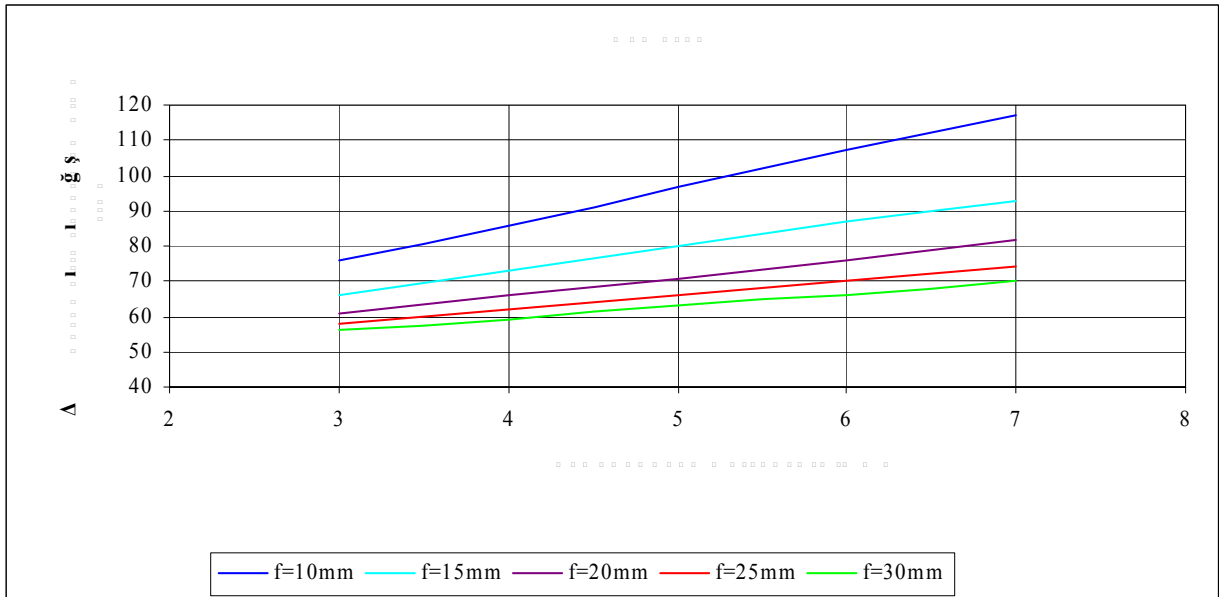
Şekil 6.7’de UIC 60 rayının S 49 rayına göre, yolun yanal stabilitesi açısından daha üstün olduğu görülmektedir. Rayın kesitinin büyümesi, yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik eksenel basınç kuvveti değerini artırmaktadır. Ayrıca UIC 60 ray kesiti, eksenel basınç kuvveti açısından daha büyük bir değer aralığı sağlamaktadır. Yani UIC 60 rayı daha büyük eksenel kuvvetlere burkulmadan mukavemet edebilmektedir.

Nemesdy yönteminde bağlantı elemanlarının demiryolunun yanal stabilitesine olan katkısı rayın atalet momentini artırmak yerine ayrıntılı bir şekilde münferit olarak hesaplanmıştır. Bunun da Meier yöntemindeki kabuller yardımıyla elde edilen sonuçlara nazaran daha gerçekçi bir sonuç verdiği görülmektedir. Nemesdy yönteminde ray tipleri arasındaki fark daha açık bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 6.7).

§ İ ΔT_{kr}

Nemesdy hesap yöntemine göre; *kritik sıcaklık artışı* (ΔT_{kr}) ve *yanal kayma direnci* (P) değerlerinin *yol hatası* (f), *kurp yarıçapı* (R) ve *ray kesitine* (*ray tipi*: A_r) bağlı olarak değişimleri Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'deki grafiklerle gösterilmiştir.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $10.260.000 \text{ mm}^4$
Bağlantı elemanlarının dönme direnci	: $1.000.000 \text{ N.mm}$
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: B (Çizelge 6.2)



Şekil 6.9 Toplam yol hatasının (f), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

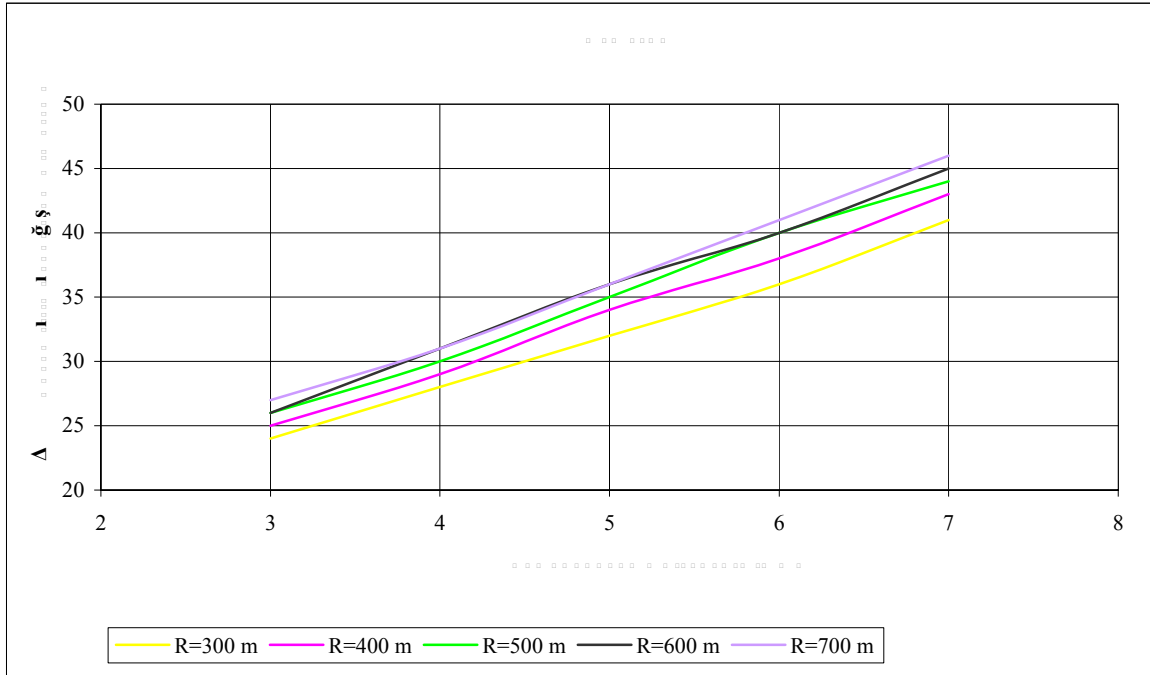
Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da görüldüğü gibi toplam yol hatası (f) büyüdükçe, kritik sıcaklık artışı (ΔT_{kr}) küçülmektedir. Yukarıdaki grafiklerden açıkça anlaşılabileceği üzere; yol hatasının büyüklüğünün yolun stabil kalabileceği sıcaklık aralığı üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Bu

gibi büyük yol hatası olan demiryolu kesimlerinde özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında eksenel basınç kuvvetinin de artması ve raydaki gerilimi yükseltmesi ile, taşıt titreşimlerinin tetikleyici etkisi birleşince demiryollarında burkulmaların meydana gelmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

Bununla birlikte UIC 60 rayının, az da olsa, S 49 rayına olan üstünlüğü Şekil 6.8 ve Şekil 6.9 karşılaştırıldığında görülebilmektedir. UIC 60 rayının grafiğinde eğriler daha yukarıda oluşmuştur. Yani UIC 60 rayının kritik sıcaklık artış değeri daha büyüktür.

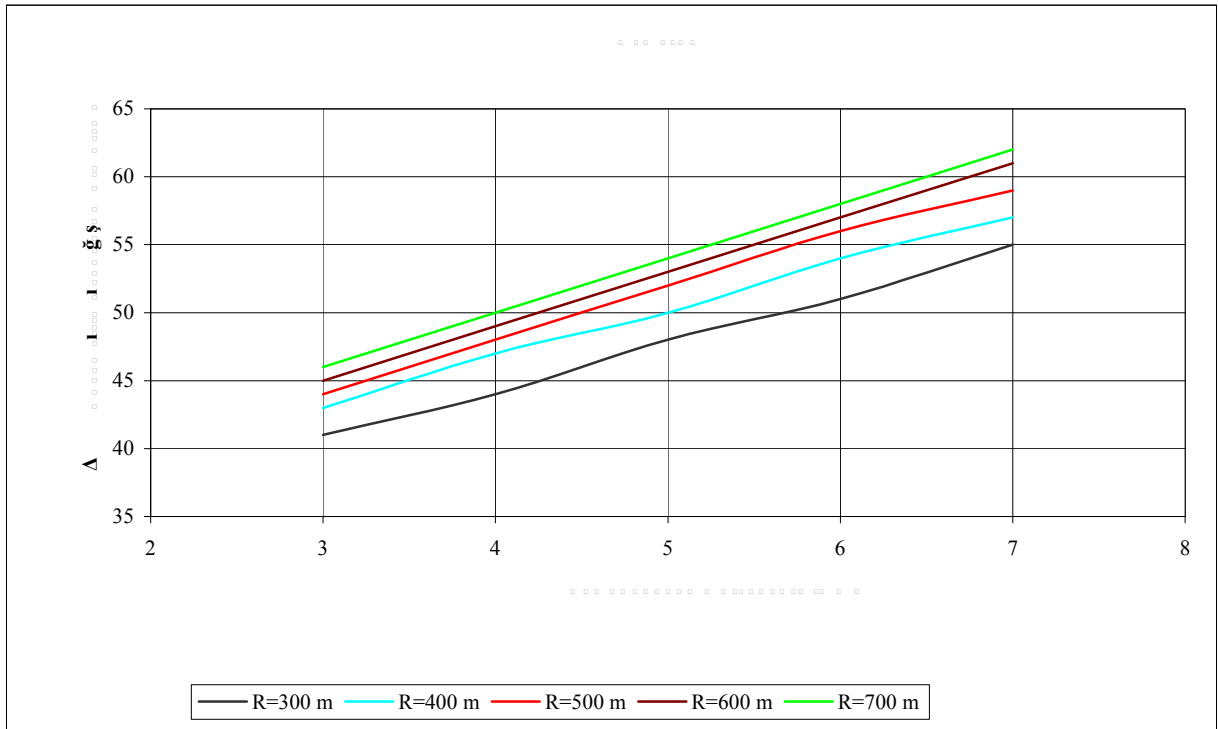
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **I** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ **R** □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $6.380.000 \text{ mm}^4$
Bağlantı elemanlarının dönme direnci	: $1.000.000 \text{ N.mm}$
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: B (Çizelge 6.2)



Şekil 6.10 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $10.260.000 \text{ mm}^4$
Bağlantı elemanlarının dönme direnci	: $1.000.000 \text{ N.mm}$
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Değişken
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: B (Çizelge 6.2)



Şekil 6.11 Kurp yarıçapının (R), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

Burkulma güvenliği nedeniyle uzun kaynaklı yollardaki kurp uygulamaları özel bir önem arz etmektedir. Çünkü kurp yarıçapı küçüldükçe yolun güvenli bir şekilde karşılayabileceği F_{kr}

(kritik eksenel basınç kuvveti) azalır. Kurp yarıçapı küçüldükçe demiryolu araçlarının sınırlı bir dönme kabiliyeti olan rijit dingil ve tekerleklere sahip olması nedeniyle bir başka sınırlama ortaya çıkmaktadır. F_{kr} değerinin azalması ise, ΔT_{kr} (kritik sıcaklık artışı) değerinin de azalması anlamına gelmektedir (Şekil 6.10 ve Şekil 6.11). Yani yolun güvenle karşılayabileceği F_{kr} (kritik eksenel basınç kuvveti) azaldıkça yol sıcaklık artışlarına daha hassas hale gelecektir. Bu da yolun daha küçük bir eksenel basınç kuvveti sonucu burkulabileceği anlamına gelmektedir.

Year	S49 (N)	UIC60 (N)
2002	49	61
2003	50	63
2004	54	66
2005	60	71
2006	65	76
2007	70	82

Şekil 6.12 Ray kesitinin (A_r), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi.

Şekil 6.12’de UIC 60 rayının S 49 rayına göre, yolun yanal stabilitesi açısından daha üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca UIC 60 ray kesiti, sıcaklık değişimleri açısından daha büyük genleşme aralığı sağlamaktadır. Yani UIC 60 rayı daha büyük eksenel kuvvetlere burkulmadan mukavemet edebilmektedir.

Ray tipleri ile YKD’ni birlikte düşünecek olursak, YKD değeri büyüdükçe farklı ray tiplerinin arasındaki fark azalmaktadır. Yani YKD’nin çok büyük değerlerinde ray tipinin önemi azalmaktadır. Bu sonuç çok pratik olmamakla birlikte, uzun kaynaklı yolların yanal stabilitesinde en önemli parametrelerin başında gelen YKD’nin önemini göstermesi bakımından dikkate değerdir.

1 g g

$y(x)$ (mm) : Yanal yer değiştirme

Buradaki yaklaşımda, burkulmanın devamlı sinüs eğrisi biçiminde gerçekleştiği varsayımı yapılmaktadır. Hesap aşamasında sadece bir dalga boyu uzunluğu alınması yeterlidir (Şekil 7.2). Bu problemi çözmek için enerji metodu kullanılmıştır. Toplam enerji üç kısımdan oluşmaktadır (Esveld, 2001):

1. Kirişin eğilme enerjisi (U_e):

$$U_e = \frac{1}{2} \int_0^l EI y''^2 dx \quad (7.2)$$

$$y(x) = y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \quad (7.3)$$

$$U_e = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left(y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \right)''^2 dx \quad (7.4)$$

$$U_e = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left(y_0 \cos \frac{2\pi x}{l} \frac{2\pi}{l} \right)'^2 dx \quad (7.5)$$

$$U_e = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left(-y_0 \frac{2\pi}{l} \frac{2\pi}{l} \sin \frac{2\pi x}{l} \right)^2 dx \quad (7.6)$$

$$U_e = \frac{1}{2} EI y_0^2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 \int_0^l \left(\sin^2 \frac{2\pi x}{l} \right) dx \quad (7.7)$$

$$\sin^2 x = \frac{1}{2} (1 - \cos 2x) \quad (7.8)$$

$$U_e = \frac{1}{2} EI y_0^2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 \int_0^l \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{4\pi x}{l} \right) dx \quad (7.9)$$

$$U_e = \frac{1}{2} EI y_0^2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 \int_0^l \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{4\pi x}{l} \right) dx \quad (7.10)$$

$$U_e = \frac{y_0^2 l}{4} EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 \quad (7.11)$$

2. Yanal basınç deformasyon enerjisi (U_b):

$$U_b = \frac{1}{2} \int_0^l \beta y^2 dx \quad (7.12)$$

$$y(x) = y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \quad (7.13)$$

$$U_b = \frac{1}{2} \beta \int_0^l \left(y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \right)^2 dx \quad (7.14)$$

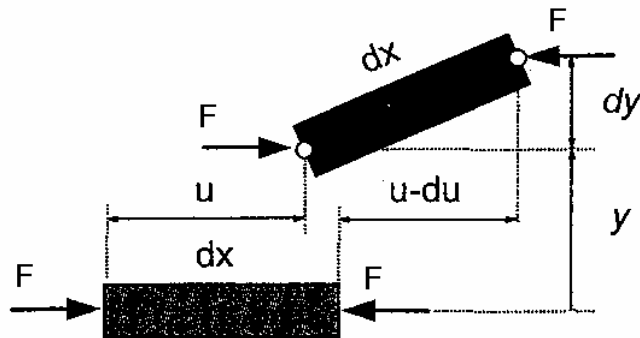
$$U_b = \frac{1}{2} \beta \int_0^l y_0^2 \sin^2 \frac{2\pi x}{l} dx \quad (7.15)$$

$$U_b = \frac{1}{2} \beta \int_0^l y_0^2 \left(\frac{1 - \cos \frac{4\pi x}{l}}{2} \right) dx \quad (7.16)$$

$$U_b = \frac{1}{2} \beta \int_0^l \left(\frac{y_0^2}{2} - \frac{y_0^2 \cos \frac{4\pi x}{l}}{2} \right) dx \quad (7.17)$$

$$U_b = \frac{y_0^2 l}{4} \beta \quad (7.18)$$

3. Basınç kuvvetinin yaptığı iş :



Şekil 7.3 Burkulan ray elemanı (Esveld, 2001).

$$W_b = \frac{1}{2} \int_0^l F y'^2 dx \quad (7.19)$$

$$y(x) = y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \quad (7.20)$$

$$W_b = \frac{1}{2} F \int_0^l \left(y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \right)^2 dx \quad (7.21)$$

$$W_b = \frac{1}{2} F \int_0^l \left(y_0 \cos \frac{2\pi x}{l} \frac{2\pi}{l} \right)^2 dx \quad (7.22)$$

$$W_b = \frac{1}{2} F \int_0^l y_0^2 \cos^2 \frac{2\pi x}{l} \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 dx \quad (7.23)$$

$$W_b = \frac{1}{2} F y_0^2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \int_0^l \cos^2 \frac{2\pi x}{l} dx \quad (7.24)$$

$$\cos^2 x = \frac{1}{2} (1 + \cos 2x) \quad (7.25)$$

$$W_b = \frac{1}{2} F y_0^2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \int_0^l \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{4\pi x}{l} \right) dx \quad (7.26)$$

$$W_b = \frac{1}{2} F y_0^2 \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \int_0^l \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{4\pi x}{l} \right) dx \quad (7.27)$$

$$W_b = \frac{y_0^2 l}{4} F \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \quad (7.28)$$

Toplam enerji U_T :

$$U_T = U_e + U_b - W_b \quad (7.29)$$

$$U_T = \frac{y_0^2 l}{4} \left[EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + \beta - F \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \right] \quad (7.30)$$

Toplam enerji denkleminin kısmi türevi alınarak sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{\partial U_T}{\partial y_0} = 0 \quad (7.31)$$

$$U_T = \frac{y_0^2 l}{4} EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + \frac{y_0^2 l}{4} \beta - \frac{y_0^2 l}{4} F \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \quad (7.32)$$

$$\frac{\partial U_T}{\partial y_0} = \frac{2y_0 l}{4} EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + \frac{2y_0 l}{4} \beta - \frac{2y_0 l}{4} F \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 = 0 \quad (7.33)$$

$$\frac{y_0 l}{2} F \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 = \frac{y_0 l}{2} \left[EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + \beta \right] \quad (7.34)$$

$$F = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} + \frac{\beta l^2}{4\pi^2} \quad (7.35)$$

bulunur.

$F (N)$: Eksenel basınç kuvveti

$\beta (N / mm^2)$: Orantı sabiti

$E (N / mm^2)$: Ray çeliğinin elastisite modülü

$I (mm^4)$: İki rayın atalet momenti

$l (mm)$: Hatalı yol uzunluğu

Stabilite;

$$\frac{\partial^2 U_T}{\partial y_0^2} > 0 \quad (7.36)$$

olması halinde sağlanabilir. Şöyle ki:

$$F < \frac{4\pi^2 EI}{l^2} + \frac{\beta l^2}{4\pi^2} \quad (7.37)$$

Bu aşamada $\frac{\partial F}{\partial l} = 0$ yazılırsa aşağıdaki kritik değerler bulunur:

$$\frac{\partial F}{\partial l} = -\frac{4\pi^2 EI}{l^3} + \frac{2\beta l}{4\pi^2} = 0 \quad (7.38)$$

$$\frac{8\pi^2 EI}{l^3} = \frac{\beta l}{2\pi^2} \quad (7.39)$$

$$l_{kr}^2 = 4\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\beta}} \quad (7.40)$$

$l_{kr} \text{ (mm)}$: Kritik hatalı yol uzunluğu

$E \text{ (N / mm}^2\text{)}$: Ray çeliğinin elastisite modülü

$I \text{ (mm}^4\text{)}$: İki rayın atalet momenti

$\beta \text{ (N / mm}^2\text{)}$: Orantı sabiti

Bulunan bu “ l_{kr}^2 ” değeri (7.37) numaralı denklemde yerine konulursa;

$$F_{kr} = \frac{4\pi^2 EI}{4\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\beta}}} + \frac{\beta 4\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\beta}}}{4\pi^2} \quad (7.41)$$

$$F_{kr} = 2\sqrt{\beta EI} \quad (7.42)$$

eşitliği elde edilir.

$F_{kr} \text{ (N)}$: Kritik eksenel basınç kuvveti

$E \text{ (N / mm}^2\text{)}$: Ray çeliğinin elastisite modülü

$I \text{ (mm}^4\text{)}$: İki rayın atalet momenti

$\beta \text{ (N / mm}^2\text{)}$: Orantı sabiti

Eğer yanal direnç yoksa ($\beta = 0$) ise, eksenel basınç kuvveti;

$$F = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad (7.43)$$

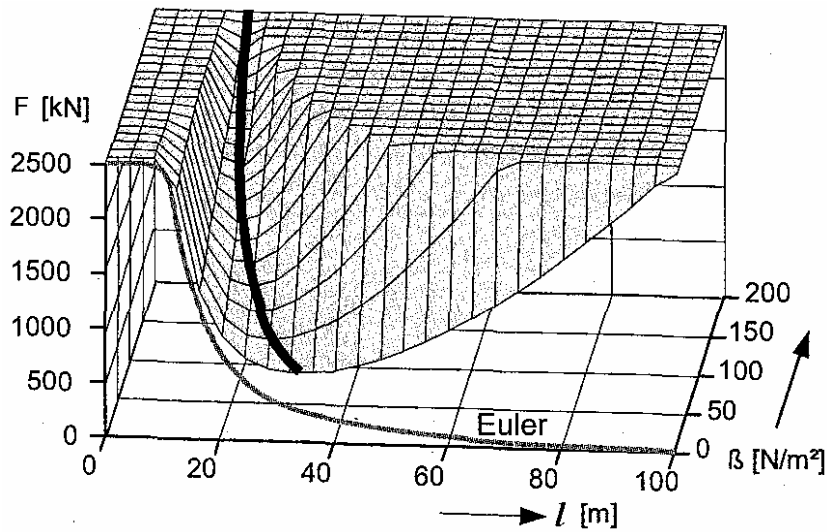
F (N) : Eksenel basınç kuvveti

l (mm) : Hatalı yol uzunluğu

E (N/mm²) : Ray çeliğinin elastisite modülü

I (mm⁴) : İki rayın atalet momenti

l , β ve F arasındaki ilişki Şekil 7.4'te görülmektedir.

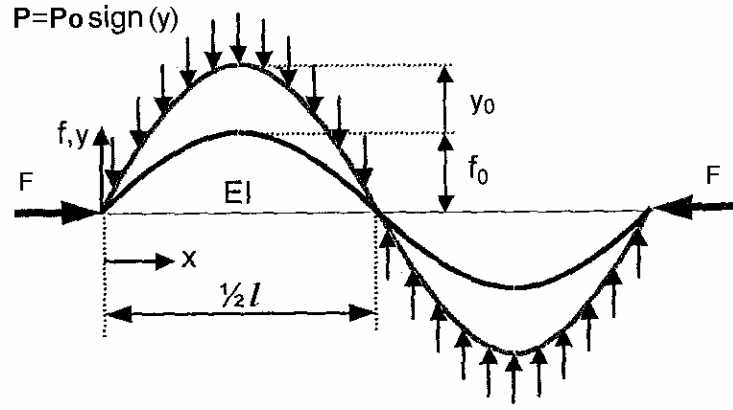


Şekil 7.4 Değişken yanal kayma direnci durumunda burkulma diyagramı (Esveld, 2001).

Şekil 7.4'te görüldüğü gibi hatalı yol uzunluğu ile eksenel basınç kuvveti arasında bir ters orantı vardır. Hatalı yol uzunluğu değeri büyüdükçe eksenel basınç kuvveti azalmaktadır. Yani kritik yol uzunluğu arttıkça yolun mukavemeti azalmakta ve daha küçük eksenel basınç kuvveti değerlerinde burkulabilmektedir. β orantı sabiti için elde edilen eğri de kalın şekilde gösterilmiştir.

Demiryolunda iki önemli faktör hesaba katılırken dikkat edilmelidir. Birincisi, yol çerçevesi ile balast yatağı arasındaki sürtünmenin doğurduğu YKD sınırlayıcı bir değerdir. İkincisi, yol gerçekte hiçbir zaman mükemmel düzlükte değildir. Bu yüzden bu bölümde kullanılan yöntem daha gerçekçidir.

EI_φ , eğilme rijitliği ile yol çerçevesinin yatay yöndeki eğilme rijitliği kastedilmektedir. Bu rijitlik rayların, traverslerin ve bağlantı elemanlarının eğilme rijitliğini kapsamaktadır. Ayrıca bu EI_φ değerinin sabit olduğu varsayılmaktadır. Yolun da başlangıçta sinüsoidal bir yol hatasına sahip olduğu kabul edilmektedir (Şekil 7.5) (Esveld, 2001).



Şekil 7.5 Yanal kayma direncinin sabit olması durumunda burkulma şekli (Esveld, 2001).

$$f = f_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \quad (7.44)$$

Ayrıca burkulma kuvveti F' den dolayı oluşan ilave eğilmenin de sinüsoidal şekilde olduğu kabul edilmektedir.

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi x}{l} \quad (7.45)$$

Son olarak da burkulma sırasında burkulma kuvveti (F) ve burkulma dalga boyu (l)'nin sabit kaldığı varsayımı yapılmıştır.

Bütün bu koşullar altında enerji denklemleri bir önceki bölümdeki gibi yazılır:

1. Kirişin eğilme enerjisi (U_e):

$$U_e = 2 \int_0^{l/4} EI y''^2 dx = \frac{ly_0^2 EI}{4} \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 \quad (7.46)$$

2. YKD'nin deformasyon enerjisi (U_{yD}):

$$U_{yD} = 4 \int_0^{l/4} P_0 y dx = \frac{2P_0 y_0 l}{\pi} \quad (7.47)$$

3. Basınç kuvvetinin yaptığı iş (W_b):

$$W_b = 2 \int_0^{l/4} F \left[(y' + f')^2 - f'^2 \right] dx = \frac{Fl}{4} \left[(y_0 + f_0)^2 - f_0^2 \right] \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \quad (7.48)$$

Birim dalga boyu için toplam enerji:

$$U_T = \frac{l}{4} \left[y_0^2 EI \left(\frac{2\pi}{l} \right)^4 + \frac{8P_0 y_0}{\pi} - F \left[(y_0 + f_0)^2 - f_0^2 \right] \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \right] \quad (7.49)$$

Bulunan bu denklemin y_0 'a göre kısmi türevi alınarak sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{\partial U_T}{\partial y_0} = 0 \quad (7.50)$$

$$F = \frac{y_0}{y_0 + f_0} \left[\frac{4\pi^2 EI}{l^2} + \frac{P_0 l^2}{\pi^3 y_0} \right] \quad (7.51)$$

eşitliği elde edilir.

Bu aşamada $\frac{\partial F}{\partial l} = 0$ yazıldığı takdirde kritik burkulma boyu “ l_{kr} ” aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$l_{kr}^2 = 2 \sqrt{\frac{\pi^5 f_0 EI}{P_0}} \quad (7.52)$$

$l_{kr} \text{ (mm)}$: Kritik burkulma boyu

$E \text{ (N / mm}^2\text{)}$: Ray çeliğinin elastisite modülü

$I \text{ (mm}^4\text{)}$: İki rayın atalet momenti

$P_0 \text{ (N/mm)}$: Sabit yanal kayma direnci

$f_0 \text{ (mm)}$: Başlangıç yol hatası

Kritik eksenel basınç kuvveti ise (7.53) eşitliği ile elde edilir;

$$F_{kr} = 2 \sqrt{\frac{P_0 EI}{\pi f_0}} \quad (7.53)$$

$F_{kr} \text{ (N)}$: Kritik eksenel basınç kuvveti

$E \text{ (N / mm}^2\text{)}$: Ray çeliğinin elastisite modülü

$I \text{ (mm}^4\text{)}$: İki rayın atalet momenti

$P_0 \text{ (N/mm)}$: Sabit yanal kayma direnci

$f_0 \text{ (mm)}$: Başlangıç yol hatası

F_{kr} değeri, basınç kuvveti olan F 'nin, birim dalga boyu için burkulmaya neden olan en küçük değeridir.

Önceki bölümdeki gibi denge hali:

$$\frac{\partial^2 U_T}{\partial y_0^2} > 0 \quad (7.54)$$

olması durumunda sağlanır. Buna bağlı olarak, eksenel basınç kuvveti (F) için aşağıdaki eşitlik yazılır;

$$F < \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad (7.55)$$

$F (N)$: Eksenel basınç kuvveti

$l (mm)$: Hatalı yol uzunluğu

$E (N/mm^2)$: Ray çeliğinin elastisite modülü

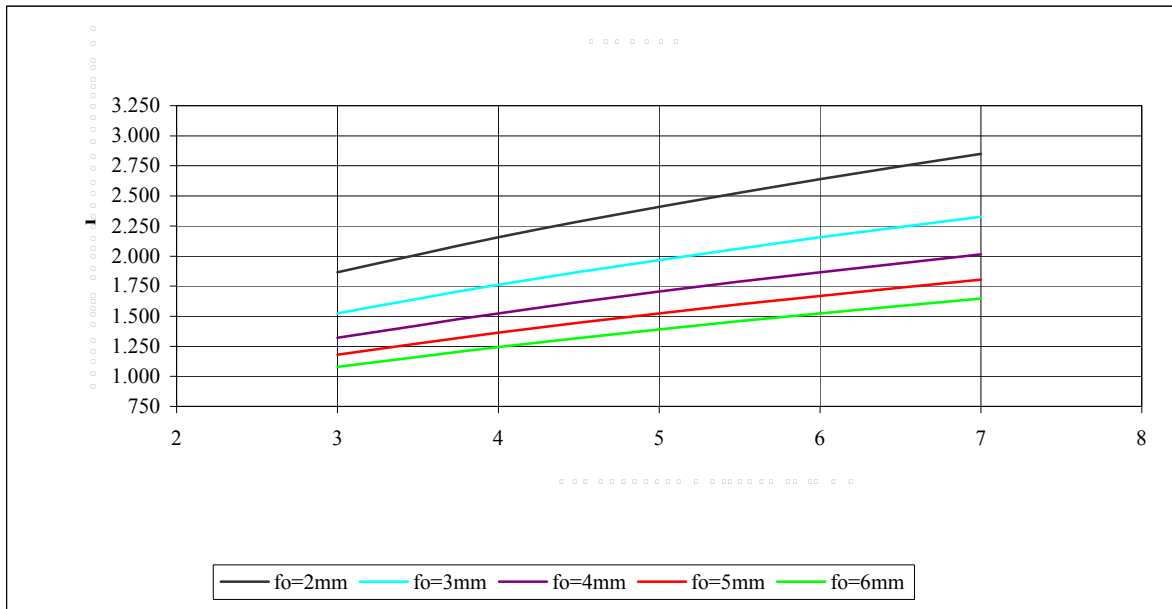
$I (mm^4)$: İki rayın atalet momenti

Bu sonuç, stabil bir denge durumunun olması için eksenel kuvvet F 'nin, *Euler* burkulma kuvvetinden küçük olması gerektiğini göstermektedir.

§ İ (F_{kr})

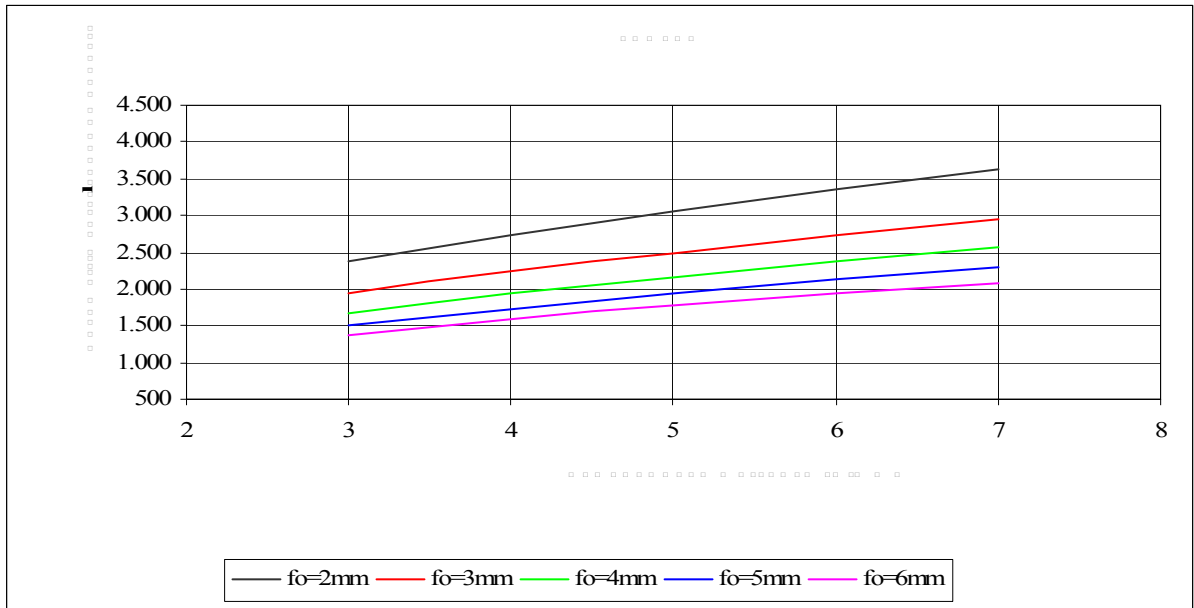
Esveld hesap yöntemine göre; *kritik aksenal basınç kuvveti* (F_{kr}) ve *yanal kayma direnci* (P) değerlerinin *yol hatası* (f) ve *ray kesitine* (*ray tipi: A_r*) bağlı olarak değişimleri Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'deki grafiklerle gösterilmiştir.

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Devamlı sinüs eğrisi (Şekil 7.5)



Şekil 7.6 Başlangıç yol hatasının (f_0), yanal kayma diti

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Devamlı sinüs eğrisi (Şekil 7.5)



Şekil 7.7 Başlangıç yol hatasının (f_0), yanal kayma direnci (P) ve kritik eksenel basınç kuvvetine (F_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de görüldüğü gibi toplam yol hatası (f) büyüdükçe, kritik eksenel basınç kuvveti (F_{kr}) küçülmektedir. Yani açıkça anlaşılabileceği üzere; yol hatasının büyüklüğünün yolun burkulmadan mukavemet edebileceği kritik eksenel basınç kuvveti üzerinde olumsuz bir etkisi vardır.

Bu gibi büyük yol hatası olan kesimlerde özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında eksenel basınç kuvvetinin de artması ve raydaki gerilimi yükseltmesi ile, taşıt

titreşimlerinin tetikleyici etkisi birleşince demiryollarında burkulmaların meydana gelmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

Esveld yönteminde dikkat çeken husus, eğrilerin diğer iki yöntemle oranla, oldukça aşağıda oluşmasıdır. Bunun anlamı, bu yöntemin oldukça güvenli bölgede kalan sonuçlar verdiğidir.

Bununla birlikte, UIC 60 rayının S 49 rayına olan üstünlüğü Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 karşılaştırıldığında görülebilmektedir. UIC 60 rayının grafiğinde eğriler daha yukarıda oluşmuştur. Yani UIC 60 rayının kritik eksenel basınç kuvveti değerleri (F_{kr}) daha büyüktür.

Buradaki hesaplamalarda da Meier yöntemindekine benzer şekilde bağlantı elemanlarının yol çerçevesinin toplam direncine etkisi Meier'in öngördüğü gibi rayın atalet momenti değerinin artırılması yoluyla dikkate alınmıştır (Bakınız Çizelge 5.1). Ayrıca demiryolunda betonarme travers kullanıldığı varsayılarak Çizelge 5.1'den ilgili değerler alınmıştır.

eksenel kuvvetlere burkulmadan mukavemet edebilmektedir.

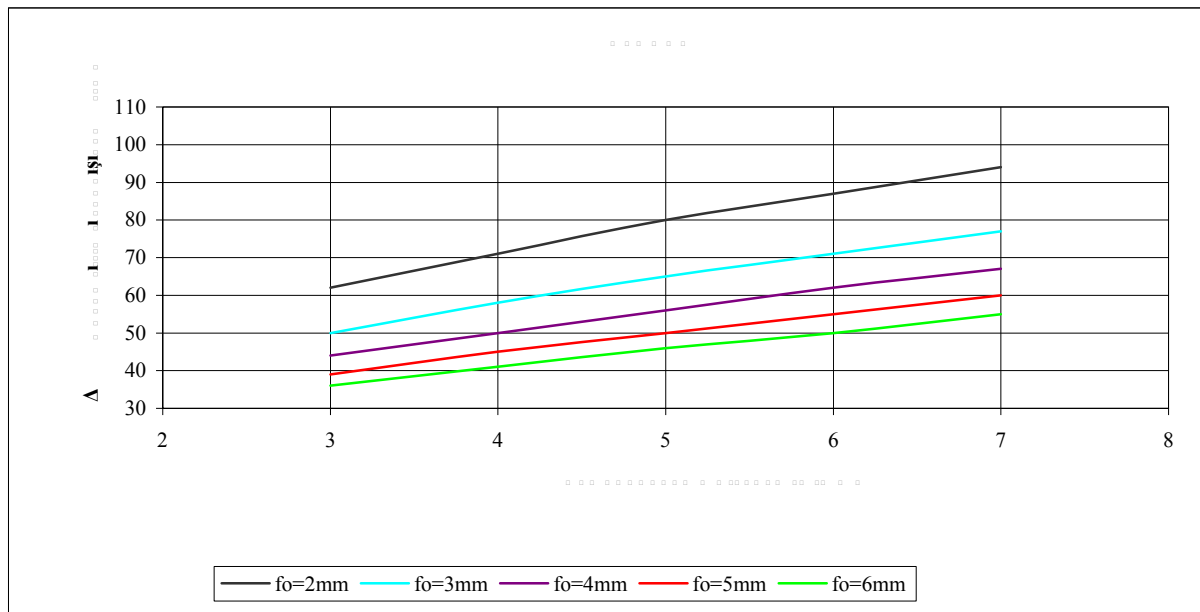
Buradaki hesaplamalarda da Meier yöntemindekine benzer şekilde bağlantı elemanlarının yol çerçevesinin toplam direncine etkisi Meier'in öngördüğü gibi rayın atalet momenti değerinin artırılması yoluyla dikkate alınmıştır (Bakınız Çizelge 5.1). Ayrıca demiryolunda betonarme travers kullanıldığı varsayılarak Çizelge 5.1'den ilgili değerler alınmıştır.

Şekil 7.9: ΔT_{kr} ve P değerlerinin f ve A_r ile değişimleri

Esveld hesap yöntemine göre; *kritik sıcaklık artışı* (ΔT_{kr}) ve *yanal kayma direnci* (P) değerlerinin *yol hatası* (f) ve *ray kesitine* (ray tipi: A_r) bağlı olarak değişimleri Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'deki grafiklerle gösterilmiştir.

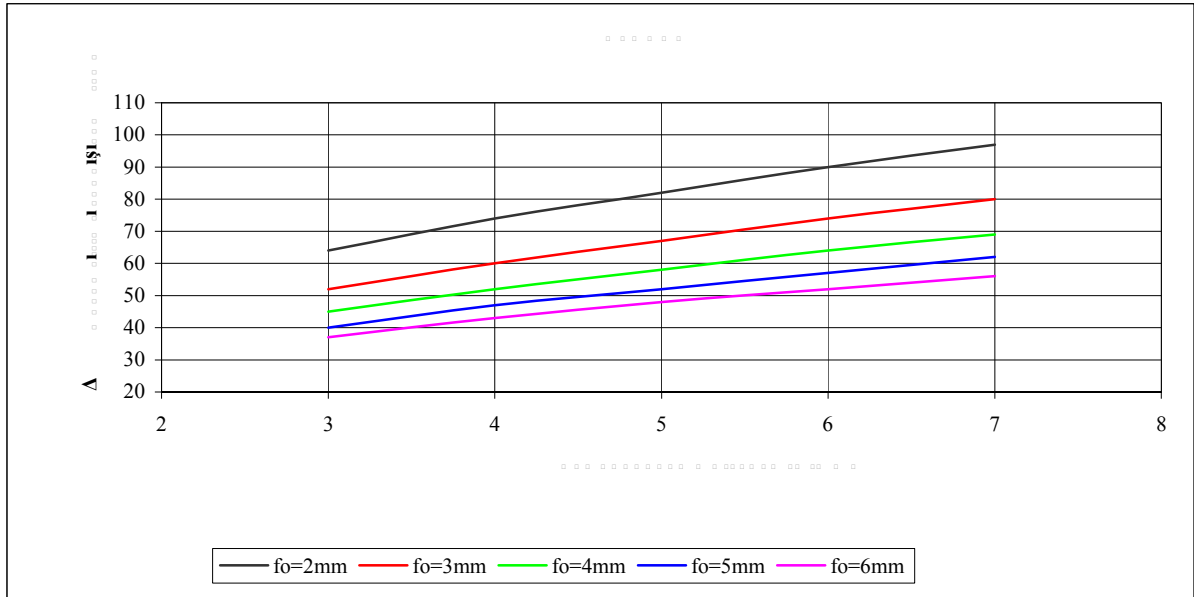
11f

Ray tipi	: S 49
İki rayın kesit alanı	: 12.500 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $8.680.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Devamlı sinüs eğrisi (Şekil 7.5)



Şekil 7.9 Başlangıç yol hatasının (f_0), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-S 49 rayı.

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: Değişken
Yol hata formu	: Devamlı sinüs eğrisi (Şekil 7.5)



Şekil 7.10 Başlangıç yol hatasının (f_0), yanal kayma direnci (P) ve kritik sıcaklık artışına (ΔT_{kr}) etkisi-UIC 60 rayı.

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de görüldüğü gibi toplam yol hatası (f) büyüdükçe, kritik sıcaklık artış değeri (ΔT) küçülmektedir. Yani açıkça anlaşılabileceği üzere, yol hatasının büyüklüğünün yolun stabil kalabileceği sıcaklık aralığı üzerinde olumsuz bir etkisi vardır.

Bu gibi büyük yol hatası olan kesimlerde özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında aksenal basınç kuvvetinin de artması ve raydaki gerilimi yükseltmesi ile, taşıt titreşimlerinin tetikleyici etkisi birleşince demiryollarında burkulmaların meydana gelmesi

kaçınılmaz hale gelmektedir.

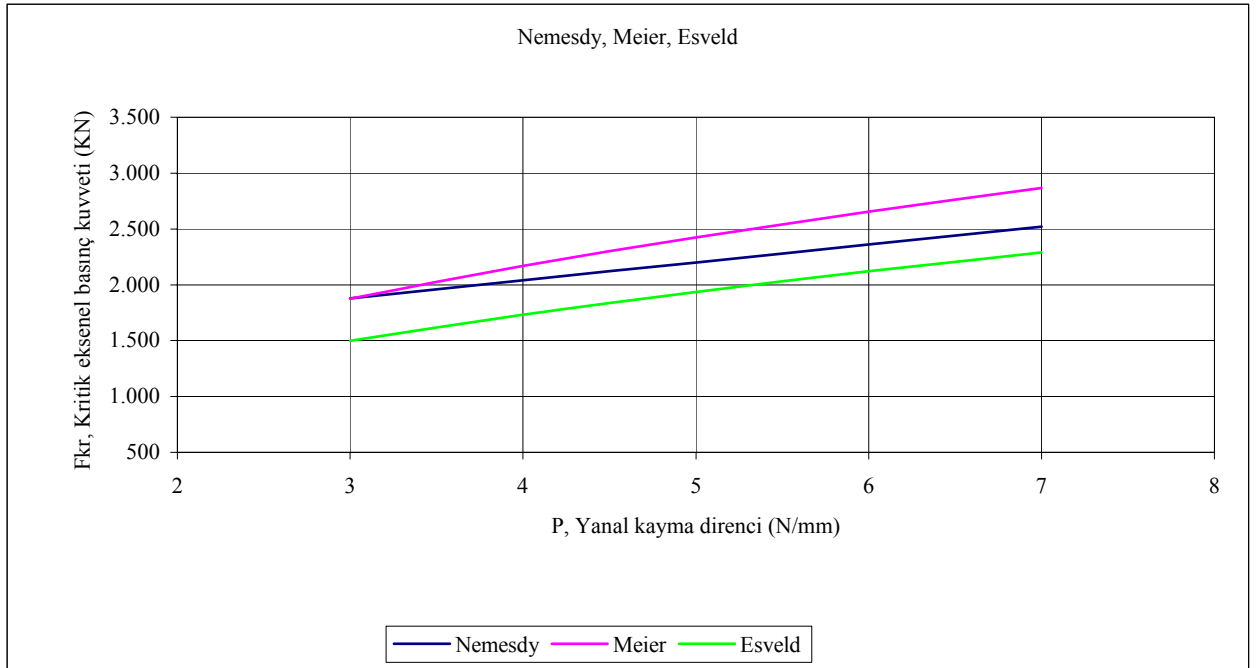
Esveld yönteminde dikkat çeken husus, eğrilerin diğer iki yönteme oranla, oldukça aşağıda oluşmasıdır. Bunun anlamı, bu yöntemin oldukça güvenli bölgede kalan sonuçlar verdiğidir.

Bununla birlikte, UIC 60 rayının S 49 rayına olan üstünlüğü Şekil 7.6 ve Şekil 7.7 karşılaştırıldığında, diğer yöntemlerde olduğu gibi fazla bir fark görülememektedir. Ancak UIC 60 rayının grafiğinde eğriler, çok az da olsa, daha yukarıda oluşmuştur. Yani UIC 60 rayının kritik sıcaklık artış değeri daha büyüktür.

 er evesinin toplam direncine etkisi Meier'in  ng rd   gibi rayın atalet momenti değerinin artırılması yoluyla dikkate alınmıştır (Bakınız  izelge 5.1). Ayrıca demiryolunda betonarme travers kullanıldığı varsayılarak  izelge 5.1'den ilgili değerler alınmıştır.

İ Ş Ş

Ray tipi	: UIC 60
İki rayın kesit alanı	: 15.380 mm^2
İki rayın atalet momenti	: $10.260.000 \text{ mm}^4$ (Nemesdy için) $14.000.000 \text{ mm}^4$ (Meier ve Esveld için, Çizelge 5.1)
Ray çeliğinin elastisite modülü	: $2,1.10^5 \text{ N/mm}^2$
Ray çeliğinin genleşme katsayısı	: $1,2.10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Travers aralığı	: 600 mm
Hatalı yol uzunluğu	: 12.000 mm
Kurp yarıçapı	: Düz yol
Başlangıç yol hatası	: 5 mm
Toplam yol hatası	: 20 mm
Yol hata formu	: Çift taraflı sinüs burkulma eğrisi - (Meier) : B (Bakınız Çizelge 6.2) - (Nemesdy) : Devamlı sinüs eğrisi (Şekil 7.5) - (Esveld)



Şekil 8.1 Yöntemlerin karşılaştırılması.

Şekil 8.1’de şimdiye kadar incelediğimiz üç yöntem olan Meier, Nemesdy ve Esveld yöntemlerinin bir karşılaştırması görülmektedir. Yol hata şekli olarak mümkün olan en benzer şekiller kullanılmıştır. Meier’de çift taraflı sinüs eğrisi formu, Nemesdy de Çizelge 6.2’deki B hata formu, Esveld’de ise devamlı sinüs eğrisi formu kullanılmıştır.

İlk bakışta en güvenli yöntemin Esveld yöntemi olduğu görülmektedir. En düşük kritik aksenal basınç kuvveti değerleri Esveld yönteminde elde edilmiştir. En ekonomik sonuçlar veren yöntem olarak ise Meier yöntemi göze çarpmaktadır. Yani aynı şartlarda en iyi değerleri Meier vermektedir. En büyük kritik aksenal basınç kuvveti değerleri Meier yönteminde elde edilmiştir. Nemesdy yönteminin ise bu iki yöntemin arasında kalan sonuçlar verdiği görülmektedir.

Meier yönteminde bağlantı elemanlarının dirençleri rayların atalet moment değerleri artırılarak dolaylı yoldan hesaba katıldığından, daha detaylı bir yöntem olan Nemesdy yöntemine oranla daha büyük (F_{kr}) değerleri elde edilmektedir. Meier yönteminde kullanılan rayların atalet moment değerlerini artırma yöntemi hesap aşamasında kolaylık sağlamasına karşın Şekil 8.1’de görüldüğü gibi nispeten büyük değerler vermektedir.

Esveld yönteminde de tıpkı Meier yönteminde olduğu gibi bağlantı elemanlarının dirençleri rayların atalet momenti artırılarak hesaba katılmıştır.

Nemesdy yönteminde ise demiryolu elemanlarının dirençleri doğrudan ve ayrıntılı bir şekilde hesaplandığı için daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu yöntemde elde edilen değerler diğer iki yöntemdekilerin arasında kalmaktadır. Ayrıca YKD’nin düşük değerleri için Meier yönteminin Nemesdy yöntemi ile oldukça benzer sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 8.1). Bunun nedeni olarak demiryolunun stabilitesindeki en önemli parametre olan YKD küçüldüğünde diğer parametreler olan ray ve bağlantı elemanlarının özellikleri öne çıkması gösterilebilir. Şöyle ki; Meier yönteminde yapılan rayın atalet moment değerinin artırılması işlemi YKD’nin küçük olduğu durumlarda daha önemli ve etkili olmakta ve hesaplanan değerleri daha fazla etkilemektedir. Bu yüzden düşük YKD değerlerinde Meier ve Nemesdy yöntemleri benzer sonuçlar vermektedir.

İ

Bu çalışmada, “Uzun Kaynaklı Demiryolu Hatlarında Yanal Stabilité” başlığı altında üç yaygın yöntem olan Meier, Nemesdy ve Esveld yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemlerin esasları ve önemli parametrelerin değişimi, hazırlanan çeşitli grafiklerle incelenmiş, çözümde kullanılan hesap yöntemleri ve formüllerinin çıkarılması ise ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Ayrıca hesaplamalarda kullanılan bazı sabit değerlerin yer aldığı çizelgeler de, kaynakları belirtilerek hesap aşamasında kullanılmak üzere bu tez çalışmasına dahil edilmiştir.

Meier yönteminde yolun eğilme rijitliği bir bütün olarak ele alınmıştır. Bağlantı elemanlarının sağladığı rijitlik ayrıca hesaplanmamıştır. Ancak bağlantı elemanlarının stabiliteye etkisi tamamen göz ardı edilmediği gibi rayların rijitliği vasıtası ile hesaplara dahil edilmiştir (Çizelge 5.1). Bununla birlikte, yanal kayma direncinin sabit olduğu varsayımı yapılmış ve yol hatasının şeklinin de sinüs eğrisi şeklinde olduğu kabul edilmiştir. Gerçekte ise yanal kayma direnci bu tez çalışmasında incelendiği bütün yol boyunca sabit bir değer almamaktadır. YKD, yolun gerek altyapı gerekse üstyapı özelliklerine göre değişimler gösterebilmektedir. Yol hatasının en çok rastlanan formu sinüs eğrisi olmakla birlikte başka formlarda burkulmalar da gözlenebilmektedir. Örneğin Nemesdy yönteminde en çok rastlanan dört hata formu kullanılarak analiz yapılmıştır.

Nemesdy yönteminde ise yolun eğilme rijitliği incelenirken analiz iki bölüme ayrılmıştır. Bunlar; iki rayın eğilme rijitliği ve bağlantı elemanlarının dönme direncidir. Buradan anlaşıldığı gibi bağlantı elemanları Meier yönteminden farklı olarak ayrı bir şekilde ele alınmış, bu da daha gerçekçi bir sonuç vermiştir. Ayrıca yanal kayma direnci değişken olarak ele alınmıştır. Aynı şekilde bu da oldukça gerçekçi bir yaklaşım olarak göze çarpmaktadır. Yol hatasının kabulünde ise pratikte en çok rastlanan dört tip yol hatasından birisi seçilmiştir. Meier yönteminden farklı olarak, bu yöntemde gerek bağlantı elemanlarının dirençlerinin ayrı olarak hesaba katılması, gerekse yol hatasının daha ayrıntılı ele alınması sebebiyle, Nemesdy yöntemi daha hassas ve ekonomik sonuçlar vermektedir. Meier yöntemi ise daha ziyade güvenli bölgede kalmaktadır.

Esveld de uzun kaynaklı yollarda burkulma olayını incelerken diğer iki yöntem gibi enerji yöntemlerinden yola çıkmıştır. Bu yöntemde de bağlantı elemanlarının dönme direnci özel olarak hesaba katılmamasına rağmen bu dirençler Meier yöntemindeki gibi rayların atalet moment değerlerinin artırılması yolu ile hesaplara dahil edilmiştir (Çizelge 5.1). Yol hatalarının sinüs eğrisi şeklinde olduğu varsayımı yapılır. Ancak Esveld yönteminin diğer iki yöntemle kıyaslandığında, oldukça güvenli bölgede kalan sonuçlar verdiği, bölüm sonlarında

verilen grafikler incelendiğinde görülebilmektedir.

Bu grafiklerde, belirli özellikleri verilen bir demiryolunda, kritik eksenel basınç kuvveti, kritik sıcaklık değişimi ve yanal kayma direnci değerlerinin yol hatası, kurp yarıçapı ve ray kesitine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Her bir grafikte ilgili tespit ve yorumlar da grafiklerin hemen ardından verilmiştir.

□ □ □ □ □ □ □ □

Eisenmann, J., Mattner, L., (1988), “Gleisverwerfung. Grossversuche im Gleis und theortische Analyse”, Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 52.

Erel, A., (2004), “Demiryolu Üstyapısı” , Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları, İstanbul.

Erel, A., (2004), “Raylı Sistemlerde Yanal Stabilite”, Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları, İstanbul.

Erel, A., (1989), “Demiryollarında Üstyapı Testi ve Boyutlandırması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Esveld, C., (2001), “Modern Railway Track”, Second Edition, TU Delf University, Netherlands.

Führer, G., (1979), “Oberbauberechnung Transpress”, VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin.

Ovacıklıoğlu, A., (1991), “Demiryolu Üstyapısının Yanal Stabilitesi (Uzun Kaynaklı Yollarda)”, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

www.volpe.dot.gov/sdd/docs/buckling.pdf

□ □ □ **İŞ** □

Doğum tarihi	05.06.1980	
Doğum yeri	Erzurum	
E-posta	fevzi25@gmail.com	
Lise	1992-1998	Erzurum Anadolu Lisesi
Lisans	1998-2003	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Programı

İŞ İĞİ □ □ □ □ □ □ □ □

2003-2004	Polat Yol Yapı San. Tic. A.Ş.
2004-2005	Uğur Mühendislik İnş. Elek. Tic. San. Ltd. Şti.
2005-Devam ediyor	Sigma International Inc.