

Türkiye Şartları için Uygun Tren Direnci Formüllerinin Belirlenmesi

Beytullah Başeğmez

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Mayıs 2018

Determination of Suitable Formulas for the Train Resistance to Railway Conditions in
Turkey

Beytullah Başığmez

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Railway Systems

May 2018

Türkiye Şartları için Uygun Tren Direnci Formüllerinin Belirlenmesi

Beytullah Başeğmez

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Raylı Sistemler Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Araç Tasarım Mühendisliği Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömür Akbayır

Mayıs 2018

ONAY

Raylı Sistemler Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Beytullah Başeğmez'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Türkiye Şartları için Uygun Tren Direnci Formüllerinin Belirlenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ömür Akbayır

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Kemal Keskin

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Muammer Akçay

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya ve Dr. Öğr. Üyesi Ömür Akbayır danışmanlığında hazırlamış olduğum “Türkiye Şartları için Uygun Tren Direnci Formüllerinin Belirlenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 04/05/2018

Beytullah BAŞEĞMEZ

İmza

ÖZET

Türkiye koşullarına en uygun tren direnci (vagon seyir direnci) formülünün tespit edilmesi amacını taşıyan bu tezde, tren dirençlerinin tanımlanmasının ardından literatürdeki kurp ve vagon seyir direnci formüllerine yer verilmiştir. Türkiye’de TCDD 3. ve 7. bölgelerinde sekiz farklı hat kesiminde TCDD tarafından gerçekleştirilen deneylere ilişkin veriler, bu deneyde kullanılan trenlerin özellikleri ve deneylerin uygulandığı demiryolu şartları, literatürde yer verilen 22 adet formüle uygulanmış; gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde ortaya çıkan tren direnci sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada ortaya çıkan farkların ortalamaları, çeşitli tren direnci formüllerine göre % 3 ila % 13 arasında değişmektedir. Buradan hareketle, Avustralya demiryollarının dolu yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülünün en düşük sapmaya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu formül Türkiye demiryollarına en uygun vagon seyir direnci formülü olarak önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Taşımacılık, Demiryolu, Yük Vagonu, Taşıt Hareketine Karşı Direnç Kuvvetleri, Tren Direnci, Seyir Direnci, Tren Direnci Formülleri, Vagon Seyir Direnci Formülleri

SUMMARY

This study has been undertaken to determine suitable train resistance (wagon running resistance) formulas for the railroads in Turkey. Initially, the train resistances are defined, and the formulas that have been developed for the curve resistance and running resistance are presented. The experimental data was provided by TCDD that have been recorded by TCDD over 8 line segments in the 3rd and 7th regions of the national railroad system. The characteristics of the railroad and the rolling stock sets are used to calculate the train resistance according to 22 train resistance formulas. Actual measurements and calculated train resistances are compared. The averages of the differences between the calculated values and the measured values range from 3% to 13%. The formula that provides the smallest average difference is the Australian Railway's formula for the full merchandise wagons. This formula has been recommended for the Turkish railroads train (wagon running) resistance.

Keywords: Energy, Transportation, Railway, Freight Car, Resistance Forces Against Vehicle Movement, Train Resistance, Running Resistance, Train Resistance Formulas, Wagon Running Resistance Formulas.

TEŐEKKÖR

Bu tezin hazırlanması sürecindeki önemli katkılarından, rehberliklerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Hasan Hüseyin ERKAYA ve Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKBAYIR'a, önemli katkılarından dolayı TCDD Kapasite Yönetim Dairesi yüksek mühendislerinden Sayın Şükrü Tayfun KAYA'ya ve beraberindeki ekibe teşekkürlerimi bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TREN DİRENÇLERİ	2
2.1. Tren Direnci Türleri	4
2.1.1. Seyir direnci	4
2.1.1.1. <u>Yuvarlanma direnci</u>	6
2.1.1.2. <u>Aerodinamik direnç</u>	8
2.1.2. Kurp direnci	9
2.1.3. Eğim direnci	10
2.1.4. İvmelendirme direnci	11
2.2. Tren Direncini Belirlemede Kullanılan Yöntemler	12
2.2.1. Salıverme enerji yöntemi	13
2.2.2. Ölçümlerden elde edilen verilerin değerlendirilmesi	14
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	16
3.1. Kurp Direnci Formülleri	16
3.2. Vagon Seyir Direnci Formülleri	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. YÖNTEM	24
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR DİZİNİ	36
EK AÇIKLAMALAR	38
Ek Açıklamalar – A: TCDD Deney Verileri	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Deneylerde kullanılan DE 36000 lokomotifi	6
2.2. Yuvarlanma direnci kaynakları	8



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tren dirençlerinin karakteristikleri	2
2.2. Tren direnci katsayılarını oluşturan etmenler	4
4.1. Hat kesimlerinin karakteristikleri ile gerçekleştirilen deneylere ilişkin veriler	24
5.1. Banaz - Nohutova hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	25
5.2. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Banaz - Nohutova hat kesimi verileri için sonuçları	26
5.3. Ekinova - Karakuyu hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	26
5.4. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Ekinova - Karakuyu hat kesimi verileri için sonuçları	27
5.5. Kütahya - Demirciören hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	27
5.6. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Kütahya - Demirciören hat kesimi verileri için sonuçları	28
5.7. Piribeyler - Gazellidere hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	28
5.8. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Piribeyler - Gazellidere hat kesimi verileri için sonuçları	29
5.9. Tavşanlı - Güzelyurt hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	29
5.10. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Tavşanlı - Güzelyurt hat kesimi verileri için sonuçları	30
5.11. Tınaztepe - Kocatepe hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	30
5.12. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Tınaztepe - Kocatepe hat kesimi verileri için sonuçları	31
5.13. Oturak - Dumlupınar hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	31
5.14. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Oturak - Dumlupınar hat kesimi verileri için sonuçları	32
5.15. Kaklık - Bozkurt hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları	32
5.16. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Kaklık - Bozkurt hat kesimi veriler için sonuçları	33
5.17. Çeşitli tren direnci formüllerinin hat kesimlerinde sapma miktarları ile sapma ortalamaları	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
P	Güç
F	Kuvvet
m	Kütle
a	İvme
V	Hız
M	Toplam kütle
m_a	Aks yükü/her bir aks başına kütle
W	Toplam ağırlık
w	Her bir aks başına ağırlık
K	Aerodinamik(hava) direnç katsayısı
R_T	Toplam direnç kuvveti
R_a	İvmelendirme direnci
R_c	Kurp direnci
R_g	Eğim direnci
R	Seyir direnci
R'	Vagon seyir direnci
R_L	Lokomotif seyir direnci
R_{as}	Muylu direnci
r	Kurp yarıçapı
n	Aks sayısı
a_L	Bojide akslar arası mesafe
e	Hat genişliği
k	Kütle faktörü
A_f	Araç ön yüz alanı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AAR	The Association of American Railroads - Amerikan Demiryolları Birliği
DB	Deutsche Bahn – Alman Demiryolları
EN	Europäische Norm - Avrupa Normları
GPS	Global Positioning System - Küresel Konumlama Sistemi
POLIMI	Politecnico di Milano - Milano Teknik Üniversitesi
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français - Fransız Ulusal Demiryolları Şirketi
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TÜLOMSAŞ	Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayii Anonim Şirketi
UIC	Union Internationale des Chemins de fer - Uluslararası Demiryolları Birliği

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Taşımacılıkta tüketilen enerji, dünyadaki toplam enerji tüketiminin %27'sini ve toplam emisyon oluşumunun da %34'ünü oluşturmaktadır (EIA, 2014). Yaşanabilir bir çevre için bu enerji tüketiminin azaltılması hedeflenmelidir. Raylı sistemlerde harcanan enerjinin asgari seviyede tutulması da bu bağlamdadır.

Türkiye'de taşımacılık talebi 2004 – 2014 yılları arasında toplamda %71,4 oranında büyümüştür. Raylı sistemlerin yük taşımacılığındaki oranının 2023'e kadar %15'e çıkarılması hedeflenmektedir, bu oran günümüzde %4,4 düzeyindedir (IEA, 2016). Artan demiryolu yük taşımacılığında oluşacak enerji sarfiyatının minimize edilmesi; gelişmişlik düzeyinin hızlı artışıyla paralel enerji talebi süratle katlanan, elektrik üretiminin önemli bir bölümü ithal kaynak kullanımına dayanan ülkemizin, kaynaklarının verimli kullanılması açısından yüksek öneme sahip olacaktır.

Trenler enerji tüketimi üzerinde yüksek etkiye sahip dinamik sistemlere ve çekiş sistemine sahiptir. Çekiş sistemi trenin ilerlemesini temin eden itme kuvvetinin üretildiği sistemdir. Demiryolu taşıtı çekiş sisteminin enerji sarfiyatına neden olan temel etken, tren dirençleridir. Trenin hareketini negatif yönde etkileyen kuvvetler toplamı, *tren direnci* olarak adlandırılmaktadır.

Belirli çalışma koşullarında ortaya çıkan tren direncinin bilinmesi; uygun lokomotif çekiş kuvvetinin hesaplanması, lokomotifin güç gereksiniminin belirlenmesi, enerji tüketimi öngörüsü ve seyir süresinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılmaktadır. Birçok ülke, sahip oldukları demiryollarında işletim sırasında ortaya çıkan tren direncini hesaplamak için kendi formüllerini geliştirmiştir. Tren direnci formülleri yardımıyla kestirilen enerji sarfiyatının azaltılması yönünde çalışmalar yapılabilmektedir. Tren direnci hesapları sonuçları, lokomotif seçimi veya tasarım/üretimi süreçlerinde başvuru verileridir. Tren direnci verilerine uygun özelliklere sahip lokomotif tercihi, enerji tüketiminin azalmasını sağlar. Tren direnci hesaplamaları incelenerek, demiryollarında iyileştirmelere gidilebilmektedir.

2. TREN DİRENÇLERİ

Trenin hareketini negatif yönde etkileyen kuvvetler toplamı, *tren direnci* olarak adlandırılmaktadır. Tren dirençleri; eğimin neden olduğu *eğim direnci*, hattaki kurlarda ortaya çıkan *kurb direnci* ve trenin salt seyahati sırasında meydana gelen *seyir direnci* olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Seyir direnci; yuvarlanma direnci, aerodinamik direnç, hattan kaynaklı dirençler ve muylu direncinin toplamını ifade eder. Çizelge 2.1’de tren direncini oluşturan direnç türleri ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tren dirençlerinin karakteristikleri (Kim, 2010).

Direnç kuvvetleri	Direnç türü	Özellik
<i>Ağırlıkla alakalı</i>	Yuvarlanma direnci	Ray mantarıyla tekerlek bandajı arasındaki sürtünme neticesinde oluşur Yuvarlanma katsayısına bağlıdır Tekerlek ve raydaki metalin çeşidine ve yüzey koşullarına bağlıdır
	Yol direnci	Hattın rijitliği ve yüklemeler nedeniyle ortaya çıkan sehim ve geri bükme neticesinde oluşur
	Muylu direnci	Her bir aksın sonundaki muyluda oluşan sürtünme neticesinde oluşur
<i>Hızla alakalı</i>	Hava direnci	Hızın karesi ve ön kesit alanı ile değişir ($C \cdot A \cdot V^2$) Burada C ampirik katsayı, V hız, A ön kesit alanıdır
<i>Kurpla alakalı</i>	Kurp direnci	Kurp nedeniyle tekerlek bandaj ve flanşı ile ray mantarı ve ray boşluklarındaki ray köşeleri arasında oluşan sürtünmeler
<i>Eğimle alakalı</i>	Eğim direnci	Çalıştırılabilen tren sayısı ve çekiş gücünü etkiler.

Temel tren hareket denklemi (2.1), tren hızı ve zaman arasındaki ilişki ile tanımlanır, tren bir kütle noktası olarak modellenir. (Montrone vd., 2017).

$$F_T - R_T(V) = m \cdot k \cdot a \quad (2.1)$$

Burada F_T , çekiş kuvveti (N) ve $R_T(V)$, hıza bağı tren direnci kuvvetidir (N). V, m, a sırasıyla trenin hızı (m/s), kütlesi (kg) ve ivmesidir (m/s²). k , trenin döner aksamı dikkate alınarak belirlenen kütle faktörüdür.

Trenin hareketi için gerekli mekanik enerji;

$$E = \int_0^t P(t) \cdot dt \quad (2.2)$$

Burada $P(t)$, t anındaki mekanik güçtür (W). $P(t) = F_T(t) \cdot V(t)$ dir ve trenin çalışma rejimine bağlıdır. Enerji tüketiminden yola çıkarak dört farklı çalışma rejimi ortaya çıkar;

1) Hızlanma fazı: Motora maksimum gücün verildiği fazdır.

$$F_T = F_M(V), P = F_M(V) \cdot V \quad (2.3)$$

$$a = [F_M(V) - R_T(V)] / m \cdot k \quad (2.4)$$

Burada $F_M(V)$, treni V hıza getiren maksimum çekiş kuvvetidir (N).

2) Sabit hız fazı: Tren sabit hızda hareket eder; ivmelenme sıfırdır.

$$F_T = R_T(V), P = R_T(V) \cdot V \quad (2.5)$$

3) Rölanti fazı: Motor durdurulur, tren ataletiyle hareket eder; mekanik enerji sıfırdır.

4) Yavaşlama fazı: Acil yavaşlama gereği ya da maksimum çalışma hızına ulaşılması nedenleriyle tren frenlenir. Bu fazda da mekanik enerji sıfırdır (Montrone vd., 2017).

Tren direnci formülünün en genel hali, aşağıdaki şekildedir;

$$R_T = A + B \cdot V + C \cdot V^2 + R_c \pm R_g \quad (2.6)$$

Burada;

A: Boji yapısı, aks yükü, tren içi sürtünmelere bağlı statik ve dinamik dirençler (N)

B: Tekerlek-yol temasındaki flanş sürtünmesi, süspansiyon sönümleme ve hava direncinin hava momenti gibi ikinci derece olmayan kısmı (N.s/m)

C: Trenin başı ve sonunda, tünellerde oluşan aerodinamik direnç, türbülans nedeniyle ortaya çıkan ek kuvvet ($N.s^2/m^2$)

V: tren hızı ve rüzgardan kaynaklı ek hız (m/s)

R_c : Kurp direnci (N)

R_g : Demiryolunun eğiminden kaynaklı eğim direnci (N) (Rangelov, 2012).

Yukarıda en genel haliyle belirtilen tren direnci formülündeki (2.6) katsayılar olan **A**, **B**, **C** terimlerine etki eden direnç türlerinin neler olduğu Çizelge 2.2’de verilmiştir. Farklı çalışmalarda aynı formdaki formülün katsayıları, oluşan dirençlerin özgünlüğü nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Bu hususa literatür araştırması bölümünde geniş yer verilmiştir.

Çizelge 2.2. Tren direnci katsayılarını oluşturan etmenler (AREMA, 1999).

A terimi	B terimi	C terimi
Muylu direnci	Bandaj sürtünmesi	Tren başında ve sonundaki rüzgar basıncı
Yuvarlanma direnci	Bandaj etkisi	Tren yüzey kaplama sürtünmesi
Yol direnci	Yalnız tekerlek-ray arasındaki yuvarlanma direnci	Trenin gerisinde oluşan aerodinamik direnç
	Rayın dalga hareketi	Diğer demiryolu taşıtıyla aralarında oluşan türbülans
		Savrulma açısı

2.1 Tren Direnci Türleri

2.1.1 Seyir direnci

Hıza bağlı dirençlerden oluşan seyir dirençleri, iki temel bileşenden oluşur. Bunlar; tren sisteminin hareketinde dönen mekanik parçaların sürtünmelerinden meydana gelen dirençler ile aerodinamik dirençtir (Urlu, 2015).

Raylar üzerinde hareket eden trenin tekerlek yükleri, aks sayısına bağlı olarak aks muylusunun aks kutusu içerisindeki sürtünmesinden kaynaklanır. Bu sürtünme direnci, sürtünen malzemenin fiziksel, kimyasal, metalografik özelliklerine ve dış hava sıcaklığına bağlıdır. Bu direnç muylu direnci olarak da adlandırılır ve A katsayısı ile tanımlanır (Urlu, 2015).

Tekerleklerin raylar üzerinde hareketinde bandaj profili ve ray profilinin karşılıklı sürtünmesinden kaynaklanan bir direnç meydana gelir. Bu dirence mekanik hareketlilik ve araçların dikey ve yatay titreşimlerinden kaynaklanan kayıpları da ilave etmek gerekir. Bu dirençler aracın hızına bağlı olarak BV şeklindeki doğrusal bir fonksiyona göre taşıt kütlesiyle doğru orantılıdır (Urlu, 2015).

Yukarıdaki bilgiler çerçevesinde genel seyir direnci formülü şu şekildedir;

$$R = A + B.V + C.V^2 \quad (2.7)$$

Demiryolu taşıtının seyir direnci, çeken ve çekilen araçlar için aynı formül uygulanarak hesaplanabildiği gibi bazı kurumlar tarafından daha doğru sonuçlar için çeken araçların seyir direncinin ayrıca hesaplanması yoluna gidilmiştir. Şekil 2.1’de deneylerde kullanılan DE 36000 lokomotifini görülmektedir. Lokomotifin üretici firması tarafından geliştirilen seyir direnci formülü şu şekildedir;

$$R_L = 6,4 + 129.n_L/W_L + 0,0914.V + 0,0443.A_f.V^2/W_L \quad (2.15)$$

Burada R_L , N/t olarak seyir direnci, W_L , lokomotifin ağırlığı, n_L , lokomotifin dingil sayısı, V km/h cinsinden hız ve A_f ön yüz alanıdır (GE, 2011).

Vagon seyir direncini hesaplamak için kullanılan formüllere, literatür araştırması bölümünde geniş yer verilmiştir.



Şekil. 2.1. Deneylerde kullanılan DE 36000 lokomotifi

2.1.1.1 Yuvarlanma direnci

Teorik olarak tekerleğin raya dokunma yüzeyi sonsuz küçük bir yüzey olmalıdır. Ray malzemesinin mukavemeti, bu yüzeye etkileyen basıncı taşıyamaz ve tekerlek raya gömülür. Tekerlek raya gömülü vaziyette ray üzerinde dönerken, ray malzemesi tekerlek önünde elastik deformasyona uğrar. Deformasyon bölgesindeki iç sürtünmelerin oluşturduğu bir bileşke kuvvet sürekli olarak harekete ters yönde etkir, bu kuvvet yuvarlanma direnç kuvveti olarak adlandırılır (İTÜ, 2006).

Toplam yuvarlanma direnci;

- Düşük etkisi olan ve oldukça sabit değere sahip salt yuvarlanma sürtünmesi,
- Ray bağlantılarının düzensizliklerinden dolayı oluşan, büyük ve değişken etkiye sahip bağlantı sürtünmesi,
- Bojilerin uyumsuzluğundan ve salınımından ve sarsılmadan kaynaklı, büyük ve fazlasıyla düzensiz etkiye sahip boden sürtünmesi
- Oldukça değişken ve bazı durumlarda yüksek etkiye sahip, yolun eğrilikleri ve düzensizlikleri nedeniyle yerçekimine karşı yapılan çalışmadan kaynaklanır (Booze ve Clarke, 1912).

Yuvarlanma direnci, tekerleğin konikliği sebebiyle rayda kaymasından etkilenir. Tekerleğin rayda kayma/kızaklaması; tekerleğin ve rayın malzeme özelliklerine, birikinti katmanına, rayın ve tekerleğin bakım durumuna ve tekerlekteki dinamik yüke bağlı olarak ortaya çıkar. Salt yuvarlanma direnci (E) aşağıdaki formülle ifade edilir; (Bernsteen vd., 1983).

$$E = (2/9) \cdot \mu \cdot \alpha \cdot X/r \quad (2.8)$$

Burada μ , kayma sürtünmesi katsayısı; α , koniklik açısı; r , tekerlek yarıçapı; X , eliptik kısalmanın ana ekseninin yarısıdır.

Yuvarlanma direncine daha geniş anlamda; aks kutusundaki sürtünmeler nedeniyle oluşan direnç (muylu direnci), hat altyapısındaki topraktaki histeresiz ve süspansiyon sistemindeki enerji kayıpları da dâhil edilebilir (Şekil 2.2). Süspansiyon kayıpları taşıt tasarımına ve yolun kalitesine bağlıdır; hız ile doğru orantılı olarak artar (Bernsteen vd., 1983).

Muylu direnci, rulmanın tipine, rulmana etkileyen dinamik kuvvetlere, yağ tipine ve sıcaklığa bağlıdır (Bernsteen vd., 1983). Aks kutusundaki rulmanda sürtünmeler nedeniyle oluşan direnç (muylu direnci) şu şekilde ifade edilebilir;

$$R_{as} = W_w \cdot \mu \cdot d/D \quad (2.9)$$

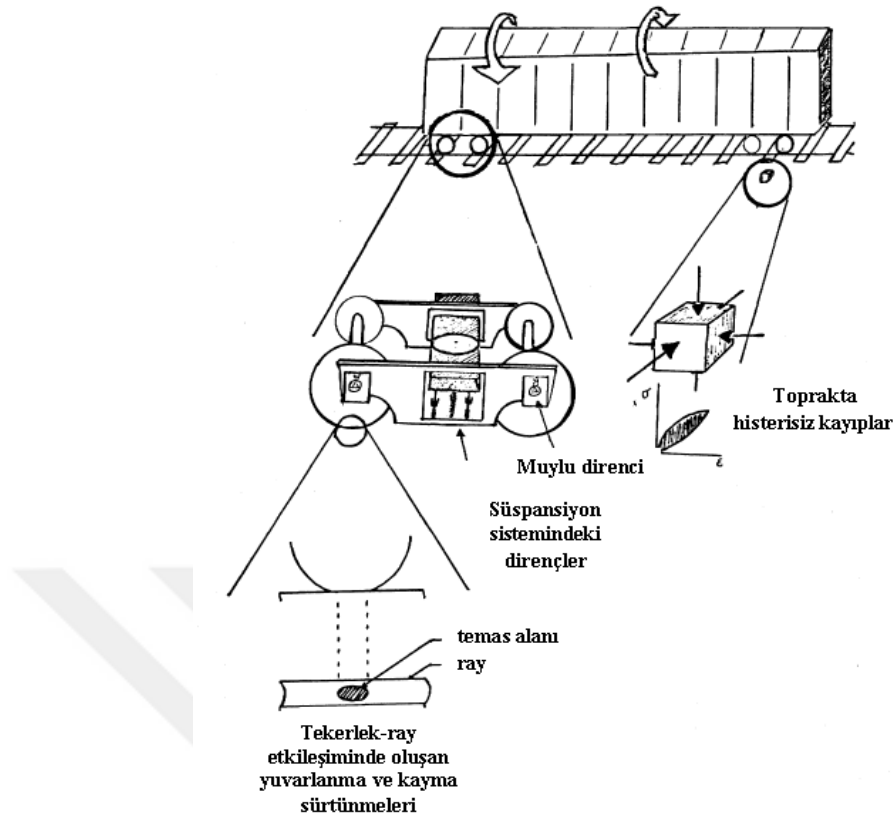
Burada; W_w vagon ağırlığı; μ , yatak sürtünme katsayısıdır. Formüldeki d , muylu; D , bandaj çapıdır. Sürtünme katsayısı değerleri şu şekildedir:

bilyeli rulman için $\mu = 0.0013$,

oynar bilyeli rulman için $\mu = 0.0008$,

silindirik makaralı rulman için $\mu = 0.0010$,

konik makaralı rulman için $\mu = 0.0018$ (İTÜ, 2006).



Şekil 2.2. Yuvarlanma direnci kaynakları (Bernsteen vd., 1983).

2.1.1.2 Aerodinamik direnç

Aerodinamik direnç, demiryolu taşıtı ön yüzey basıncı, arka tarafta oluşan vakum etkisi ve yanal türbülans sürtünmesi alt başlıklarına bölünebilir. Ön yüzey basıncı, bu başlıklar içerisinde en çok öneme sahip olan başlıktır (Booze ve Clarke, 1912).

Trenin başı ve sonundaki kayıplar, dış yüzey sürtünmesi, bojiler, çıkıntı oluşturan nesnelere, pantograflar, taşıt içine doğru boşluklar, havalı fren ve şasi altı sürtünme; aerodinamik direnç oluşturan tipik unsurlardır (Orellano ve Sperling, 2008).

Temel aerodinamik katsayılar, basınç alanı integrasyonu ile ortaya çıkan altı ana kısımdan dinamometre vasıtasıyla elde edilir. Boyutsuz aerodinamik katsayılar aşağıda verilmiştir;

$$K_{X,Y,Z} = F_{X,Y,Z} / (P_{wind} \cdot S_{ref}), K_{M_{X,Y,Z}} = M_{X,Y,Z} / (P_{wind} \cdot S_{ref} \cdot L_{ref}) \quad (2.10)$$

Kuvvetler ve momentler **X**: tren eksenine, **Y**: yanal ve **Z**: boyuna olan referans eksenlerine göre verilmiştir. Burada L_{ref} referans uzaklık (3m) ve S_{ref} referans alanıdır (10 m). P_{wind} tren tepe yüksekliğindeki dinamik rüzgar basıncıdır (Sanquer vd., 2004).

Tren tünele girdiğinde aerodinamik karakteristikler oldukça değişir, göz önüne alınması gereken dört temel faktör vardır: basınç etkisi, tünelde artan aerodinamik direnç, tünelden aynı anda birden fazla trenin geçişi ve tünel kesit alanı (Nawaz, 2015).

Aerodinamik büyüklüklerde değişim, tünel kesit alanı ve tren burun ve kuyruk biçimine bağlıdır. Tünel kesit alanı ve tren biçiminde yapılacak değişimler, aerodinamik direnci düşürebilir. Aerodinamik direncin düşürülmesi için A_f/Σ_I oranının düşürülmesi tavsiye edilir. Bu ifadede A_f , ön yüzey kesit alanı, Σ_I , efektif tünel kesit alanıdır (Nawaz, 2015).

2.1.2 Kurp direnci

Kurp ve trenin kütlesi nedeniyle oluşan dirence kurp direnci denir (Montrone vd., 2017). Kurp direnci de seyir direnci gibi ampirik formüller yardımıyla kestirilebilir. Vagonların tasarımı ve koşulları, dever eksikliği, ray profili, ray yağlaması (kurplarda direnci %50'ye varan oranda azaltabilir) ve kurp yarıçapı kurptaki trende oluşan dirence etki eder (Cole, 2006). Tren kurba girdiğinde direnci yenebilmek için ekstra kuvvet gerekir.

Direnci artıran nedenler şunlardır:

- 1) Tekerleğin rijidliği nedeniyle artar. Trenin kurp boyunca hareketi sırasında şasisi teğetsel bir pozisyon alır, bu nedenle dış tekerlek bodeni rayın iç yüzeyine sürtünür ve bu direnci artırır.
- 2) Trenin rayda patinajı da direnci artırır. Patinaj, tahriksiz aksın dış tekerlek bodeni serbest kaldığında meydana gelir, kurp yarıçapı küçükse deraya da sebep olabilir.
- 3) Rayların aşınmış olması, hattın alımanının kötülüğü ve balanssızlık gibi yol bakımsızlıkları da kurp direncini artırır.
- 4) Dever de direnci artıran bir diğer faktördür. Yetersiz dever, dış rayda aşırı basınç oluşumuna neden olur, fazla dever ise iç rayda daha fazla basınç aktarılmasına direncin artırılmasına neden olur (Nawaz, 2015).

- 5) Kurplardan geçişte iç rayda seyreden tekerlekler, yarıçaplarına uygun mesafeler kat edemezler. Bunun sonucu olarak kaymalar ve kızaklamalar meydana gelir ve dirençler oluşur.
- 6) Kurplarda, lokomotifin kancasındaki çekim kuvvetinin ray ekseninde olması, arkasındaki vagonların aynı doğrultuda olmaması kurp direncini artırıcı bir etkidir.
- 7) Kurplarda, tekerleklerin raya uyum sağlamak için dönüşlerinde, boji göbek yastıklarının ve boji göbeğinin sürtünmesinden dolayı bir direnç oluşmaktadır.
- 8) Kurplarda, araçları birbirine bağlayan cer tertibatları gerildiğinden bir direnç oluşmaktadır (MEB, 2014).

Yol geometrisi kurp direncini etkiler, hatta dışbükey ve içbükey olmak üzere iki tür kurp kullanımı söz konusudur. Dış bükey yani hattın daldırıldığı şekildeki kurpta enerji tüketimi daha düşüktür, buna karşın tümsek şekilli olduğunda da kurp çıkışında güç keserek seyir mümkün olabilir (Kim, 2010).

Kurp direncini hesaplamak için geliştirilen formüller literatür araştırması bölümünde ele alınmıştır.

2.1.3 Eğim direnci

Eğim direnci, yerçekimine karşı yapılan iş nedeniyle ortaya çıkar. Yatayla açısı α olan bir yokuş tırmanırken eğim direnci kuvveti $W \cdot \sin \alpha$ alınabilir. Burada $\sin \alpha$ yükseklik/boyuna uzaklıktır. Eğim direnci çekiş kapasitesini sınırlandırmada en önemli rolü oynar (Jain, 2013).

Demiryolu uygulamalarında düşük eğim açıları kullanılır buna göre küçük α değerleri için basitleştirirsek lineer rampa direnci kuvveti (kN);

$$R_g = M \cdot g/x \quad (2.11)$$

Burada M trenin toplam kütlesi (t), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), x binde rampa eğimidir (Akbayır ve Çakır, 2017).

2.1.4 İvmelendirme direnci

Trenin hızının artırabilmek için direnç kuvvetlerini yenen kuvvete ilave olarak bir hızlandırma kuvvetine ihtiyaç vardır, bu kuvvet, ivmelendirme direnç kuvveti olarak adlandırılır.

Özgül ivmelendirme direnci, aşağıdaki denklem kullanılarak (Nawaz, 2015) kestirilir:

$$R_a = a \cdot k / g \quad (2.12)$$

Burada R_a ivmelendirme direnci, a çekiş motoru tarafından verilen ivmelendirme, k kütle faktörü ve g yerçekimi ivmesidir. Kütle faktörü trendeki sabitlenmiş ve dönel kütleler dikkate alınarak aşağıdaki formül ile ifade edilir (Nawaz, 2015):

$$q = 1 + M_{rot}/M \quad (2.13)$$

Formülde, M_{rot} trendeki dönel kütle, M toplam tren kütlesidir. Dönel kütle, şaft, motor ve vites kutularının açılmal hızlarından ve dönel ataletten elde edilir.

İvmelendirme direnci aşağıdaki formül yardımıyla da kestirilebilir:

$$R_a = W \cdot (1000/9,81) \cdot (1 + k) \cdot a \quad (2.14)$$

Burada W tren toplam ağırlığı, k kütle faktörü, a ise ivmedir (m/s^2). Kütle faktörü k vagonlar için 0,03 ila 0,10; lokomotif ve vagonlardan oluşan trenler için 0,06; tren dizileri (setleri) için 0,20 ila 0,30 değerlerindedir (Urlu, 2015).

2.2 Tren Direncini Belirlemede Kullanılan Yöntemler

Tren direnci kuvvetlerini belirleme yöntemleri şu şekilde sıralanabilir: gözlem, kıyas, salıverme testi, dinamometreli taşıt, Trende İzleme ve Kayıt Cihazları (OTMR) ile yapılan kayıtlar, rüzgar tüneli testleri, fiziksel ölçümler, tekrarlı gerçek tren testlerinden gelen veriler ve deneyler. Gerçek tren testlerinin miktarı, karmaşıklığı ve maliyetlerinin yüksekliği testlerin yaygın olarak uygulanmasını sınırlandırır. Ampirik veriler, demiryolu taşıtının işletimi süresince toplanır. Tren enerji sarfiyatının miktarının, harcanan çekiş kuvvetinin ölçülmesi gerekir. Bu tür veriler, özellikle dinamometreden veya elektronik yük hücresinden toplanabilir (Rangelov, 2012).

Tren direnci, işletimi sırasında çeşitli sensörler ile elde edilen ve trendeki bilgisayara kaydedilen veriler yardımıyla tanımlanabilir. Hız ve çekiş kuvveti trende bulunan ölçüm ekipmanlarıyla elde edilir. Hız, bir veya birden fazla tren aksına yerleştirilmiş darbe üretici sensör yardımıyla ölçülür. Genellikle biri tahrik aksında diğeri tahriksiz aksta olmak üzere iki sensör yerleştirilir ve bu sensörlerden gelen veriler karşılaştırılır. Hızın hatasız bir şekilde ölçümü, ivmelenme kestirimi için önem arz eder bu nedenle ek sensörler kullanılabilir. GPS (Küresel Konumlama Sistemi) cihazı ile trendeki ekipmandan bağımsız, konum, rakım, hız, ivme verileri ölçülebilmektedir. Enlem ve boylam verilerinden kurp yarıçapının hesaplanması da olasıdır (Ahlberg ve Blomquist, 2011).

Tren dirençlerinin belirlenmesi amacıyla uygun deneysel yöntem seçilmelidir. Deneysel yöntemler üç ana grup altında sınıflandırılabilir.

Çekiş gücü yöntemi: Tahrik edilen trenden ölçümler alınır. Tren direnci cer sistemi tarafından üretilen güç veya tahrik kuvvetlerinin ölçülmesiyle kestirilebilir. Ölçümler alınırken tren sabit hızda seyretmeli, herhangi bir hız değişim olmamasına dikkat edilmelidir. Ölçümler ayrıca, yerleştirilen gerinim ölçerler yardımıyla tekerlekten ya da akslardan ya da vites kutusundan alınabilir (Lukaszewicz, 2001).

Dinamometre yöntemi: Motor, vites kutusu ve tekerleklerin dönüşüyle ortaya çıkan yuvarlanma direncinin ölçülmesi için demiryolu taşıtlarını birbirine bağlayan kablo ya da kancalara yerleştirilen dinamometre kullanılabilir. Ölçüm sırasında taşıtlar sabit eğimli, düz yolda ve sarsıntısız bir şekilde çekilmelidir (Lukaszewicz, 2001).

Salıverme yöntemi: Bu yöntemde tren, eğimi bilinen bir yolda belirli bir hıza getirilir. Trenin referans noktasına gelmesinin ardından güç kesilerek kendiliğinden durması sağlanır. Yolun ölçüm kesitinde trenin; hız, konum ve zaman kayıtları yapılır. Tren direncinden dolayı hızı, kinetik enerjisi belirli bir mesafede sıfıra düşen, salıverilen trenin doğrudan yavaşlama verisi ölçülerek ya da hesaplanarak dolaylı yoldan tren direncinin kestirilmesi mümkün olur. Salı verme yöntemi, rölanti direncini de kapsar; hız değişim ölçümü ve eğim bilgisine gerek duyar (Lukaszewicz, 2001).

Tren direnci formülleri, yukarıdaki yöntemlerden biri kullanılarak geliştirilen ampirik fonksiyonlardır. Gerçek şartlarda yapılan birçok test sonucu elde edilen verilerden, en küçük kareler yöntemi ile regresyon analizi yapılarak bir fonksiyon oluşturulmaktadır (Akbayır ve Çakır, 2017).

2.2.1 Salıverme enerji yöntemi

Bu yöntemde tren direnci, enerji kaybıyla ilişkilendirilmiştir. Kayıp, tren direnç kuvvetlerinin (R_T) yaptığı işe (W_R) eşittir. Yol boyunca aralıklara ayrılmış her bir ölçüm konumundan trenin toplam enerjisi belirlenir ve konumlar arasında ortaya çıkan enerji farkı hesaplanır. Bu enerji kaybı tren direnci nedeniyle ortaya çıkar (Lukaszewicz, 2001).

Her bir ölçüm noktasında tren konumu, referans noktasına göre belirlenir. Ölçüm noktalarındaki tren potansiyel enerjilerinin belirlenmesi için tren toplam ağırlığı, tren uzunluğu boyunca ayırık taşıt ağırlıkları olarak dağıtılmalıdır. Toplam tren direnci (R_T), aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$R_{T_{(a+k)a}} = (1/\Delta X_{(a+k)a}) \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_v} m_i \left(\frac{1}{2} \cdot (1 + H_i) \cdot (v_a^2 - v_{a+k}^2) + g \cdot (h_{i_a} - h_{i_{a+k}}) \right) \right] \quad (2.16)$$

Eylemsizlik momenti (H_i) dikkate alınmalıdır; i taşıtın sayısı, n_v tren setindeki taşıt sayısı, h_i taşıtın bulunduğu rakım, g yerçekimi ivmesi ve t zamandır. Tren kendiliğinden durana kadar her bir ölçüm aralığında elde edilen veriler, en küçük kareler yöntemi yardımıyla polinom formuna dönüştürmede kullanılır. Böylece Davis formunda eşitlik elde edilir (Lukaszewicz, 2001).

Yöntemin basitliği, karmaşık ölçüm ekipmanlarının olmayışı sayesinde daha az hatalı sonuçlar elde edilebilir. Yöntem yalnızca tren toplam ağırlığı, yolun rakımı ve belirlenmiş tren hızının verilerine ihtiyaç duyar. Ölçüm aralıklarının tren hızına uygun seçilmesiyle diğer yöntemlerden daha hassas sonuçlar elde edilebilir (Lukaszewicz, 2001).

2.2.2 Ölçümlerden elde edilen verilerin değerlendirilmesi

EN 14067-4 2005 standardı, tren direnci için tam ölçekli deneylerden gelen ölçümlerin değerlendirme yöntemlerini tanımlar. Standarda göre Davis formülünün hıza bağlı terimlerin (B ve C) tanımlanması, salıverme testleri vasıtasıyla gerçekleştirilir. A terimi için düşük hızda trenin çekilmesini içeren özel bir test gereklidir (Somaschini vd. 2016).

Tren direncini belirlemek için yapılan testlerin maliyetinin yüksekliği nedeniyle farklı ampirik denklemler yardımıyla kestirim yoluna gidilmiştir. Trenlerin farklı yapısal özellikleri de direnci hesaplamak için diğer denklemlerle karşılaştırılır (Somaschini vd. 2016).

Lukaszewicz'in yukarıda belirtilen salıverme enerji yönteminde, yalnızca tren hız ve konumunun ölçüleceği salıverme testi verileriyle tren direnci katsayıları belirlenir; direnç, ölçüm pozisyonları arasında trenin potansiyel ve kinetik enerjilerindeki değişim ile belirlenir (Somaschini vd. 2016).

B ve C terimlerini elde etmek için dört yöntem kullanılır. Bu yöntemlerin ikisi regresyon yöntemi ve hız geçmişi tanılama yöntemidir. Bu iki yöntem EN standardında belirtilmiştir. Diğer iki yöntem ise bu iki yöntemin kombinasyonu olan hız geçmişi regresyon tanılama yöntemi ve POLIMI (Milano Teknik Üniversitesi) regresyon yöntemidir. Tüm yöntemler, aralarında özellikle B teriminde belirli farklar olmakla birlikte benzer sonuçlar vermektedir (Somaschini vd. 2016).

Regresyon yöntemini uygulamadaki amaç, deneysel verileri yerine en uygun benzetimle elde edilen nümerik verileri kullanmaktır. Bu yolla, kurp yarıçapı veya eğim değişimi hariç tüm çalışma koşulları üzerinde değerlendirme yapmak mümkün olur. Regresyon yönteminde hava direnci değişimleri ihmal edilir, daha düşük miktarda veri (karp ve eğim bilgileri olmadığından) dikkate alınır fakat daha pahalı yöntemlerle elde edilenlere oldukça benzer sonuçlar verir (Somaschini vd. 2016).

Yeni bir yöntem olan POLIMI regresyon yöntemi de B ve C katsayılarını salıverme testleri yardımıyla tanımlar. Bu yöntemin avantajı, demiryolu hat karakteristiklerinin ve Davis formülündeki A katsayısının bilinmesine gerek olmayışıdır. Bu avantajına rağmen POLIMI regresyon yöntemi, EN standardında belirtilen diğer yöntemlerle eşdeğer sonuçların eldesine imkân tanır; ayrıca yöntemin uygulanışında çok daha az zaman harcanır. Bu yöntemin dezavantajı ise tüm testlerde terimler üzerinde en fazla %2 etkisi görülen hava yoğunluğunun hesaba katılmayıdır (Somaschini vd. 2016).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Kurp Direnci Formülleri

Kurp direncini hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılabilir;

$$R_c = k/r \quad (3.1)$$

Burada k , 500 ila 1200 arasında değere sahip bir parametre ve r kurp yarıçapıdır (Nawaz, 2015).

Kurp direncini hesaplamak için Alman demiryolları tarafından kullanılan Roeckl formülü aşağıda verilmiştir. Kurp yarıçapının büyüklüğüne göre iki farklı formül mevcuttur, formüllerde m kütledir (Montrone vd., 2017).

$$R_c = 6,3 \cdot m/(r - 55), r \geq 300 \text{ m için } R_c = 4,91 \cdot m/(r - 30), r \leq 300 \text{ m için} \quad (3.2)$$

Lukaszewicz tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan gerçek testler sonucu geliştirilen kurp direnci formülü;

$$R_c \approx 780/(r - 55) \cdot g \cdot \sum_{i=1}^{n_c} m_{a_i}, r > 350 \text{ m}, n_c \leq n, \text{Uad tipi yük vagonları} \quad (3.3)$$

Burada; m_a aks yüküdür, n toplam aks sayısıdır, n_c kurptaki aks sayısıdır; kurp direnç kuvveti N cinsinden elde edilir. Test yapılan Uad tipi vagonlar üç döküm parçadan oluşan bojiilere sahiptir (Akbaýır ve Çakır, 2017).

Sachs tarafından ortaya konulan kurp direnci formülü;

$$R_c = (1,6 \cdot a_L + 1,62)/r \quad (3.4)$$

Burada; R_c , kurp direncidir (kN/t), a_L , bir bojide akslar arası mesafedir (Akbaýır ve Çakır, 2017).

Sırbistan demiryolları ve Çek Cumhuriyeti demiryolları tarafından kullanılan Röckl tarafından ortaya konulan kurp direnci formülü aşağıdadır. Söz konusu formül Hyundai Rotem Şirketi ve TÜLOMSAŞ (Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayii Anonim Şirketi) ortaklığı ile Eskişehir’de üretilen E 68000 lik lokomotifin cer eğrileri ve işletme simülasyonları için de kullanılmıştır (Akbayır ve Çakır, 2017). Formülde; R_c kurp direncidir (N), m kütledir (ton) ve r kurp yarıçapıdır (m).

$$R_c = 650 \cdot m / (r - 55) \quad (3.5)$$

Protopapadakis’in geliştirdiği kurp direnci formülü;

$$R_c = (0,72 \cdot e + 0,47 \cdot a) \cdot \mu_g / r \quad (3.6)$$

Burada, R_c , kgf/t cinsinden kurp direnci,
 e : hat genişliği (m),
 a_L : akslar arası rijit uzunluk (m),
 r : kurp yarıçapı (m),
 μ_g : tekerlek ray arasındaki kızaklama sürtünmesidir (kgf/t).

Kızaklama sürtünmesinin değeri, yaz ve kış aylarına göre değişiklikler göstermektedir. Bu değerler yaz mevsimi için 220 kgf/t, kış mevsimi için 165 kgf/t olarak alınmaktadır (Urlu, 2015).

Çin ulusal demiryolları tarafından kullanılan kurp direnci formülü;

$$R_c = (600 \cdot L_c) / (r \cdot L_t) \quad (3.7)$$

Burada; kurp direnci, daN/ton cinsindedir, L_t trenin uzunluğudur (m), L_c kurbun uzunluğudur (m). $L_t \leq L_c$ ise $L_t = L_c$ kabul edilir (Akbayır ve Çakır, 2017).

SNCF’nin 1435 mm hatlar için kullandığı kurp direnci formülü;

$$R_c = 800 / r \quad (3.8)$$

Formülde, R_c kp/t cinsinden kurp direncidir (Urlu, 2015). Bulgular ve Tartışma bölümünde sonuçları sunulan hesaplamalarda bu formül tercih edilmiştir. Tezin asıl amacı, Türkiye koşullarına en uygun **vagon seyir direnci formülünü** bulmak olduğundan kurp direnci formüllerinden yalnız biri kullanılmış, karşılaştırma yoluna gidilmemiştir.

3.2 Vagon Seyir Direnci Formülleri

Schmidt (1910) tarafından 1908-1909 yıllarında Illinois/ABD’de 40 mph (64 km/h) hıza kadar yapılan bir dizi deney sonucunda yılında geliştirilen seyir direnci formülü aşağıda yer almaktadır. Formülde, R' seyir direnci (p/t), W araç ağırlığı(t), V hızdır.

$$R' = (V + 39,6 - 0,031.W)/4,08 + 0,152.W \quad (3.9)$$

Yük vagonları için Davis’in (1926) geliştirdiği eşitlik;

$$R' = 1,3 + 29/w + 0,045.V + (0,0005.A_f.V^2)/(w.n) \quad (3.10)$$

Burada; R' seyir direncidir (lb/ton), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır, A_f aracın ön alın yüzünün alanıdır (sq.ft), V hızdır (mph)

1940’lar ve 1950’lerde yapılan seyir direnci testleri sonucu, aşağıdaki ‘Değiştirilmiş Davis Formülü’ kullanılmaya başlanmıştır.

$$R' = 0,6 + 20/w + 0,01.V + K.V^2/w.N \quad (3.11)$$

Burada; R' vagon seyir direnci (lb/t), w aks başına ağırlık (t), N aks sayısı, V hız (mph), K hava direnç katsayısıdır. K ;

- konvansiyonel taşıtlar için 0,076,
- yük kamyonu ile yüklü taşıtlar için 0,16,
- konteynerler için 0,0935’dir (AREMA, 1999).

Bulgularda verilen hesaplamada konvansiyonel taşıtlara ait değer kullanılmıştır.

Lukaszewicz tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan tam ölçekli testler sonucu çeşitli tipte yük vagonları için seyir direnci formülleri geliştirilmiştir. Aşağıda karışık yük vagonları için uygulanan formül verilmiştir. Formülde, m_a aks yüküdür, n toplam aks sayısıdır, L_T tren uzunluğudur.

$$R' = [n \cdot (65 + 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot m_a) + (-22 + 0,6 \cdot L_T) \cdot V + (5,1 + 8,1 \cdot 10^{-2} \cdot L_T) \cdot V^2] / m \quad (3.12)$$

Fransa'nın standart UIC (Uluslararası Demiryolları Birliği) araçları için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Cole, 2006).

$$R' = 1,25 + V^2/6300 \quad (3.13)$$

Cole'un çalışmasında (2006) yer verdiği, Fransa'nın 10 ton dingil yüklü vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir

$$R' = 1,5 + V^2/1600 \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.15 ve 3.16'da; R' seyir direncidir (daN/t), V ise (km/h) cinsinden hızdır.

Fransa Demiryolları'nın (SNCF) 18 ton dingil yüklü dolu yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Cole, 2006). Eşitlikte; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,2 + V^2/4000 \quad (3.15)$$

SNCF'nin ağır yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda yer almaktadır (Radosavljevic, 2006). Eşitlikte; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1 + V^2/4000 \quad (3.16)$$

Yük trenleri için Rusya’da kayıt altına alınan seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Radosavljevic, 2006).

$$R' = 0,7 + (3 + 0,1.V + 0,0025.V^2) \quad (3.17)$$

DB’nin (Deutsche Bahn) dolu yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü 3.20’de verilmiştir (Anonim, 2017). Eşitlikte; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1 + 0,1.0,2.(V/10)^2 \quad (3.18)$$

Cole’un çalışmasında (2006) yer alan Amerikan Demiryolları tarafından kullanılan değiştirilmiş Davis Eşitliği;

$$R' = K_a \cdot [2,943 + 89,2/m_a + 0,0306.V + 1,741.k_{ad}.V^2/m_a.n] \quad (3.19)$$

Burada, seyir direnci N/t, V hız (km/h), m_a aks başına kütle (t), n , aks sayısıdır.

Konteynerli platform vagonu için $K_a = 0,95$,
 treylerli platform vagonu için $K_a = 1,05$,
 kapalı dipten kapaklı vagon için $K_a = 1,05$,
 sırasıyla boş, dolu kapalı ve boş açık otomobil vagonları için
 $K_a = 1,2$, $K_a = 1,3$, $K_a = 1,9$ ’dur.

k_{ad} , konvansiyonel taşıtlar için 0,07,
 konteynerler için 0,0935,
 treyler ve platform vagonlar için 0,16’dir.

Bulgular ve Tartışma bölümünde sonuçları sunulan hesaplamalarda $K_a = 1,05$ ve $k_{ad} = 0,07$ alınmıştır.

Sırbistan ve Karadağ'da çeşitli tipteki yük vagonları için değiştirilmiş Strahl formülleri kullanılmaktadır (Radosavljevic, 2006). Burada, rulmanlı yatağa sahip karışık vagonlardan oluşan yük trenleri için kullanılan formül (3.21) ile kaymalı yataklı karışık vagonlardan oluşan yük trenleri için uygulanan formül (3.22) verilmiştir. Aşağıdaki eşitliklerde (3.21, 3.22); R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 2,2 - 80/(V + 38) + (k + 0,007) \cdot (V/10)^2; k = 0,050 \quad (3.20)$$

$$R' = 2 + (k + 0,007) \cdot (V/10)^2; k = 0,050 \quad (3.21)$$

Çek Cumhuriyeti'nin dolu yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü;

$$R' = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2 \quad (3.22)$$

Burada; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h) (Radosavljevic, 2006).

Radosavljevic (2006) tarafından karışık yük vagonları için Sırbistan, Hırvatistan hatlarında 2000 yılında yapılan testler sonucu geliştirilen seyir direnci formülü aşağıdadır. Eşitlikte; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 0,483 + 0,0183 \cdot V + 0,0001 \cdot V^2 \quad (3.23)$$

Yük vagonları için AAR tarafından yayınlanmış değiştirilmiş Davis eşitliği (Szanto, 2016) verilmiştir. Aşağıdaki eşitlikte; R' seyir direncidir (N/t), V hızdır (km/h), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır.

$$R' = 6,5 + 320 \cdot n/w + 0,46 \cdot V + 0,096 \cdot V^2/w \cdot n \quad (3.24)$$

Çin ulusal demiryollarının rulmanlı yatağa sahip dolu vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü aşağıdadır (Anonim, 2017). Eşitlikte; direnç daN/t, hız km/h cinsindedir

$$R' = 0,92 + 0,0048 \cdot V + 0,000125 \cdot V^2 \quad (3.25)$$

Çin ulusal demiryollarının kaymalı yatağa sahip vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Anonim, 2017). Eşitlikte; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,07 + 0,0011.V + 0,000236.V^2 \quad (3.26)$$

Koffman (1973) tarafından geliştirilen yük vagonları için seyir direnci formülü aşağıdadır. Eşitlikte, R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h), m_a aks yüküdür (ton).

$$R' = 0,7 + (8 + 0,1.V + 0,0025.V^2)/m_a \quad (3.27)$$

Avustralya'da dolu vagonlar için kullanılan seyir direnci formülü aşağıda yer almaktadır (Anonim, 2017): Formülde; R' seyir direncidir (N/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 5,17 + 0,010997.V + 0,00051.V^2 \quad (3.28)$$

Hızı 100 km/h olan ve tamamı aynı tip kapalı vagonlardan oluşan yük trenleri için Fransız Demiryollarının (SNCF) kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Urlu, 1999). Verilen eşitlikte; R' seyir direncidir (kp/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,5 + V^2/4200 \quad (3.29)$$

Yükü ve darası toplamı 80 ton olan spesifik vagonlar (kömür, cevher, boraks vb.) için Fransız Demiryollarının (SNCF) kullandığı seyir direnci formülü aşağıdadır (Urlu, 1999). Aşağıdaki eşitlikte; R' seyir direncidir (kp/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,2 + V^2/4500 \quad (3.30)$$

DB'nin yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Urlu, 1999). Aşağıdaki eşitlikte; R' seyir direncidir (kp/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,5 + V^2/1200 \quad (3.31)$$

Tuthill'in (1948) çalışmasında vagon başına tonaja (formüllerde W ile ifade edilen) göre formül kullanımı tercih edilmiştir. Bulgular ve Tartışma bölümünde 22. formül olarak belirtilen formül aşağıdaki formül serisini ifade etmektedir. Bu formüllerde seyir direnci (R') lb/t cinsinden ve hız (V) saatte mil cinsindedir.

$$W = 20 \text{ ton ise, } R' = 2,0 + 0,04.V + 0,005.V^2 \quad (3.32.1)$$

$$W = 25 \text{ ton ise, } R' = 1,2 + 0,03.V + 0,0048.V^2 \quad (3.32.2)$$

$$W = 30 \text{ ton ise, } R' = 1,2 + 0,0195.V + 0,0045.V^2 \quad (3.32.3)$$

$$W = 35 \text{ ton ise, } R' = 0,8 + 0,0235.V + 0,0041.V^2 \quad (3.32.4)$$

$$W = 40 \text{ ton ise, } R' = 1,1 + 0,010.V + 0,0038.V^2 \quad (3.32.5)$$

$$W = 45 \text{ ton ise, } R' = 0,55 + 0,020.V + 0,00351.V^2 \quad (3.32.6)$$

$$W = 50 \text{ ton ise, } R' = 0,60 + 0,010.V + 0,0034.V^2 \quad (3.32.7)$$

$$W = 55 \text{ ton ise, } R' = 0,40 + 0,0125.V + 0,00325.V^2 \quad (3.32.8)$$

$$W = 60 \text{ ton ise, } R' = 0,45 + 0,015.V + 0,0031.V^2 \quad (3.32.9)$$

$$W = 65 \text{ ton ise, } R' = 0,35 + 0,010.V + 0,003.V^2 \quad (3.32.10)$$

$$W = 70 \text{ ton ise, } R' = 0,59 + 0,002.V + 0,00295.V^2 \quad (3.32.11)$$

$$W = 75 \text{ ton ise, } R' = 0,53 + 0,002.V + 0,0029.V^2 \quad (3.32.12)$$

4. YÖNTEM

Türkiye demiryollarına en uygun vagon seyir direncinin tespiti amacıyla, demiryollarımızda gerçekleştirilen deney verilerinin Literatürde yer verilen formüllere uygulanmasıyla ortaya çıkan sonuçlar ile deneylerde okunan, çekilen elektrik gücü değerleri karşılaştırılmış; sapma miktarları incelenerek (Çizelge 5.17) en yakın sonuca sahip formül belirlenmiştir. Hesaplamalarda, TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) Kapasite Yönetim Dairesi tarafından demiryollarımızda gerçekleştirilen 2017 yılına ait deney verilerinden istifade edilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği her bir hat kesimine ait verilerin yer aldığı çizelgeler (Çizelge A.1 – A.8) Ek Açıklama A’da yer almaktadır. Literatürde yer verilen formüller kullanılarak söz konusu deneylerdeki şartlar (Çizelge 4.1) baz alınarak hesaplamalar yapılmış ve sonuçları Bulgular ve Tartışma bölümünde çizelgeler halinde sunulmuştur. Hesaplamalarda Microsoft Excel programından yararlanılmıştır.

EK Açıklama A’da yer alan çizelgelerden düzenlenen, aşağıda yer alan çizelge, yapılan hesaplamalarda formüllere girilen verileri oluşturmaktadır. Çizelgede deneylerin gerçekleştiği hat kesimlerine ait rampa, kurp değerleri ve kritik mesafeler verilmiştir. Deneylerde kullanılan lokomotif tipleri, bu lokomotiflerin kütleleri ve kritik hız değerleri de çizelgede yer almaktadır. Deneylerde kullanılan tren dizilerinin toplam kütlesi ve hat kesimi içerisinde ulaşılan maksimum hız değerleri ile hat kesiminde çekilen cer kuvveti çizelgeye eklenmiştir.

Çizelge 4.1. Hat kesimlerinin karakteristikleri ile gerçekleştirilen deneylere ilişkin veriler

Hat Kesimleri	Rampa	Kurp (m)	Tren Ton	Loko ton	Loko no	Kritik mesafe (km+m)	Kritik hız (km/h)	Kesim sonunda hız (km/h)	Cer Kuvveti (kN)
Banaz-Nohutova	17,19	299	1586	129	DE 36020	316+300	23	25	328
Ekinova-Karakuyu	14,41	390	1781	129	DE 36002	90+800	23	25	300
Kütahya-Demirciören	9,93	368	2547	129	DE 36005	21+000	23	27	320
Piribeyler-Gazellidere	13,97	246	1751	129	DE 36021	188+200	23	26	310
Tavşanlı-Güzelyurt	14,18	294	1703	129	DE 36020	46+100	23	26	300
Tınaztepe-Kocatepe	18,9	292	1399	129	DE 36005	32+950	23	28	300
Oturak-Dumlupınar	25,09	286	1070	129	DE 36001	350+100	23	24	280
Kahık-Bozkurt	19,95	400	1416	129	DE 36011	287+650	23	27	304

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Her bir hat kesimi için deney verilerinden yola çıkılarak kurp ve eğim dirençleri ile bunların toplamından ibaret olan eşdeğer direnç değerleri hesaplanmış ve çizelgeler halinde (Çizelge 5.1, Çizelge 5.3, Çizelge 5.5, Çizelge 5.7, Çizelge 5.9, Çizelge 5.11, Çizelge 5.13, Çizelge 5.15) sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca ivmelenme ve lokomotif seyir dirençleri de hesaplanarak çizelgelere eklenmiştir.

Esas üzerinde durulan husus olan vagon seyir dirençleri ise ayrıntılı olarak incelenmiştir. Literatürde sunulan formüller her bir hat kesimine deney verileri kullanılarak uygulanmış ve sonuçlar çizelgeler halinde (Çizelge 5.2, Çizelge 5.4, Çizelge 5.6, Çizelge 5.8, Çizelge 5.10, Çizelge 5.12, Çizelge 5.14, Çizelge 5.16) sunulmuştur. Bu çizelgelerde “*Toplam Direnç*” olarak belirtilen değerler, çizelgenin öncesinde aynı hat kesimi için yer verilen çizelgedeki dirençler ile belirtilen numaralı vagon seyir direncinin toplamını ifade etmektedir. Toplam tren direnç kuvveti üzerinde vagon seyir direncinin eğim direncine göre daha az etkili olmasının temel nedeni, deneylerin icra edildiği hat kesimlerinin yüksek eğime sahip hat kesimleri oluşudur. Eğim direnci ise yer çekimi kuvvetinin bir fonksiyonu olduğundan, formül karşılaştırmasına gidilmesi gerekmemektedir.

Çizelge 5.1. Banaz-Nohutova hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,68		42
Eğim Direnci	17,19		267
Eşdeğer Direnç	19,87	31507	309
İvmelenme Direnci		555	5
Lokomotif Seyir Direnci		195	2

Çizelge 5.2. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Banaz-Nohutova hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	2,56	9,18	1,35	1,89	1,36	1,16	1,33	1,13
kp/N/daN/lb	4056,50	14555,37	2139,84	2998,53	2151,01	1833,81	2113,08	1784,25
kN	18,04	14,56	21,40	29,99	21,51	18,34	21,13	17,84
Toplam Direnç	334,37	330,88	337,72	346,31	337,84	334,66	337,46	334,17
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	12,78	1,29	2,36	1,39	1,00	18,24	1,12	1,25
kp/N/daN/lb	20274,42	2040,24	3737,01	2210,49	1590,76	28928,00	1773,35	1974,57
kN	20,27	20,40	37,37	22,10	15,91	28,93	17,73	19,75
Toplam Direnç	336,60	336,73	353,70	338,43	332,23	345,25	334,06	336,07
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,78	5,76	1,65	1,34	2,02	2,17		
kp/N/daN/lb	2823,08	9141,19	2615,01	2123,48	3205,04	3438,71		
kN	28,23	9,14	25,64	20,82	31,43	15,30		
Toplam Direnç	344,56	325,47	341,97	337,15	347,76	331,62		

Çizelge 5.3. Ekinova-Karakuyu hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,05		36
Eğim Direnci	14,41		252
Eşdeğer Direnç	16,46	29318	288
İvmelenme Direnci		776	8
Lokomotif Seyir Direnci		195	2

Çizelge 5.4. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Ekinova - Karakuyu hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	1,80	5,44	1,35	1,89	1,36	1,16	1,06	1,13
kp/N/daN/lb	3204,01	9682,83	2402,94	3367,20	2415,48	2059,28	1896,45	2003,63
kN	14,25	9,68	24,03	33,67	24,15	20,59	18,96	20,04
Toplam Direnç	311,28	306,71	321,06	330,70	321,18	317,62	315,99	317,07
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	9,18	1,29	2,36	1,39	1,00	18,21	1,12	1,25
kp/N/daN/lb	16350,60	2291,09	4196,48	2482,27	1786,34	32438,00	1991,42	2217,34
kN	16,35	22,91	41,96	24,82	17,86	32,44	19,91	22,17
Toplam Direnç	313,38	319,94	338,99	321,85	315,01	329,47	316,94	319,20
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,32	5,76	1,65	1,34	2,02	2,39		
kp/N/daN/lb	2356,50	10265,10	2936,50	2384,60	3599,10	4261,04		
kN	23,56	10,27	28,80	23,38	35,30	18,95		
Toplam Direnç	320,59	307,29	325,83	320,41	332,32	315,98		

Çizelge 5.5. Kütahya – Demirciören hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,17		54
Eğim Direnci	9,93		248
Eşdeğer Direnç	12,10	30829	302
İvmelenme Direnci		978	10
Lokomotif Seyir Direnci		202	2

Çizelge 5.6. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Kütahya - Demirciören hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	1,86	5,74	1,37	1,96	1,38	1,18	1,11	1,15
kp/N/daN/lb	4737,94	14617,72	3478,47	4980,98	3520,59	3011,19	2821,01	2918,35
kN	21,08	14,62	34,78	49,81	35,21	30,11	28,21	29,18
Toplam Direnç	334,98	328,52	348,69	363,71	349,11	344,01	342,11	343,08
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	9,40	1,38	2,42	1,41	1,05	19,07	1,14	1,27
kp/N/daN/lb	23938,09	3526,99	6152,35	3589,61	2674,35	48579,22	2905,43	3239,13
kN	23,94	35,27	61,52	35,90	26,74	48,58	29,05	32,39
Toplam Direnç	337,84	349,17	375,42	349,80	340,64	362,48	342,95	346,29
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,38	5,84	1,67	1,36	2,11	1,59		
kp/N/daN/lb	3511,01	14871,19	4262,59	3469,01	5367,80	4039,28		
kN	35,11	14,87	41,80	34,02	52,64	17,97		
Toplam Direnç	349,01	328,77	355,70	347,92	366,54	331,87		

Çizelge 5.7. Piribeyler – Gazellidere hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	3,25		56
Eğim Direnci	13,97		240
Eşdeğer Direnç	17,22	30156	296
İvmelenme Direnci		783	8
Lokomotif Seyir Direnci		198	2

Çizelge 5.8. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Piribeyler - Gazellidere hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	1,78	5,09	1,36	1,92	1,37	1,17	1,07	1,14
kp/N/daN/lb	3113,62	8909,18	2376,64	3366,30	2397,12	2046,92	1867,22	1987,74
kN	13,85	8,91	23,77	33,66	23,97	20,47	18,67	19,88
Toplam Direnç	319,20	314,26	329,12	339,02	329,32	325,82	324,03	325,23
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	9,13	1,34	2,39	1,40	1,03	18,68	1,13	1,26
kp/N/daN/lb	15980,72	2338,15	4176,70	2453,85	1797,23	32708,36	1977,40	2203,00
kN	15,98	23,38	41,77	24,54	17,97	32,71	19,77	22,03
Toplam Direnç	321,33	328,73	347,12	329,89	323,33	338,06	325,13	327,38
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,32	5,80	1,66	1,35	2,06	1,33		
kp/N/daN/lb	2307,22	10156,99	2908,33	2364,24	3612,90	2325,82		
kN	23,07	10,16	28,52	23,19	35,43	10,35		
Toplam Direnç	328,43	315,51	333,87	328,54	340,78	315,70		

Çizelge 5.9. Tavşanlı – Güzelyurt hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,72		45
Eğim Direnci	14,18		237
Eşdeğer Direnç	16,90	28783	282
İvmelenme Direnci		199	2
Lokomotif Seyir Direnci		198	2

Çizelge 5.10. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Tavşanlı - Güzelyurt hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	1,85	5,87	1,36	1,92	1,37	1,17	1,09	1,14
kp/N/daN/lb	3157,02	9990,75	2311,48	3274,02	2331,41	1990,81	1862,78	1933,25
kN	14,04	9,99	23,11	32,74	23,31	19,91	18,63	19,33
Toplam Direnç	300,20	296,15	309,27	318,90	309,47	306,06	304,78	305,49
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	9,49	1,34	2,39	1,40	1,03	18,69	1,13	1,26
kp/N/daN/lb	16166,93	2274,05	4062,20	2386,58	1747,96	31822,28	1923,20	2142,61
kN	16,17	22,74	40,62	23,87	17,48	31,82	19,23	21,43
Toplam Direnç	302,32	308,90	326,78	310,02	304	317,98	305,39	307,58
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,36	5,80	1,66	1,35	2,06	2,27		
kp/N/daN/lb	2322,78	9878,56	2828,60	2299,43	3513,86	3858,89		
kN	23,23	9,88	27,74	22,55	34,46	17,17		
Toplam Direnç	309,38	296,03	313,89	308,70	320,61	303,32		

Çizelge 5.11. Tınaztepe - Kocatepe hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,74		38
Eğim Direnci	18,90		259
Eşdeğer Direnç	21,64	30274	297
İvmelenme Direnci		873	9
Lokomotif Seyir Direnci		198	2

Çizelge 5.12. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Tınaztepe - Kocatepe hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	2,02	7,07	1,37	1,99	1,40	1,20	1,18	1,16
kp/N/daN/lb	2825,66	9889,75	1922,85	2784,01	1953,00	1673,20	1646,66	1618,36
kN	12,57	9,89	19,23	27,84	19,53	16,73	16,47	16,18
Toplam Direnç	320,03	317,35	326,69	335,30	326,99	324,20	323,93	323,65
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	10,46	1,43	2,45	1,42	1,07	19,66	1,15	1,29
kp/N/daN/lb	14639,70	2007,23	3423,19	1983,22	1502,25	27507,90	1612,21	1798,87
kN	14,64	20,07	34,23	19,83	15,02	27,51	16,12	17,99
Toplam Direnç	322,10	327,54	341,70	327,30	322,49	334,97	323,59	325,45
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,48	5,88	1,69	1,37	2,15	1,45		
kp/N/daN/lb	2076,66	8222,98	2359,65	1922,54	3012,51	2032,92		
kN	20,77	8,22	23,14	18,85	29,54	9,04		
Toplam Direnç	328,23	315,69	330,60	326,32	337,01	316,51		

Çizelge 5.13. Oturak – Dumlupınar hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,80		29
Eğim Direnci	25,09		263
Eşdeğer Direnç	27,89	29839	293
İvmelenme Direnci		124	1
Lokomotif Seyir Direnci		191	2

Çizelge 5.14. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Oturak - Dumlupınar hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	2,56	9,44	1,34	1,86	1,34	1,14	1,31	1,12
kp/N/daN/lb	2738,25	10097,84	1435,33	1990,20	1438,08	1224,08	1405,64	1193,26
kN	12,18	10,10	14,35	19,90	14,38	12,24	14,06	11,93
Toplam Direnç	307,89	305,81	310,07	315,62	310,09	307,95	309,77	307,65
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	12,95	1,24	2,33	1,39	0,98	17,89	1,11	1,23
kp/N/daN/lb	13859,99	1324,66	2491,30	1483,45	1048,39	19143,10	1184,70	1318,60
kN	13,86	13,25	24,91	14,83	10,48	19,14	11,85	13,19
Toplam Direnç	309,57	308,96	320,63	310,55	306,20	314,86	307,56	308,90
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,76	5,73	1,64	1,33	1,98	2,08		
kp/N/daN/lb	1885,64	6128,63	1751,74	1420,96	2118,60	2220,25		
kN	18,86	6,13	17,18	13,93	20,78	9,88		
Toplam Direnç	314,57	301,84	312,89	309,65	316,49	305,59		

Çizelge 5.15. Kalkık – Bozkurt hat kesimi direnç hesaplamaları sonuçları

	kp/t	kp	kN
Kurp Direnci	2,00		28
Eğim Direnci	19,95		277
Eşdeğer Direnç	21,95	31081	305
İvmelenme Direnci		563	5,5
Lokomotif Seyir Direnci		202	2,0

Çizelge 5.16. Çeşitli seyir direnci formüllerinin Kaklık - Bozkurt hat kesimi verileri için sonuçları

Formül	3.11.	3.12.	3.13.	3.14.	3.15.	3.16.	3.17.	3.18.
kp/N/daN/lb/t	2,11	7,74	1,37	1,96	1,38	1,18	1,20	1,15
kp/N/daN/lb	2988,48	10960,09	1933,85	2769,17	1957,27	1674,07	1698,32	1622,45
kN	13,29	10,96	19,34	27,69	19,57	16,74	16,98	16,22
Toplam Direnç	325,60	323,26	331,64	340,00	331,88	329,04	329,29	328,53
Formül	3.19.	3.20.	3.21.	3.22.	3.23.	3.24.	3.25.	3.26.
kp/N/daN/lb/t	10,83	1,38	2,42	1,41	1,05	19,20	1,14	1,27
kp/N/daN/lb	15340,94	1960,82	3420,39	1995,64	1486,80	27180,70	1615,27	1800,79
kN	15,34	19,61	34,20	19,96	14,87	27,18	16,15	18,01
Toplam Direnç	327,64	331,91	346,51	332,26	327,17	339,48	328,46	330,31
Formül	3.27.	3.28.	3.29.	3.30.	3.31.	3.32.		
kp/N/daN/lb/t	1,53	5,84	1,67	1,36	2,11	2,36		
kp/N/daN/lb	2168,32	8267,61	2369,78	1928,59	2984,22	3347,57		
kN	21,68	8,27	23,24	18,91	29,27	14,89		
Toplam Direnç	333,99	320,57	335,54	331,22	341,57	327,19		

Toplam direnç değerleri her bir vagon seyir direnci formülü için ayrı ayrı verilmiş ve nihayetinde sapma miktarı en düşük olan formüle ulaşmak hedeflenmiştir. Çizelge 5.17’de her bir hat kesimi için hesaplanan toplam direnç değerlerinin (Bkz. Çizelge 5.2, Çizelge 5.4, Çizelge 5.6, Çizelge 5.8, Çizelge 5.10, Çizelge 5.12, Çizelge 5.14, Çizelge 5.16) deneyler sırasında okunan/hesaplanan cer kuvveti değerlerinden (Bkz. Çizelge 4.1 ve EK Açıklamalar-A) yüzdesel olarak sapmaları sütunları oluşturmaktadır. Her bir vagon seyir direnci formülü için toplam direncin cer kuvveti değerlerinden sapma yüzdelerine, deneylerin gerçekleştirildiği hat kesimlerine göre çizelgenin satırlarında yer verilmiştir.

Çizelgenin en sağ sütununda o satırın ortalaması verilmiş, böylece o satırdaki numaralı formül kullanılarak hesaplanan toplam dirençlerin, Türkiye şartlarına örneklem oluşturan hat kesimlerinde okunan cer kuvveti değerlerinden sapma yüzdelerinin ortalaması belirlenmiştir. Karşılaştırmada ortaya çıkan sapma ortalamaları, çeşitli tren direnci formüllerine göre % 3 ila % 13 arasında değişmektedir. Çizelgede görüleceği üzere; sapma miktarı en düşük olan formül; 3.28. eşitlik, onu 3.12. eşitlik takip etmektedir. Yüzde sapma ortalaması en düşük değere sahip olan formülün, Türkiye’de yapılacak vagon seyir direnci hesaplamalarında kullanılması önerilmiştir.

Çizelge 5.17. Çeşitli tren direnci formüllerinin hat kesimlerinde sapma yüzdeleri ile sapma ortalamaları (%).

	Formül Numarası	Banaz-Nohutova	Ekinova-Karakuyu	Kütahya-Demircören	Piribeyler-Gazellidere	Tavşanlı-Güzelyurt	Tınaztepe-Kocatepe	Oturak-Dumlupınar	Kaklık-Bozkurt	% Sapma Ortalaması
1	3.11	1,94	3,76	4,68	2,97	0,07	6,68	9,96	7,10	4,65
2	3.12	0,88	2,24	2,66	1,37	1,28	5,78	9,22	6,34	3,72
3	3.13	2,96	7,02	8,96	6,17	3,09	8,90	10,74	9,09	7,12
4	3.14	5,58	10,23	13,66	9,36	6,30	11,77	12,72	11,84	10,18
5	3.15	3,00	7,06	9,10	6,23	3,16	9,00	10,75	9,17	7,18
6	3.16	2,03	5,87	7,50	5,10	2,02	8,07	9,98	8,24	6,10
7	3.17	2,88	5,33	6,91	4,52	1,59	7,98	10,63	8,32	6,02
8	3.18	1,88	5,69	7,21	4,91	1,83	7,88	9,87	8,07	5,92
9	3.19	2,62	4,46	5,57	3,66	0,77	7,37	10,56	7,78	5,35
10	3.20	2,66	6,65	9,12	6,04	2,97	9,18	10,34	9,18	7,02
11	3.21	7,83	13,00	17,32	11,97	8,93	13,90	14,51	13,98	12,68
12	3.22	3,18	7,28	9,31	6,42	3,34	9,10	10,91	9,30	7,35
13	3.23	1,29	4,96	6,45	4,30	1,21	7,50	9,36	7,62	5,34
14	3.24	5,26	9,82	13,27	9,05	5,99	11,66	12,45	11,67	9,90
15	3.25	1,85	5,65	7,17	4,88	1,80	7,86	9,84	8,04	5,89
16	3.26	2,46	6,40	8,22	5,61	2,53	8,48	10,32	8,66	6,58
17	3.27	5,05	6,86	9,07	5,94	3,13	9,41	12,35	9,86	7,71
18	3.28	0,77	2,43	2,74	1,78	1,32	5,23	7,80	5,45	3,44
19	3.29	4,26	8,61	11,16	7,70	4,63	10,20	11,75	10,38	8,59
20	3.30	2,79	6,80	8,73	5,98	2,90	8,77	10,59	8,95	6,94
21	3.31	6,02	10,77	14,54	9,93	6,87	12,34	13,03	12,36	10,73
22	3.32	1,10	5,33	3,71	1,84	1,11	5,50	9,14	7,63	4,42

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tren direnci formülleri, demiryolu taşıtlarının enerji tüketimi verilerinin öngörülmesi, lokomotifin güç gereksiniminin ve çekiş kuvvetinin belirlenmesi ve seyir süresi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bu tezde; Türkiye şartlarına en uygun tren direncinin belirlenmesi amacının gerçekleştirilmesi için kapsamlı literatür araştırması yapılmış, literatürde ortaya konmuş bulunan, farklı ülkeler tarafından kullanılan çeşitli vagon seyir direnci formüllerine; TCDD personeli tarafından Türkiye Cumhuriyeti demiryollarının farklı hatlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler uygulanmıştır. Her bir hat kesimi için literatür araştırmasında verilen tren dirençleri formülleri ile yapılan hesaplamalar neticesinde Avustralya demiryollarının dolu yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülünün (Eşitlik 3.28) demiryollarımızda yapılan deney verileri sonuçları ile sapma miktarının en az olduğu görülmüştür. Buradan hareketle Türkiye demiryollarına en uygun vagon seyir direnci formülünün, $R' = 5,17 + 0,010997.V + 0,00051.V^2$ olduğu anlaşılmıştır.

Türkiye için gerçekleştirilecek tren direnci hesaplamalarında önerilen formülün tercih edilmesi ile demiryollarımızın enerji tüketimine ilişkin veriler daha yüksek doğrulukla öngörülebilecektir. Bu çalışmanın neticesi, demiryollarımızdaki enerji tüketimini azaltmaya yönelik yapılacak çalışmalarda kullanılabilir. Böylece enerji verimliliği artırılabilecek, etkin kaynak kullanımına gidilmiş olacaktır. Yük trenlerinin direnç kuvveti daha yüksek doğrulukla hesaplanacağından mevcut hatlarda lokomotif seçimi daha etkin yapılabilir, gelecekte yapılacak lokomotif tercihlerinde faydalanılabilecektir. Benzer şekilde demiryollarımızın parametrelerine uyumlu lokomotif tasarımı/üretiminde güç, çekiş kuvveti tercihleri daha doğru yapılabilir. Hatların ve hatlarda işletilen lokomotifin parametrelerine bağlı olarak, önerilen formül, yük trenlerinin maksimum hızının belirlenmesinde kullanılabilir. Demiryollarımızda daha yüksek hızlı yük taşımacılığı gerçekleştirmek amacıyla yapılacak çalışmalarda yararlanılabilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahlberg, J., Blomquist, E., 2011, Online identification of running resistance and available adhesion of trains, Master's Thesis, Linköping University Institute of Technology Department of Electrical Engineering.
- Akbayır, Ö., Çakır, F.H., 2017, Enerji verimliliği için tren direnci hesaplamaları, Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal ve Teknik Bilimler Kongresi.
- AREMA, 1999, Train Performance - Economics of Railway Engineering and Operation Section 2.1 Resistance to Movement, American Railway Engineering and Maintenance of Way Association.
- Bernsteen, S. A., Uher, R. A., Romualdi, J. P., 1983, The interpretation of train rolling resistance from fundamental mechanics, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Booze, R.W., Clarke, R.H., 1912, A study of the various experiment for the determination of the resistance of electric cars and trains, University of Illinois College of Engineering Railway Electrical Engineering.
- Cole, C., 2006, Longitudinal Train Dynamics - Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Taylor & Francis Group.
- Davis, W. J., 1926, The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars, GE.
- EIA, 2014, Energy consumption by sector, Energy Information Administration of U.S..
- GE, 2011, Tractive Effort versus Speed Characteristic, General Electric.
- IEA, 2016, Energy policies of IEA countries – Turkey 2016 Review, p 56 – 64,. International Energy Agency.
- İTÜ, 2006, Vagon hareket dinamiği ders notu, [https://web.itu.edu.tr.](https://web.itu.edu.tr/), Erişim tarihi: 21.05.2017.
- Jain, M.K., 12.05.2013, Traction mechanics, <https://www.railelectrica.com/traction-mechanics/train-grade-curve-and-acceleration-resistance-2/>, Erişim tarihi: 20.05.2017.
- Kim, K., 2010, Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints, New Jersey's Science & Technology University.
- Lukaszewicz, P., 2001, Energy consumption and running time for trains, Department of Vehicle Engineering Royal Institute of Technology.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- MEB, 2014, Tren Dinamiği ve Tekerlek Kuvvetleri, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.
- Montrone, T., Pellegrini, P., Nobili P., 2017, Energy consumption minimization problem in a railway network, Transportation Research Procedia, Elsevier.
- Nawaz, M. U., 2015, Estimation of running resistance in train tunnels, Norwegian University of Science and Technology Department of Production and Quality Engineering.
- Orellano, A., Sperling, S., 2008, Aerodynamic improvements and associated energy demand reduction of trains, Bombardier.
- Radosavljevic, A., 2006, Measurement of train traction characteristics, Institution of Mechanical Engineers.
- Rangelov, V.N., 2012, Gradient modelling with calibrated train performance models, Computers in Railways XIII, Wit Press.
- Sanquer, S., Barre, C., Virel, M. D., Clleon, L. M., 2004, Effect of cross winds on high-speed trains: development of a new experimental methodology, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier.
- Schmidt, E.C., 1910, Freight train resistance, its relation to car weight, University of Illinois, Engineering Experiment Station.
- Somaschini, C., Rocchi, D., Tomasini, G., Schito, P., 2016, Simplified estimation of train resistance parameters: full scale experimental tests and analysis, Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press.
- Szanto, F., 2016, Rolling resistance revisited, . Conference on Railway Excellence, Road Transport and Safety Agency.
- Tuthill, J.K., 1948, High speed freight train resistance its relation to average car weight, University of Illinois Bulletin.
- Urlu, C., 2015, Tren mekaniği ders notu.
- Urlu, C., 1999, Demiryolu Araçlarının İleri Dinamiği, TCDD Yayınları.
- Anonim, Locomotive and train resistance - 5AT Advanced Steam Locomotive Project, <http://5at.co.uk/index.php/definitions/terms-and-definitions/resistance.html#Plots>, Erişim tarihi: 26.04.2017.

EK AÇIKLAMALAR**Ek Açıklamalar - A: TCDD Deney Verileri**

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
A.1: Banaz - Nohutova hat kesimi verileri	39
A.2: Ekinova - Karakuyu hat kesimi verileri	40
A.3: Kütahya - Demirciören hat kesimi verileri	41
A.4: Piribeyler - Gazellidere hat kesimi verileri	42
A.5: Tavşanlı - Güzelyurt hat kesimi verileri	43
A.6: Tınaztepe - Kocatepe hat kesimi verileri	44
A.7: Oturak - Dumlupınar hat kesimi verileri	45
A.8. Kaklık - Bozkurt hat kesimi verileri	46

Çizelge A.1. Banaz - Nohutova hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih	28.09.2017
Hat Kesimi	Basmane- Afyon
İstasyon İsimleri	Banaz-Nohutova
Tren No	23060
Loko No	DE 36020
Tren Ton	1586
Tren Boyu	648 metre (45 vagon, 142 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	317+400 - 315+330
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz TAŞKOPARAN
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0 505 #####
Makinist Adı Soyadı	Tuncay USTA
Makinist İletişim Bilgileri	0 505 #####
Kritik Bölge (K.B.) Verileri (Km. 317 + 400 / Km. 315 + 330.)	
Kritik Bölge İçinde Ulaşılan Maksimum Hız(km/h)	25
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	410
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	316+300
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	248
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	328
Hesaplanan Tonaj	1530
Şebeke Bildiriminde Yayınlanan Tonaj	1275 (DE 33000)
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.2. Ekinova - Karakuyu hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih /Saat	16.08.2017
Hat Kesimi ve İstasyon İsimleri	Afyon-Karakuyu (Ekinova- Karakuyu)
Tren No	73013
Loko No	DE 36002
Tren Ton	1781
Tren Boyu	447 metre (23 vagon, 92 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	90+200 - 92+459
Kritik hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz Taşkoparan Afyon Araç Bakım Müdürlüğü
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0505 #####
Makinist Adı Soyadı	Baki Alpaslan
Makinist İletişim Bilgileri	0505 #####
KRİTİK BÖLGE (K.B.) VERİLERİ Km 90+200 - 92+459)	
Kritik Bölge Sonunda Ulaşılan Hız (km/h)	25
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	300
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	90+800
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	170
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	300
Hava ve Yol Durumu	Hava Açık, ray kuru,23 °C
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	Ekinova- Karakuyu arası duruş dahil kayıp olmadı.
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.3. Kütahya - Demirciören hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih /Saat	15.08.2017
Hat Kesimi ve İstasyon İsimleri	Alayunt-Balıkesir (Kütahya-Demirciören)
Tren No	73001
Loko No	DE 36005
Tren Ton	2547
Tren Boyu	610 metre (43 vagon, 138 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	20+578 - 23+065
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz Taşkoparan Afyon Araç Bakım Müdürlüğü
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0505 #####
Makinist Adı Soyadı	Cengiz Yılmaz
Makinist İletişim Bilgileri	0505 #####
KRİTİK BÖLGE (K.B.) VERİLERİ (KM. 20 + 578 / KM. 23 + 065)	
Kritik Bölge Sonunda Ulaşılan Hız (km/h)	27
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	490
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	21+000
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	195
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	320
Hava ve Yol Durumu	Hava Açık, ray kuru,30 °C
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	Kütahya-Demirciören arası duruş dahil kayıp 8 dk oldu.
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.4. Piribeyler - Gazellidere hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih/Saat	15.08.2017
Hat Kesimi ve İstasyon İsimleri	Alayunt-Balıkesir (Piribeyler-Gazellidere)
Tren No	73001
Loko No	DE 36020
Tren Ton	1751
Tren Boyu	360 metre (22 vagon, 88 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	186+500 - 189+033
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz Taşkoparan Afyon Araç Bakım Müdürlüğü
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0505 #####
Makinist Adı Soyadı	Mahmut Çiftçi
Makinist İletişim Bilgileri	0543 #####
Kritik Bölge (K.B.) Verileri (Km. 186+500 / Km. 189+033)	
Kritik Bölge Sonunda Ulaşılan Hız (km/h)	26
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	1030
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	188+200
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	840
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	310
Hava ve Yol Durumu	Hava Açık, ray kuru, 25 °C
Makinist Görüşü	
Sonuç	
	Kritik bölge başlangıcı 184+661 olarak verilmiş ancak belirtilen kesim Selimağa saydın içi olduğundan Km 186+500 deki kurplu ve eğimli kesimde durularak tecrübe edilmiştir.
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	Selimağa - Gazellidere arası duruş dahil kayıp 8 dk oldu.
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.5. Tavşanlı - Güzelyurt hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih/Saat	9.08.2017
Hat Kesimi ve istasyon isimleri	Alayunt-Balıkesir (Tavşanlı -Güzelyurt)
Tren No	73002
Loko No	DE 36020
Tren Ton	1703
Tren Boyu	456 metre (44 vagon, 92 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	46+698 - 40+353
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz Taşkoparan Afyon Araç Bakım Müdürlüğü
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0505 #####
Makinist Adı Soyadı	İbrahim Çınar
Makinist İletişim Bilgileri	0505 #####
Kritik Bölge (K.B.) Verileri Km 46+698 - 40+353	
Kritik Bölge Sonunda Ulaşılan Hız (km/h)	26
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	855
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	46+100
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	127
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	300
Hava ve Yol Durumu	Hava Açık, ray kuru,37 °C
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	Tavşanlı - Güzelyurt arası duruş dahil seyir kaybı olmadı.
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.6. Tınaztepe - Kocatepe hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih /Saat	8.08.2017
Hat Kesimi ve İstasyon İsimleri	Afyon-Karakuyu (Tınaztepe - Kocatepe)
Tren No	73017
Loko No	DE 36005
Tren Ton	1399
Tren Boyu	435 metre (29 vagon, 86 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	32+600 - 35+000
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz Taşkoparan Afyon Araç Bakım Müdürlüğü
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0505 #####
Makinist Adı Soyadı	Süleyman Oktay
Makinist İletişim Bilgileri	0505 #####
KRİTİK BÖLGE (K.B.) VERİLERİ (Km32+600 - 35+000)	
Kritik Bölge Sonunda Ulaşılan Hız (km/h)	28
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	342
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	32+950
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	115
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	300
Hava ve Yol Durumu	Hava Kapalı, ray ıslak,20 °C
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	Tınaztepe - Kocatepe arası duruş dahil kayıp olmadı.
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.7. Oturak - Dumlupınar hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih	14/15.12.2017
Saat	01:30
Hat Kesimi	Basmane- Afyon
İstasyon İsimleri	Oturak-Dumlupınar
Tren No	33302
Loko No	DE 36001
Tren Ton	1070
Tren Boyu	497 metre (30 vagon, 96 dingil)
Kritik Bölge (km+m)	348+680 - 350+960
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz TAŞKOPARAN
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0 505 #####
Makinist Adı Soyadı	Nurettin KATAR
Makinist İletişim Bilgileri	0 505 #####
KRİTİK BÖLGE (K.B.) VERİLERİ (KM. 348 + 680 / KM. 350 + 960.)	
Kritik Bölge İçinde Ulaşılan Maksimum Hız (km/h)	24
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	440
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	350+100
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	195
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	280
Hesaplanan Tonaj	1075
Şebeke Bildiriminde Yayınlanan Tonaj	750 (DE 33000)
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Hava yoğun çişli olmasına rağmen tecrübe başarılıdır.	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları

Çizelge A.8. Kaklık - Bozkurt hat kesimi verileri

LOKO ÇEKERİ KONTROL LİSTESİ	
Tarih	7.09.2017
Saat	17:30
Hat Kesimi	Alsancak-Eğiridr
İstasyon İsimleri	Kaklık - Bozkurt
Tren No	73927
Loko No	DE 36011
Tren Ton	1416
Tren Boyu	522 metre (32 vg., 94 Dingil)
Kritik Bölge	km 287+440 - km 289+620
Kritik Hız (km/h)	23
Formu Hazırlayan Personel ve İşyeri	Cengiz TAŞKOPARAN
Formu Hazırlayan İletişim Bilgileri	0 505 #####
Makinist Adı Soyadı	Adil AYDIN
Makinist İletişim Bilgileri	0 543 #####
KRİTİK BÖLGE (K.B.) VERİLERİ (KM. 287 + 440 / KM. 289 + 620)	
Kritik Bölge İçinde Ulaşılan Maksimum Hız (km/h)	27
Kritik Bölge Sonunda Geçen Süre (s)	370
Kritik Hıza Ulaşılan Yer (km+m)	287+650
Kritik Hıza Ulaşıldığında Geçen Süre (s)	85
Kritik Bölge Sonunda Lokonun Cer Akımı (kN)	304
Hesaplanan Tonaj	1380
Şebeke Bildiriminde Yayımlanan Tonaj	1000 (DE 33000)
Makinist Görüşü	
Sonuç	
Asgari ve Tabi Seyir Süresi Hk. Görüş	
Ekler	Lokonun km hız kayıtları, TMS (Tren Yönetim Sistemi) kayıtları