

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEMİRYOLLARINDA LOKOMOTİF ÇEKERLERİNİN HESAPLAMA
YÖNTEMİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN EREN BENİ

TEZ DANIŞMANI
PROF.DR. HASAN YAMIK

BİLECİK, 2021

10402618

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DEMİRYOLLARINDA LOKOMOTİF ÇEKERLERİNİN HESAPLAMA
YÖNTEMİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HÜSEYİN EREN BENİ

TEZ DANIŞMANI
PROF.DR. HASAN YAMIK

BİLECİK, 2021

10402618

BEYAN

“Demiryollarında Lokomotif Çekerlerinin Hesaplama Yönteminin Belirlenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Hüseyin Eren BENİ

...../...../ 2021

ÖN SÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde değerli bilgilerini benimle paylaşan, samimiyetini ve güler yüzünü benden esirgemeyen hocam Prof. Dr. Hasan YAMIK hocamıza , çalışmam boyunca beni sürekli destekleyen Şube Müdürüm Osman KILIÇ'a ve çalışma süresince konu, kaynak ve yöntem açısından bana sürekli yardımda bulunarak yol gösteren tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.



ÖZET

DEMİRYOLLARINDA LOKOMOTİF ÇEKERLERİNİN HESAPLAMA YÖNTEMİNİN BELİRLENMESİ

Demiryolu yatırımları ekonomik kalkınmanın yanında bilimsel, sosyal ve kültürel gelişme ile bütünleşmeyi sağlamak adına önemini artırmaktadır. Lokomotifler, toplumsal dönüşüm ve entegrasyonun başrol oyuncusu durumundadırlar. Günümüzde demiryollarında farklı güçte ve farklı kuvvetlerde birçok lokomotif bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ile yeni lokomotiflerin gücü artırılmış olup, yük çekme kapasitesi yükselmiştir. Böylece demiryollarında toplam taşıma miktarının artması ile birlikte lokomotif çeker hesabının doğru bir şekilde yapılma ihtiyacı doğmuştur.

Bu çalışmada genel olarak demiryolu hatlarında trene etki eden dinamik kuvvetler anlatılmıştır. İlk aşamada lokomotifin geçmişi ile Ülkemizde bulunan lokomotiflerin teknik özellikleri anlatılmış olup, trene etki eden dirençlerin yenilebilmesi için gerekli olan tekerlek kuvvetinin nasıl hesaplanılacağına değinilmiştir. Daha sonra trenlerin seyir dirençleri lokomotif ve vagonlar olmak üzere iki ana faktör üzerinde incelenerek demiryollarında gelişmiş Ülkelerde kullanılan formüllerden bahsedilmiştir. Aynı şekilde hat üzerinden gelen kuru ve rampa dirençlerinin trenler üzerinde etkisini gösteren Uluslararası formüllerden bahsedilmiştir. Aderans hesabı, farklı ülkelerdeki hesaplamalar incelenerek karşılaştırılmıştır. Tüm bu direnç ve sınırlamalar anlatıldıktan sonra sonra lokomotifin çekebileceği yükün nasıl hesaplanacağı anlatılarak İtalya, Fransa, Almanya ve Amerika'da lokomotif çekerlerinin karşılaştırılması yapılarak hangi formüllerin kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tren direnci, Seyir direnci, Lokomotif, Çeker

ABSTRACT

DETERMINATION OF CALCULATION METHOD OF LOCOMOTIVE DRIVE IN RAILWAY

Importance of railway investments is increased by not only economical development but also by providing integration with social and cultural development. Locomotives are main figures of social transformation and integration. Nowadays there are many types of locomotives at different power and force levels. With developing technology, new locomotives are increased in pulling power and freight capacity. With the increase of total carrying capacity, there emerges the need of calculating the locomotive tractive effort accurately.

In this study, dynamic forces that affect train on railway lines are explained in general. In the first step, history of locomotives and technical characteristics of locomotives in our country are explained and mentioned on how to calculate the needed wheel force to overcome the resistances that affect the train. Later on, running resistances of trains are analyzed on two factors as locomotive and wagons and the formulas used in developed countries for railways are mentioned. Likewise, international formulas that show the effect of the curve and grade resistances coming from the line on trains are mentioned. Aderans calculation is compared by examining calculations in different countries. After all these resistances and constraints are explained, the calculation of tractive force of the locomotive is clarified and it is explained that which formulas would be beneficial by comparing locomotive tractive forces in Italy, France, Germany and USA.

Key Words: Train resistance, Running resistance, Locomotive, Haulage

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖN SÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. ÜLKEMİZDEKİ LOKOMOTİFLER İLE İLGİLİ TEKNİK BİLGİLER.....	8
2.1. DE 22000 Lokomotifi	8
2.2. DE 24000 Lokomotifi	8
2.3. DE 33000 Lokomotifi	9
2.4. DE 36000 Lokomotifi	10
2.5. E 43000 Lokomotifi	10
2.6. E 68000 Lokomotifi	11
3. TREN DİNAMİĞİ.....	12
3.1. Lokomotifin tekerlek kuvveti.....	13
3.2. Tren seyir direnci	14
3.2.1. Lokomotife etki eden dirençler	18
3.2.1.1. Fransız demiryollarında lokomotif direnci.....	19
3.2.1.2. Amerikan demiryollarında tren direnci	19
3.2.1.3. Alman demiryollarında tren direnci	19
3.2.1.4. İtalyan demiryollarında tren direnci	20
3.2.2. Vagona etki eden dirençler.....	20
3.2.2.1. Fransız demiryollarında vagon direnci.....	21
3.2.2.2. Alman demiryollarında vagon direnci	21
3.3. Kurp direnci	22

3.3.1. Fransız ve İtalyan demiryollarında kurp direnci	23
3.3.2. Amerikan demiryollarında kurp direnci	23
3.3.3. Alman demiryollarında kurp direnci.....	23
3.4. Rampa direnci	24
3.5. Eşdeğer direnç	25
4. ADERANS	26
4.1. Alman demiryollarında aderans	28
4.2. İtalyan demiryollarında aderans	28
5. ÇEKİLECEK YÜK HESABI.....	31
6. KOŞUM TAKIMI (KANCA) ÇEKERİ.....	33
7. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	39
7.1. Hesaplanan seyir dirençleri	39
7.2. Hesaplanan eşdeğer dirençler	41
7.3. Hesaplanan lokomotif çekerleri.....	43
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKÇA	50

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Ülkelere ve ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (2019 ton – km).	6
Tablo 2.1. DE 22000 Lokomotifin teknik özellikleri.	8
Tablo 2.2. DE 24000 Lokomotifin teknik özellikleri.	9
Tablo 2.3. DE 33000 Lokomotifin teknik özellikleri.	9
Tablo 2.4. DE 36000 Lokomotifin teknik özellikleri.	10
Tablo 2.5. E 43000 Lokomotifin teknik özellikleri.	10
Tablo 3.1. Ülkelerin lokomotif ve tren direnç formülleri.	20
Tablo 3.2. Ülkelerin vagon direnç formülleri.	22
Tablo 3.3. Ülkelerin kurp direnç formülleri.	24
Tablo 4.1. İtalyan demiryollarında aderansın hesaplanması.	29
Tablo 6.1. Koşum takımlarının minimum kırılma kuvvetine göre sınıflandırılması.	34
Tablo 6.2. İtalyan ve Türkiye’de hesaplanan kanca çeki.	37
Tablo 7.1. İtalyan, Türkiye, Fransa ve Almanya için hesaplanan seyir dirençleri.	40
Tablo 7.2. İtalyan, Türkiye, Fransa ve Almanya için hesaplanan eşdeğer dirençleri.	42
Tablo 7.3. İtalyan, Türkiye, Fransa ve Almanya için hesaplanan lokomotif çekerleri.	44

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. George Stephenson tarafından üretilen buharlı lokomotif.	4
Şekil 1.2. 1000 km ² 'ye düşen demiryolu uzunluğu.	5
Şekil 3.1. Trenin hareketi.	12
Şekil 3.2. Elektrikli lokomotifteki tekerlek kuvvetinin hız ile değişimi.	13
Şekil 3.3. Dizel lokomotifteki tekerlek kuvvetinin hız ile olan değişimi.	14
Şekil 3.4. Hızın tren direncine olan etkisi.	15
Şekil 3.5. Yük ile yolcu trenlerinin seyir dirençlerinin karşılaştırması.	18
Şekil 3.6. Rampa direnci.	24
Şekil 4.1. Tekerlek ile ray arasındaki yapışma.	26
Şekil 4.2. Aderans ile hız arasındaki ilişki.	27
Şekil 4.3. Kontrol ünitesi olan rayın aderansa etkisi.	28
Şekil 4.4. Aderansın rayın durumu ve trenin hızına göre etkisini gösteren grafik.	29
Şekil 4.5. Almanya ve İtalya için hesaplanan aderans değerinin karşılaştırılması.	30
Şekil 5.1. Elektrikli ve dizel lokomotiflerde tekerlek kuvvetinin belirli rampalarda hızla durumunu gösteren grafik.	31
Şekil 6.1. Vidalı koşum takımı.	33
Şekil 6.2. Koşum takımı direnci ile tekerlek kuvveti arasındaki diyagram.	35
Şekil 6.3. Türkiye ve İtalya için hesaplanan kanca çekerlerinin karşılaştırılması.	38
Şekil 7.1. Seyir dirençlerinin karşılaştırılması.	41
Şekil 7.2. Eşdeğer dirençlerinin karşılaştırılması.	43
Şekil 7.3. Lokomotif çekerlerinin karşılaştırılması.	45

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

- R : Trenin ana direnci, daN
- V : Aracın hızı, km/s
- q : Vagonların ortalama ağırlığı, ton
- Q : Trendeki tüm vagonların ağırlığı, ton
- c : Kayma ve yuvarlanma sırasındaki sürtünme katsayısı
- d : Rüzgar basınç katsayısı
- T : Trenin ağırlığı, ton
- m : Her taşıyıcının genel aerodinamik hareket direnci üzerindeki etkisini gösteren orantı katsayısı
- A_1 : Lokomotifin enine kesit alanı, m²
- A_2, \dots, A_n : Vagonların enine kesit alanları, m²
- P_1 : Aracın dingil yükü, ton
- n : Aracın dingil sayısı
- A : Aracın ön yüzey alanı, m²
- P : Lokomotifin gücü, Kw
- F : Lokomotifin tekerlek kuvveti, daN
- G_L : Lokomotifin ağırlığı, ton
- R_L : Lokomotifin seyir direnci, daN
- K : Sürtünme katsayısı
- r : Trenin birim seyir direnci, daN/ton
- r_v : Vagonların birim seyir direnci, daN/ton
- G_v : Vagonların toplam ağırlığı, ton
- R_v : Vagonların seyir direnci, daN/ton
- R_1 : Kurbun yarıçapı, m
- r_k : Kurbun birim direnci, daN/ton
- R_k : Kurbun direnci, daN
- i : Hattın eğimi
- r_r : Rampa birim direnci, daN/ton
- R_r : Rampa direnci, daN
- r_e : Eşdeğer birim direnç, daN/ton

μ	: Ray ile tekerlek arasındaki yapışma kuvveti, daN/ton
μ_0	: $V=0$ km/sa değeri için; aderans katsayısı
l_g	: Araçlar arası boşluk, m
C_{XB}	: Boji sürtünme katsayısı
n_B	: Boji sayısı
n_{PC}	: Pantografların sayısı
m_{TC}	: Vagonların kütlesi (ton)
m_{PC}	: Lokomotifin kütlesi (ton)
m	: Toplam kütle (ton)
n_{TC}	: Toplam vagon sayısı
n_{PC}	: Toplam lokomotif sayısı
P	: Toplam güç (kW)
C_x	: Sürtünme katsayısı
S	: Ön kesit alanı (m ²)
d	: Görüş uzunluğu (m)
l	: Tren uzunluğu (m)

Kısaltmalar

GM	: General Motors
MTE	: Matériel de Traction Electrique
EMD	: Electro Motive Division
SNCF	: Fransız Demiryolları
AREA	: Amerikan Demiryolu Mühendisler Birliği
DB	: Alman Demiryolları

1. GİRİŞ

Demiryolu tarihi ilk olarak Osmanlı topraklarında 211 km'lik Kahire-İskenderiye hattının 1851 yılında açılmasıyla, bugünkü milli sınırlar içindeki demiryollarının tarihi ise 1856 yılında 130 km'lik İzmir-Aydın demiryolu hattının açılması ile başlar.

Demiryollarının ilk yük çeken aracı buharlı lokomotiflerdir. Denis Papen 1687 yılında buharın gücünü bulmuştur. Daha sonra James Watt pistonlu buhar makinesini buldu. Oliver Evans 1801 yılında demir tekerlek ile ray arasındaki yapışmadan yararlanılarak çekme gücünün olabileceğini keşfetti. 1813 yılında; William Hadley ve Timeteus Hackwort raylar üzerinde yürüyen ilk lokomotifi işletmeye başladı. Geroge Stephenson 1815 yılında pistondan aldığı tahrik gücünü ana tahrik tekerleğine dişli çarklarla iletmek yerine, kranklar aracılığıyla direkt olarak silindirden iletmeyi deneyerek aracın çekme gücünü iki katına çıkardı. 1818 yılında vagonların harekete karşı direncini belirlemek için ilk deneylerini gerçekleştirdi. 1830 yılında ise 1/96'lık bir eğimde, 17 tonluk yükün 16 km/s hızla çekilmesini sağlamıştır.

Çek mühendis Franz Anton Ritter Von Gerstner ise 1825 yılında vagonun raylar üzerinde mal aktarırken harekete karşı direncinin doğal hareketinden yedi kat daha fazla olduğunu ortaya koydu.

1858 yılında Rus mühendis A. Dobronravov tren hareketine karşı direncin unsurlarını ayrıntılı olarak ele alıp, lokomotifin çekiş gücü, tren ağırlığı, piston profili arasındaki etkileşim sorunu ile ilgili çalışmalar yaptı (Dobronravov, 1858).

Rusya'da çekiş gücünü araştırma ile belirlemeye yönelik ilk girişimler ise Mikolaiv Okatov tarafından yapılmıştır. 1869 yılında Mikolaiv demiryolunun Peterburg-Luban kesiminde kayma (çekiş gücünün aderans ile sınırlamasını belirleme) üzerinde deneyler yaptı.

1877-1879 yılları arasında Rus mühendis V. Lopushinskyi tarafından hareket, çekiş kuvveti ile su ve yakıt tüketimine karşı vagon direnci hakkında çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir (Lopushinskyi, 1880)

İlk deneyler sırasında yolcu vagonlarının dirence etkisi yük vagonlarına oranla daha düşük olduğu gözlemlendi. Moskova Demiryolu Mühendisleri Enstitüsü profesörü L. Ermakov, lokomotifler tarafından Yakıt Tüketiminin Belirlenmesi için 1877 yılında, tren ağırlığını, hareket süresini, izin verilen hızları belirlemek için çekiş hesaplamalarının temelini bilimsel olarak geliştirdi. Böylece, trenin hızlanmasının rampadan önce ekonomik faydasını tanımlamak için, trenin biriken kinetik enerjisi dikkate alınmıştır. Lokomotif Operasyonuna

İlişkin Veriler ve Hesaplamalar 1883 yılında, trende hareket eden hareket direnci kuvvetlerinin dağılımı şu yönüyle ele alınmıştır: trenin düz yatay yol üzerindeki (aligman) harekete karşı direnç, trenin rampa üzerindeki hareketine karşı direnç, trenin ray eğrileri üzerindeki hareketine karşı direnç (Sapronova vd., 2017:10).

1881'de Ukraynalı mühendis A. Borodin, lokomotifler üzerinde yapılan deneyler sırasında yapay koşullar yaratma fikrini ifade etti ve deneyleri demiryolu hattından laboratuvara taşımayı öneren ilk kişi oldu, herhangi bir sabit modda lokomotif çalışmasını şanzımana aktardı.1882'de Kiev atölyelerinde, karmaşık makinelerin test edildiği dünyanın ilk motor laboratuvarını yarattı. (Borodin, 1893)

Daha sonraları Profesör N.Petrov'un sürtünme alanındaki teorik çalışmaları klasik hale geldi. Makalelerinde, tren çekiş teorisi üzerine araştırmaları sistemleştirdi. Aynı zamanda Profesör N. Petrov, tekerleklerin kavşaktaki harekete karşı direncinin nedenlerini ve trenin hareketine karşı hava direnci vakalarını ayrıntılı olarak ele aldı. Profesör N. Petrov tarafından 1883 yılında geliştirilen ve yayınlanan hidrodinamik sürtünme teorisi, tekerlek çiftlerinin aks kutularında meydana gelen olayları açıkladı ve yeni bir yaklaşımla hareket direnci sorununa ışık tutmaya yardımcı oldu. N. Petrov, tren çekiş teorisinin kurucusu olarak kabul edilir. İki akslı yük arabalarının hareketine karşı ana spesifik direnci belirlemek için bir formül geliştirdi. Bu formül, yapısı, yani harekete karşı direnci etkileyen iki ana faktörün varlığı arabaların hızı ve yükleme derecesi. Profesör N.Petrov'un iki akslı yük arabaları için formülü aşağıdaki gibidir;

$$R=1,2 + \frac{0,9 \times V}{q} + \frac{0,0012 \times V^2}{q} + \frac{0,03 \times V^2}{Q} \quad (1.1)$$

Bu formülde;

- V=Aracın hızı(km/s)
- R=Trenin ana direnci(daN)
- q= Vagonların ortalama ağırlığı (ton)
- Q=Trendeki tüm vagonların ağırlığı (ton) (Sapronova vd., 2017:12).

N. Petrov ve V. Lopushinsky'nin söz konusu çalışmaları, lokomotif çeker hesaplama yöntemlerini geliştirme fırsatı verdi.

1904 yılında Amerikalı profesör W.J. Davis, Street Railway Journal'da ilk elektrikli lokomotiflerin deneysel araştırmasına dayanan bir makale yayınladı. Elektrikli lokomotiflerin yüksek hızlarda direncini ve taşıma numarasının direnç üzerindeki etkisini belirlemek için ilk

karmaşık testler 1900'de Buffalo & Lockport bölümünde yapıldı ve maksimum hız 96 km / saat'e ulaştı. Deneysel verileri kullanarak W.J. Davis, elektrikli çekiş ile trenlerin direncini hesaplamak için aşağıdaki formülü önerdi (Davis, 1904).

$$R=c \times V^2 + \frac{d \times V^2}{T} \times A + m \times (A_1 + A_2 + \dots + A_n) \quad (1.2)$$

Bu formülde;

- V =Aracın hızı(km/s)
 - R =Trenin seyir direnci(daN)
 - c =kayma ve yuvarlanma sırasındaki sürtünme katsayısı
 - d = rüzgar basınç katsayısı
 - T = Trenin ağırlığı (ton)
 - m = Her taşıyıcının genel aerodinamik hareket direnci üzerindeki etkisini gösteren orantı katsayısı
 - A_1, A_2, \dots, A_n = Lokomotifin (A_1) ve vagonların (A_2, \dots, A_n) enine kesit alanları (m^2)
- Trendeki tüm vagonlar aynı olduğu zaman formül aşağıdaki şekilde basitleştirilir;

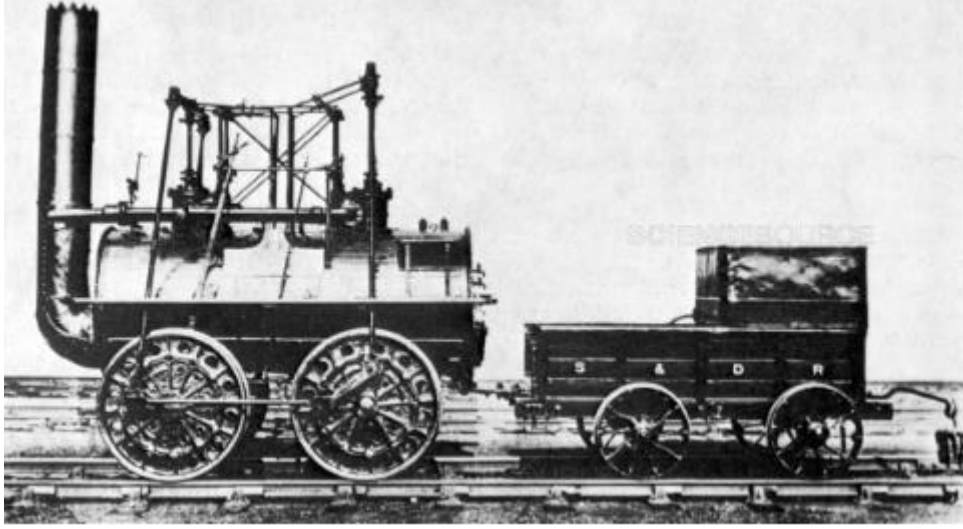
$$R=c \times V^2 + \frac{d \times A \times V^2}{T} \times [1 + m \times (n-1)] \quad (1.3)$$

Bu formülde;

- n =Trendeki vagon sayısı

1908-1916 dönemi boyunca, Illinois Üniversitesi'nin (ABD) deney laboratuvarında, Profesör E. Schmidt ve mühendis N. Dunn'ın yük direncini ve yük direncini belirlemek için rehberliğinde buharlı trenler için büyük bir dizi deney gerçekleştirildi (Schmidt, 1918).

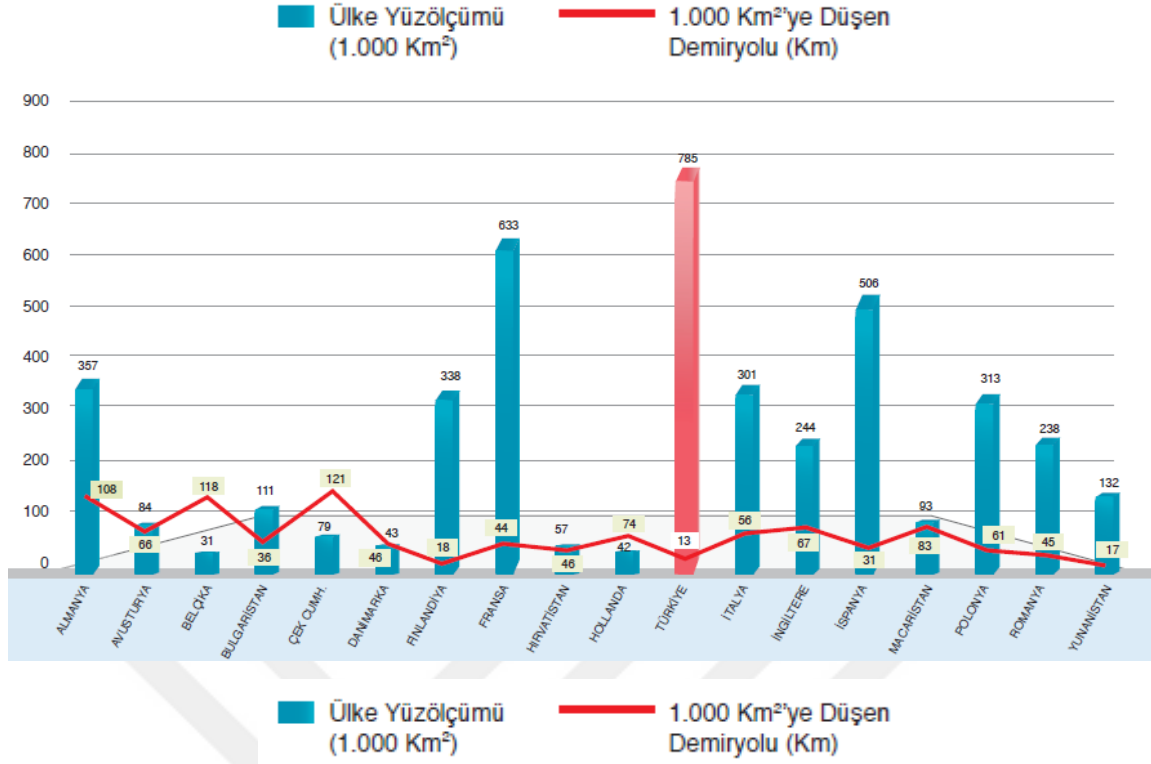
Ancak ısı kayıpları ve yakıtın bütünü ile yakılamaması nedeniyle buharlı lokomotifler %5 verim ile çalışmaktaydı. Veriminin çok düşük olması ve yeni makinelerin üretilmesi ile birlikte günümüzde kullanılmamaktadır.



Şekil 1.1. George Stephenson tarafından üretilen buharlı lokomotif.

İlerleyen yıllarda teknolojinin gelişmesine bağlı olarak; motorların ve elektrikli makinelerin gelişmesi ve bunların demiryollarına uygulanması sonucu dizel ve elektrikli araçlar üretilmiştir. Dizel araçların verimi %85, elektrikli araçların verimi ise %95'tir.

Karayolu araç trafiğinde tıkanmalar, trafik kazaları, hava ve gürültü kirliliği karayolu ulaşım modunu tartışılır hale getirmiş olup, demiryolları teknolojinin gelişmesi ve daha güvenilir bir ulaşım modu olmasından dolayı yük taşımacılığı karayollarından demiryollarına doğru geçiş yapmaktadır. Bu nedenle lokomotiflerin gelişmesiyle birlikte çekebilecekleri yük miktarının artması ile birlikte demiryolları yük taşımacılığı açısından her geçen yıl yük taşıma oranını artırmaktadır. Günümüzde küresel yük taşımacılığının %7'sini demiryolları oluşturmaktadır. Demiryolu yük taşımacılığı oranı diğer ulaştırma sistemlerine göre her geçen yıl daha da artmaktadır.



Şekil 1.2. 1000 km²'ye düşen demiryolu uzunluğu.

Kaynak: Demiryolu İstatistik Yıllığı, 2015-2019:90

2015-2019 Demiryolu İstatistik Raporunda belirtilen Şekil 1.2'de görüldüğü üzere Türkiye birçok ülkeye nazaran demiryolu ulaşım alanında geride kalmıştır.

Avrupa Birliği ülkelerinde bütün ulaştırma sistemleri içerisinde yolcu ve yük taşımacılığı payı, demiryolu işletmelerinde yapılan reformlar ve Avrupa Birliği'nin demiryolu sektörünü geliştirmeye ve serbestleştirmeye yönelik direktifleri sayesinde ülkemize göre daha dengeli bir dağılım göstermektedir. Dünyanın en uzun demiryolu ağına sahip ülkesi ABD ise demiryolu ağını ağırlıklı olarak yük taşımacılığı amacıyla kullanmaktadır. Özellikle son 20 yılda demiryolu sektöründeki atılımları ile dünyanın en uzun yüksek hızlı demiryolu hattına (26.329 km) sahip ülkesi Çin Halk Cumhuriyeti olmuştur.

Cumhuriyetin ilk yılları Türkiye'nin sosyal ve ekonomik kalkınmasında ulaşım sektörünün rolü büyüktür. Bu sektör içinde ilk önemli adım demiryolları ile atılmıştır. 1950 yılına kadar demiryollarındaki gelişmeye hız verilmiş ve ülkenin ana iktisadi bölgeleri büyük bölümü ile birbirine bağlanmıştır.

Ancak 1950 yılından sonra ülkemizde demiryolu sistemine yeterli oranda yatırım yapılmaması, demiryolu ağı yönünden ülkemizin Avrupa ülkelerinin oldukça gerisinde

kalmasına yol açmıştır. Cumhuriyetin ilk yıllarında yolcuda yüzde 42, yükte 68 olan demiryolu taşıma payı, 2000’de yaklaşık olarak yolcuda yüzde 2’lere, yükte yüzde 5’lere kadar azalmıştır.

Tablo 1.1. Ülkelere ve ulaştırma sistemlerine göre yük taşımaları (2019 ton – km).

Ülke ve kodu	Demiryolu	%	Karayolu	%	Toplam
Türkiye	12,8	3,9	262,8	80,2	327,7
İngiltere	17,2	9,9	147,3	84,4	174,6
Yunanistan	0,4	2,5	15,5	97,3	15,9
Almanya	112,2	24,6	271,7	59,5	456,4
İtalya	22,3	16,0	106,7	76,5	139,4
İspanya	10,7	6,1	154,7	88,3	175,1
Fransa	33,4	16,0	155,9	74,7	208,8
Avusturya	22,3	45,1	16,8	33,9	49,5
Çek Cumhuriyeti	15,8	39,6	21,9	54,9	39,9
Polonya	54,8	28,0	120,0	61,2	196,0
Macaristan	13,4	45,1	11,9	40,1	29,7
Bulgaristan	3,9	21,2	8,3	45,1	18,4
Hollanda	6,5	6,8	33,2	34,9	95,2
Romanya	13,8	33,2	13,5	32,5	41,6
Avrupa Birliği	420,8	22,1	1.218,8	64,1	1.900,9
Amerika	2.314,7	33,0	2.953,2	42,1	7.021,8
Çin	2.696,2	13,7	6.677,2	33,9	19.712,9
Rusya	2.493,0	60,4	255,0	6,2	4.130,0

Kaynak: Demiryolu İstatistik Yıllığı, 2015-2019:86

2015-2019 Demiryolu İstatistik Raporunda belirtilen Tablo 1.1’de demiryolu yük taşımacılığının toplam yük taşımacılığının çok küçük bir payını aldığını görüyoruz. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de yük taşımacılığı her geçen yıl önem kazanmaktadır. Bu nedenle

mevcut demiryolu hatlarında, yük taşımacılığının daha etkin ve verimli bir şekilde yürütülmesi ve toplam taşımacılıktaki payının artırılabilmesi amacıyla, özellikle yük ve cevher taşımacılığının yoğun olduğu hatlardan başlanarak tüm hatların yenilenmesi çalışmaları devam etmektedir.

Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, taşımacılığın artık tek tip olarak değil, kombine taşımacılık gerektirmesi nedeniyle, demiryollarının önemi giderek artmaktadır. Bu nedenle özel sektörün içindeki yapılanmanın önemli bir dalı olması gerekmektedir. Ayrıca demiryolları daha güçlü lokomotifler alıp, çekme kapasitesini artırarak yük taşımacılığındaki payını yükseltmek istemektedir. Kullanılan dizel ve elektrikli lokomotifler teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha güçlü motorlar kullanılarak çekme kapasitelerinde artışlar olmaktadır. Ülkemizde yatırımlarını lokomotifler kapsamında artırırken ilk Milli Elektrikli Anahat Lokomotifini yakın zamanda raylara indirmeyi hedeflemektedir.

Demiryollarının yük taşımacılığındaki öneminin artması ile birlikte lokomotiflerin ne kadar yük çekebileceğinin doğru bir şekilde hesaplanma ihtiyacı hasıl olmuştur. Pek çok önde gelen ülkenin, demiryollarındaki lokomotifin yük çekme kapasitesini belirlemek için geliştirdikleri formüller ve hesaplama yöntemleri bulunmaktadır.

Türkiye’de yük taşımacılığının geliştiği bu dönemde demiryollarına talepte her geçen gün artmaktadır. Bu talebin karşılanması için demiryollarında taşıma kapasitesi açısından güçlü bir demiryolu ağına sahip olunması gerekmektedir. Ülkemizin coğrafik konumu nedeniyle arazilerimiz düz bir yapıda değil, dolayısıyla eğimli demiryolu hatlarımız mevcuttur. Bu eğimli hatlar lokomotifin çekme kapasitesini oldukça düşürmektedir.

Hareket ettirilmek istenen bir tren; harekete karşı koyan bir dizi sınırlamalar ve dirençlerle karşı karşıya kalır. Trenin hareketinin sağlanmasında ve seyrinde istenilen hızlara ulaşmak, istenilen yükleri çekmek her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle trene etki eden dirençleri ve sınırlamaları yenebilecek tekerlek kuvvetinin sağlandığı güç kadar lokomotifler yük çekebilecektir.

Bu çalışmada, lokomotif ve vagonlara etki eden dirençler ile hattan treni etkileyen unsurlar incelenmiştir. Bu kapsamda uluslararası kabul edilen bazı formüller ve formüllerde hangi parametrelerin dikkate alındığı gösterilmiştir. Yapılan çalışmada lokomotiflerin çekme kapasitesinin ideale en yakın şekilde hesaplanması, trene seyri sırasında etki eden sınırlamalar ve formüllerin birbiri ile kıyaslanarak hangi formülün çekme kapasitesine nasıl etki ettiğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

2. ÜLKEMİZDEKİ LOKOMOTİFLER İLE İLGİLİ TEKNİK BİLGİLER

Lokomotifler yani çeken araçların teknik özellikleri çekebilecekleri yük miktarını etkiler. Günümüzde ülkemizde işletilen lokomotiflerin teknik özellikleri incelenmiştir.

2.1. DE 22000 Lokomotifi

DE 22000 Lokomotifi 1985-1989 yılları arasında GM lisansı ile üretildi. Günümüzde kullanılmakta olan dizel lokomotifin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Tablo 2.1. DE 22000 Lokomotifin teknik özellikleri.

Lokomotif Ağırlığı	118 ton
Dingil Yüğü	19.6 ton
Dingil Tertibatı	Co - Co
Hız	120 km/sa
Ray Açıklığı	1435 mm
Tamponlar Arası	18942 mm
Tekerlek Çapı	1016 mm (yeni)
Yakıt Deposu	5678 lt
Dizel Motor Tipi	GM 16 - 645 E
Dizel Motor Gücü Ve Devri	1641 kW/2200 HP-904 d/dk
Cer Motor Tipi	D77 - DC
Cer Motor Gücü Ve Akımı	240 kW / 800 A
Cer Motor Devri	637,5 d/dk
Alternatör Tipi	AR10 / D18
Alternatör Gücü Ve Akımı	2016 kW / 4200 A
Alternatör Devri	900 d/dk

Kaynak: Tülomsaş 2020

2.2. DE 24000 Lokomotifi

DE 24000 Lokomotifi Fransız MTE'den yapılan teknoloji transferi ile, 1970 yıllarında üretilmeye başlandı. Günümüzde kullanılmakta olan dizel lokomotifin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Tablo 2.2. DE 24000 Lokomotifin teknik özellikleri.

Lokomotif Ağırlığı	113 ton
Dingil Yüğü	18.8 ton
Dingil Tertibatı	Co - Co
Hız	119 km/sa
Ray Açıklığı	1435 mm
Tamponlar Arası	19000 mm
Tekerlek Çapı	1100 mm (yeni)
Yakıt Deposu	4950 lt
Dizel Motor Tipi	Pielstick 16 PA4 V185
Dizel Motor Gücü Ve Devri	1765 kW/2400 HP-1500 d/dk
Cer Motor Tipi	TC 1074 - DC
Cer Motor Gücü Ve Akımı	271 kW / 800 A
Cer Motor Devri	697 d/dk
Alternatör Tipi	AST-108.30.5-12 T
Alternatör Gücü Ve Akımı	1560 kW / 2400 A
Alternatör Devri	1500 d/dk

Kaynak: Tülomsaş 2020

2.3. DE 33000 Lokomotifi

DE 33000 Lokomotifi GM'ye bağılı bir şirket olan EMD lisansıyla 2003 yılından itibaren üretilmeye başlandı. Günümüzde kullanılmakta olan dizel lokomotifin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Tablo 2.3. DE 33000 Lokomotifin teknik özellikleri.

Güç	2463 kW / 3300 HP
Lokomotif Ağırlığı	119 t
Dingil Yüğü	19.83 t
Dingil Tertibatı	Co - Co
Hız	131 km/h
Ray Açıklığı	1435 mm
Tekerlek Çapı	1016 mm (yeni)
Tahrik Sistemi	DC
Yakıt Deposu	6435 lt (1700 Galon)
Dizel Motor Tipi	16-645E3C (Turboşarjlı)
Dizel Motor Devri	904 d/dk
Cer Motor Tipi	D78B

Kaynak: Tülomsaş 2020

2.4. DE 36000 Lokomotif

DE 36000 Lokomotifi GM'ye bağı bir şirket olan EMD lisansıyla 2003 yılından itibaren üreilmeye başlandı. Günümüzde kullanılmakta olan dizel lokomotifin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Tablo 2.4. DE 36000 Lokomotifin teknik özellikleri.

Güç	2750 kW / 3688 HP
Lokomotif Ağırlığı	129 t
Dingil Yüğü	21.5 t
Dingil Tertibatı	Co - Co
Hız	120 km/h
Ray Açıklığı	1435 mm
Tekerlek Çapı	1069 mm (yeni)
Tahrik Sistemi	ELEKTRİK AC/ AC Dizel Motor + Alternatör + Redresör + Invertör + Cer Motoru
Yakıt Deposu	9000 lt (8700 lt kullanılabilir)
Dizel Motor Devri	1500 d/dk
Cer Motor Tipi	GE 5GEB30B 3 faz AC

Kaynak: Tülomsaş 2020

2.5. E 43000 Lokomotif

E 43000 Lokomotifi Toshiba lisansıyla 1987'den itibaren üreilmeye başlanmış olup, günümüzde üreilmemektedir. Günümüzde kullanılmakta olan elektrikli lokomotifin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir;

Tablo 2.5. E 43000 Lokomotifin teknik özellikleri.

Lokomotif Ağırlığı	120 t
Dingil Yüğü	20 t
Dingil Tertibatı	Bo - Bo -Bo
Hız	90 km/h
Ray Açıklığı	1435 mm
Tamponlar Arası	20240 mm
Tekerlek Çapı	1220 mm (monoblok)
Fren Sistemi	Havalı+Dinamik+(Rejeneratif)
Cer Motor Tipi	SE 222 - DC
Cer Motor Gücü Ve Akımı	530 kW / 635 A
Cer Motor Devri	1050 d/dk
Alçak Voltaj Dolabı Tipi	C G 179 - A
Yüksek Voltaj Dolabı Tipi	C G 178 - A
Ana Konvertör Tipi	RFE 003A

Kaynak: Tülomsaş 2020

2.6. E 68000 Lokomotifi

E 68000 Lokomotifi Rotem lisansıyla 2014-2016 yılları arasında üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan elektrikli lokomotifin gücü 5000 Kw olup, tahrik sistemi AC-AC'dir. Rejeneratif frenleme kabiliyeti olup, çevre dostu bir lokomotifir.



3. TREN DİNAMIĞI

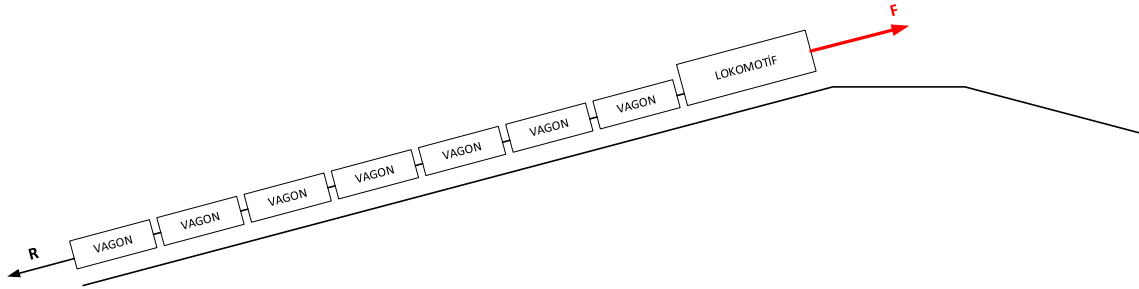
Trenlerin hareketi sırasında etki eden direnç kuvvetleri trenin hareketine etki eden engellemeye çalışan hususlar vardır. İstenilen hızlarda istenilen yükleri çekmenin her zaman mümkün olmayacağı koşullar vardır. Aynı zamanda tekerlek ile ray arasındaki yapışma (aderans) ile kanca çeker lokomotifin çer kuvvetini sınırlamaktadır.

Trenin hareketini etkileyen faktörler;

- Trenin hareketine karşı koyan ve trenin sabit hızla seyir etmesine engel olan dirençler,
- Dirençleri yenecek çer gücü,
- Trenin ilk hareketinde aderansın getirdiği kısıtlamalar,
- Koşum takımlarının mukavemetinden gelen sınırlamalardır.

Lokomotifin çer gücü trene etki eden toplam direnci yenmesi halinde trenin belirli bir V hızıyla seyretmesi sağlanır. Lokomotifin çekme kuvvetine (çer gücüne) F dersek;

- $R > F$ ise tren ilk hareketi sağlayamaz veya hareket hâlinde ise zamanla yavaşlar ve durur.
- $R = F$ ise hareket hâlindeki bir tren belirli bir hızla seyrine sabit olarak devam eder.
- $R < F$ ise hareket sağlandığı gibi aynı zamanda kuvvet farkından dolayı tren bir ivme (akselerasyon) kazanır.



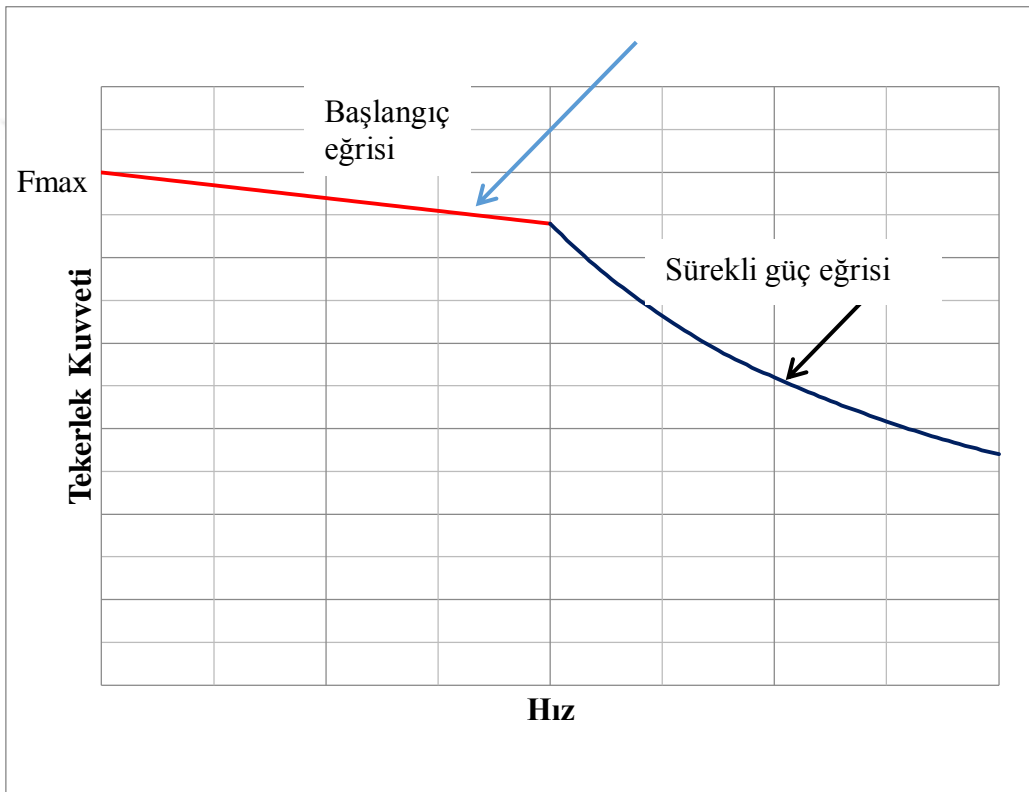
Şekil 3.1. Trenin hareketi.

3.1. Lokomotifin tekerlek kuvveti

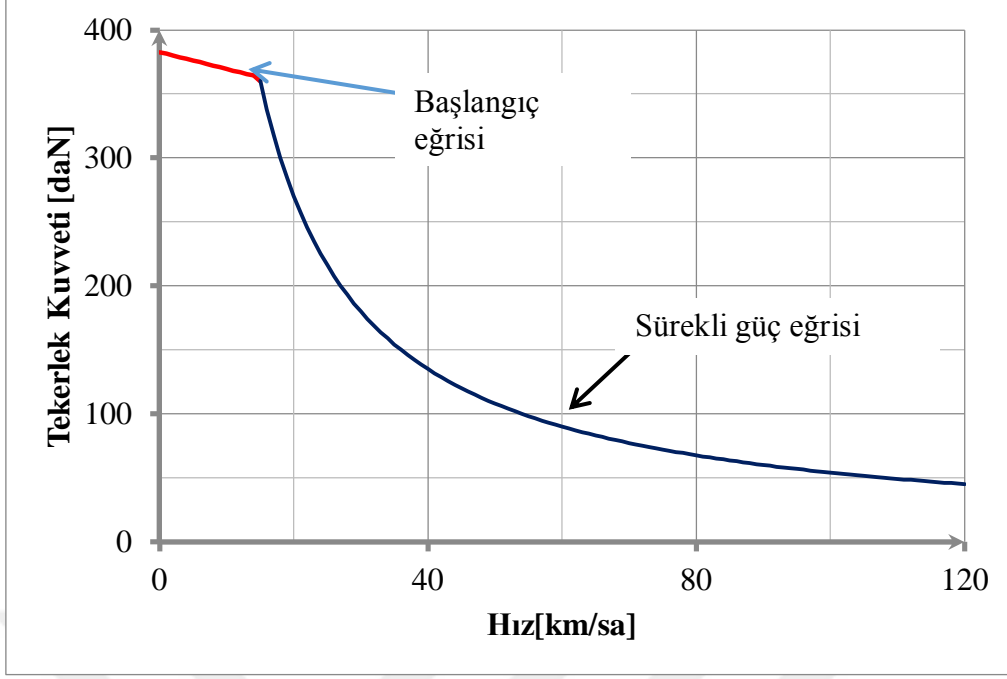
Tekerlek kuvveti lokomotifin aracın tahrikli tekerleklerinin tamamındaki çekme kuvvetini ifade eder.

$$P=(F \times V)/360 \quad (\text{kW}) \quad (3.1)$$

Lokomotifin gücü, tahrikli kuvvetin tekerleklere uygulanması gereken güç olup, P ile tanımlanmıştır. Lokomotifin tekerlek kuvveti F (daN), lokomotifin hızı V (km/sa) olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Elektrikli lokomotifteki tekerlek kuvvetinin hız ile değişimi.



Şekil 3.3. Dizel lokomotifteki tekerlek kuvvetinin hız ile olan değişimi.

Bir lokomotifin tekerlek kuvveti eğrisi şekil 3.2. ve 3.3'te gösterildiği gibi iki bölgeyi gösterir;

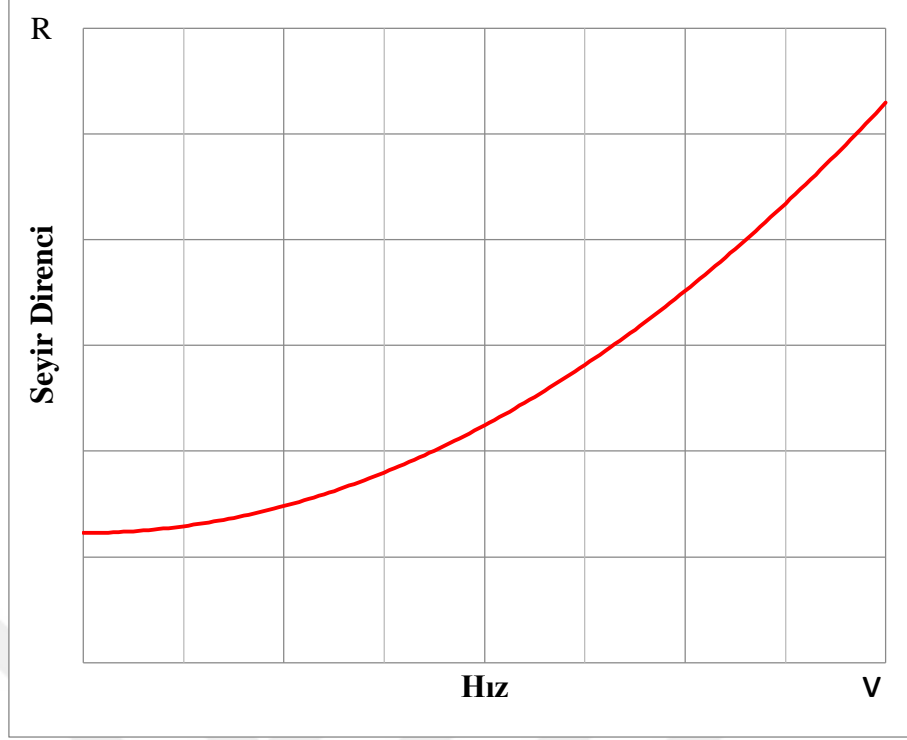
- Başlangıç eğrisi
- Sürekli güç eğrisi

Uygulanabilecek maksimum tekerlek kuvveti başlangıç eğrisinde motorların sürtünme ve maksimum sürüş torku ile sınırlıdır. Bu aşamada lokomotifler sınırlı bir zamanda çalışabilir. Sürekli güç eğrisindeki uygulanabilecek tekerlek kuvveti ise lokomotifin kendi gücü ile sınırlıdır. Lokomotif bu bölgede eğri üzerinde zamana bağlı olmadan sürekli çalışabilir. Başlangıç eğrilerinde genel olarak elektrikli lokomotiflerin dizel lokomotiflere göre daha yüksek hızlara ulaşabilmektedir.

3.2. Tren seyir direnci

Bu bölümde trene etki eden dirençler ve bu dirençlerin hesaplama yöntemlerine yer verilecektir.

Tren seyir dirençleri, trenin hareket ettiği yönün tersi yönde etki eden dirençlerdir. Harekete karşı koyan dirençler, genel olarak hıza bağlı olmakla birlikte hızdan başka; lokomotiflerin tipine, teknik özelliklerine, ray ile tekerlek(boden) arasındaki sürtünmelere, dingil başlarının (muyluların) dingil kutusu içerisinde sürtünmesine, hava direncine bağlıdır.



Şekil 3.4. Hızın tren direncine olan etkisi.

Demiryollarında tren direnci ile ilgili araştırmalar incelendiğinde deneysel çalışmalar sonucu tren direnci ile ilgili formülleri ilk olarak Schmidt tarafından 1910 yılında yayınlanmıştır. İlerleyen zamanlarda formüller geliştirilerek Strahl tarafından 1913 yılında ve Davis tarafından 1926 yılında yayınlanmıştır.

Trenin seyir direnci deneysel çalışmalar sonucunda hıza bağlı ikinci derece bir denklemle ifade edilmektedir. Tren direnç kuvveti R, çeşitli şekillerde "von Borries Formel", "Leitzmann Formel", "fonction de Barbier" ve Anglo-Sakson dünyasında "Davis denklemi" olarak bilinen ikinci dereceden bir fonksiyonla yaklaşırlır (Akbayır ve Çakır, 2017:114):

$$R=A+B \times V+C \times V^2 \quad (3.2)$$

(3.2) nolu eşitlikte; A ve B katsayıları mekanik dirençleri içerir ve tren kütlesine bağlıdır, böylece trenin daha düşük olduğu hızlarda direnç kuvveti esas olarak tren kütlesine bağlıdır. Trenin daha yüksek hızda, aerodinamik dirençle ilgili C terimi baskın hale gelir. Katsayıların değerleri genellikle açık hava koşulları için belirlenir ve özellikle C teriminin daha büyük olduğu tünel ortamı için farklı hesaplamalar yapmak gerekir (Boschetti vd., 2012:2).

(3.2) nolu denklemde; tren hızını V ile gösterilmekte ve birimi m/s dir. A, B, C amprik katsayılarıdır ve birimleri sırasıyla N, Ns/m ve Ns²/m² dir. A, B ve C katsayıları; hıza, dingil

ve aks sayısına, dingil basıncına, tren boyutuna, vagon sayısı ve tipine, hat tipine, lokomotif özelliklerine göre belirlenmektedir (Rochard vd., 2000; Lukaszewicz, 2001).

İlk katsayı olan A mekanik direnç olarak ifade edilir; hıza bağımlı değildir, dingil ve aks sayısı, dingil basıncı, tren boyutu, lokomotif tipi, ve hattın özellikleri ile değişmektedir. A terimi özellikle dingil sayısı ve dingil basıncı ile lineer olarak artmaktadır. A terimi yani mekanik direnç, aks ve dingil kutusu içindeki yataklardaki rulmanların direncini ve ray ile tekerleğin birbirine temas etmesi nedeniyle oluşan sürtünmeyi ifade eder (Rochard vd., 2000; Lukaszewicz, 2001).

İkinci terim BV, ampirik B katsayısı ve hız çarpanı ile değişmektedir. B katsayısı; tren boyutu veya aks ve dingil sayısı gibi etkiler ile değişmekte olup, dingil basıncının etkisini içermemektedir. BV terimi daha çok üçüncü terimle ifade edilen rüzgar direncinin bir kısmını da içerir. Tren yükünden ziyade tren boyutunun bir fonksiyonudur (Rochard vd., 2000; Lukaszewicz, 2001).

Üçüncü terim olan CV^2 , C katsayısı ve hızın karesi ile çarpılarak değişmektedir. CV^2 terimi trenin arka ve ön yüzeyine etki eden aerodinamik dirençleri ve trenin boyutu ile lineer olarak artan aerodinamik dirençlerin toplamı olarak ifade edilir (Rochard vd., 2000; Lukaszewicz, 2001).

Armstrong ve Swift, eski İngiliz Demiryolu hatlarında o sırada hizmette olan elektrikli çoklu üniteler için Davis denkleminin A, B ve C katsayılarını belirlemek için bir dizi ampirik ifade önererek, aşağıdaki sabitlerle ilişkilendirilmiştir (Armstrong vd., 1990).

$$A=a_1 m_{TC}+a_2 m_{PC} \quad (3.3)$$

$$B=b_1 m+b_2 n_{TC}+b_3 n_{PC} P \quad (3.4)$$

$$C=c_1 C_x S+c_2 dl+c_3 dl_g(n_{TC}+n_{PC}-1)+c_4 C_{XB} n_B+c_5 n_p \quad (3.5)$$

Bu formüllerde;

- m_{TC} =Vagonların kütlesi (ton)
- m_{PC} =Lokomotifin kütlesi (ton)
- m =Toplam kütle (ton)
- n_{TC} =Toplam vagon sayısı
- n_{PC} =Toplam lokomotif sayısı
- P =Toplam güç (kW)
- C_x =Sürtünme katsayısı
- S =Ön kesit alanı (m^2)

- d =Görüş uzunluğu (m)
- l =Tren uzunluğu (m)
- l_g =Araçlar arası boşluk (m)
- C_{XB} =Boji sürtünme katsayısı
- n_B =Boji sayısı
- n_{PC} =Pantografların sayısı olarak ifade edilir.

Rochard ve Schmid yukarıdaki 1-4 denklemlerini, SNCF'den edindikleri verilerle çalışma testleri sonucunda onaylanmıştır ve Class 373 Eurostar treni için M. de la Broise tarafından rapor edilmiştir (Boschetti vd., 2012:3).

Son yıllarda farklı yazarlar (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) nolu eşitliklerdeki gibi çeşitli ulusal demiryolu işletmelerinin tren direncini ölçme yaklaşımlarını tanımladı. Bunların çoğu Davis denkleminin deneysel modifiye edilmiş halidir ve belirli demiryolu taşıtlarıyla ilgili katsayıları içerir. A, B ve C katsayılarını, Armstrong-Swift denklemlerinde yer almayan farklı rakamsal verilerle ilişkilendirir (Dingil sayısı ve dingil yükü gibi) (Boschetti vd., 2012:3).

En yaygın hareket direnci için temel formül Davis tarafından oluşturulmuştur. Davis 1926 yılında düz yatay yollarda tren direncini hesaplamak için geliştirilmiş ampirik bir formül önermiştir;

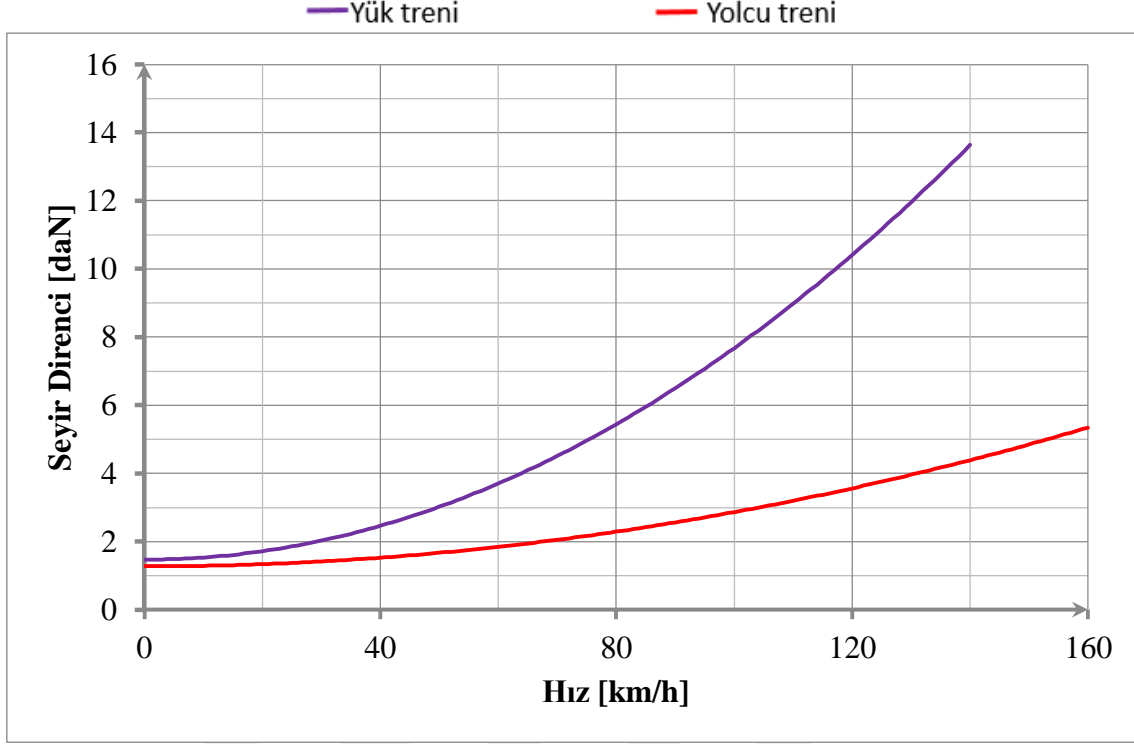
$$R=1,3 + \frac{29}{P} + 0,045 \times V + \frac{0,0005}{P \times n} \times A \times V^2 \quad (3.6)$$

Bu formülde;

- V =Trenin hızı(km/sa)
- A =Trenin ön yüzey alanı (m^2)
- P = Trenin dingil basıncı (ton)
- n =Trenin dingil sayısı
- R =Trenin seyir direnci (daN) olarak ifade edilir.

Uzun yıllar boyunca, Davis'in seyir direnci (3.6) nolu eşitlikteki formül değişmeden kaldı. Ancak yeni demiryolu araçları demiryolu sektörüne girdiğinde ampirik katsayıların nasıl değişeceği hakkında bir çok çalışmalar ve testler gerçekleştirildi. Bu nedenle Davis formülü birçok araştırmacının çabalarıyla sürekli olarak geliştirildi.

Trenlerin seyir dirençleri yaptığı taşımacılığa bağlı olarak değişir. Yük taşımacılığı ile yolcu taşımacılığını yapan trenin hıza bağlı olarak seyir direncini gösteren şekil aşağıdadır.



Şekil 3.5. Yük ile yolcu trenlerinin seyir dirençlerinin karşılaştırması.

3.2.1. Lokomotifin etki eden dirençler

Lokomotiflerin yani çeken araçların seyir dirençlerinin hesaplanmasında kullanılan ve test sonucu oluşturulan uluslararası birçok formül kullanılmaktadır. Lokomotifin seyir direncini etki eden faktörler;

- Lokomotifin ağırlığı,
- Dingil başlarının muyluların dingil kutusu içinde sürtünmesi (muylu direnci),
- Lokomotifin dingil sayısı,
- Ray ile tekerleğin temas etmesi sonucu oluşan sürtünme direnci,
- Lase hareketleri (trenin hareketi esnasında yatay ve dikey titreşimler),
- Lokomotifin ön yüzeyine dikey olarak etki eden rüzgar direnci etkilemektedir.

Uluslararası alanda bazı ülkeler lokomotif ve vagona etki eden dirençleri ayrı ayrı hesaplamakta, bazı ülkeler ise tren direnci üzerinden tek bir formülle hesaplamaktadır. Lokomotiflerin seyir dirençleri hesaplanırken birim olarak 1 (ton) lokomotif yüküne göre seyir direnci hesaplanır ve bu r_L (daN/ton) birimi ile tanımlanır. Lokomotif ağırlığı G_L (ton) olduğundan, lokomotiflerin seyir direnci;

$$R_L = r_L \times G_L \quad (3.7)$$

olarak bulunur.

3.2.1.1. Fransız demiryollarında lokomotif direnci

Fransız demiryolları SNCF Lokomotiflerin ön yüzey alanlarını $10,5m^2$ olarak kabul etmiş ve Davis formülünü geliştirerek aşağıdaki formülü bulmuştur;

$$R_L = 0,65 \times G_L + 13 \times n + 0,01 \times G_L \times V + 0,045 \times V^2 \quad (3.8)$$

Bu formülde;

- V =Aracın sürekli sağlayabileceği minimum hız(km/s)
- n =Aracın dingil sayısı
- G_L =Lokomotifin ağırlığı (ton)
- R_L =Lokomotifin seyir direnci (daN) olarak ifade edilir.

3.2.1.2. Amerikan demiryollarında tren direnci

Amerikan demiryolları lokomotif ve vagonların seyir dirençlerini ayrı ayrı hesaplamak yerine trenin seyir direncini tek bir formüle hesaplama yapmaktadırlar. Amerikan Demiryolu Mühendisler Birliği (AREA) Davis denklemini 40 yıl süren uzun deneylere dayanarak aşağıdaki şekilde değiştirmiştir;

$$r = 0,6 + \frac{20}{P} + 0,01 \times V + \frac{K}{P \times n} \times V^2 \quad (3.9)$$

Bu formülde;

- V =Aracın sürekli sağlayabileceği minimum hız (km/s)
- n =Aracın dingil sayısı
- P_1 = Aracın dingil yükü (ton)
- K =Sürtünme katsayısı
- r =trenin birim seyir direnci (daN/ton) olarak ifade edilir.

(3.7) nolu eşitlikte; K konvansiyonel ekipmanlar için 0,07 olarak alınmaktadır.

3.2.1.3. Alman demiryollarında tren direnci

Alman demiryolları (3.2) nolu davis eşitliğindeki B katsayısının etkisinin çok az olması nedeniyle formüllerinden çıkartmıştır. Alman demiryolları da Amerikan demiryolları gibi lokomotif ve vagonların seyir dirençlerini ayrı ayrı hesaplamak yerine trenin seyir direncini tek bir formüle hesaplama yapmaktadırlar. Alman demiryollarının yük trenleri için seyir tren direnci aşağıdaki gibidir;

$$r = 1 + 0,2 \times 0,1 \times (V/10)^2 \quad (3.10)$$

Bu formülde;

- V=Aracın sürekli sağlayabileceği minimum hız (km/s)
- r=trenin birim seyir direnci (daN/ton) olarak ifade edilir.

3.2.1.4. İtalyan demiryollarında tren direnci

İtalyan demiryolları Alman demiryolları gibi (3.2) nolu davis eşitiliğindeki B katsayısının etkisinin çok az olması nedeniyle formüllerinden çıkartmış ve lokomotif ve vagonların seyir dirençlerini ayrı ayrı hesaplamak yerine trenin seyir direncini tek bir formüle hesaplama yapmaktadırlar. İtalyan demiryollarının yük trenleri için seyir direnci aşağıdaki gibidir;

$$r = 1,5 + 0,00064 \times V^2 \quad (3.11)$$

Bu formülde;

- V=Aracın sürekli sağlayabileceği minimum hız (km/s)
- r=trenin birim seyir direnci (daN/ton) olarak ifade edilir.

Tablo 3.1. Ülkelerin lokomotif ve tren direnç formülleri.

Ülkeler	Lokomotif Direnci(daN)	Tren Direnci(daN/ton)
İtalyan	-	$r = 1,5 + 0,00064 \times V^2$
Alman	-	$r = 1 + 0,2 \times 0,1 \times (V/10)^2$
Fransız	$R_L = 0,65 \times G_L + 13 \times n + 0,01 \times G_L \times V + 0,045 \times V^2$	-
Amerikan	-	$r = 0,6 + \frac{20}{P} + 0,01 \times V + \frac{K}{P \times n} \times V^2$

3.2.2. Vagona etki eden dirençler

Vagon seyir dirençlerini etki eden unsurlar;

- Vagonun yükü ile birlikte toplam ağırlığı,
- Dingil başlarının dingil kutusu içinde sürtünmesi (muylu direnci),
- Vagonun dingil sayısı,
- Ray ile tekerleğin teması sonucu oluşan sürtünme direnci,
- Lase hareketleri (trenin hareketi esnasında yatay ve dikey titreşimler).

Vagon seyir dirençleri hesaplanırken birim olarak 1 (ton) vagon yüküne göre seyir direnci hesaplanır ve bu birim vagon direnci r_v (daN/ton) ile ifade edilir. Vagon ağırlıkları G_v (ton) olarak tanımlandığından, vagonların seyir direnci;

$$R_v = r_v \times G_v \quad (3.12)$$

olarak bulunur.

Çekilen araç olarak tanımlanan vagonların seyir dirençlerinin hesaplanmasında da uluslararası deney ve testler sonucu elde edilmiş birçok formül bulunmaktadır. Uluslararası alanda bazı ülkeler lokomotif ve vagona etki eden dirençleri ayrı ayrı hesaplamakta, bazı ülkeler ise tren direnci üzerinden tek bir formülle hesaplamaktadır. Amerika, İtalya ve Almanya lokomotif ve vagona etki eden dirençleri tek formül üzerinde hesaplarken, Fransa ayrı ayrı hesaplamaktadır. Almanya aynı zamanda vagonlar için ayrı direnç formülleri de oluşturmuşlardır.

3.2.2.1. Fransız demiryollarında vagon direnci

Fransız demiryolları SNCF aynı tip vagonlar için aşağıdaki formülü kullanmaktadır;

$$r_v = 1,5 + \frac{v^2}{4200} \quad (3.13)$$

Bu formülde;

- V=Aracın sürekli sağlayabileceği minimum hız(km/s)
- r_v =Vagonun birim seyir direnci (daN/ton) olarak ifade edilir.

3.2.2.2. Alman demiryollarında vagon direnci

Alman demiryolları DB aynı tip vagonlar için aşağıdaki formülü kullanmaktadır;

$$r_v = 1,5 + \frac{v^2}{1200} \quad (3.14)$$

Farklı tip vagonlar için Strahl formülü kullanılmaktadır;

$$r_v = 2 + 0,057 \times \frac{v^2}{100} \quad (3.15)$$

Bu formülde;

- V=Aracın sürekli sağlayabileceği minimum hız(km/s)
- r_v =Vagonun birim seyir direnci (daN) olarak ifade edilir.

Tablo 3.2. Ülkelerin vagon direnç formülleri.

Ülkeler	Vagon Direnci(daN)
Alman	$r_v=2+0,057 \times \frac{V^2}{100}$
Fransız	$r_v=1,5+\frac{V^2}{4200}$

3.3. Kurp direnci

Kurp, farklı doğrultudaki yolları birleştiren yolun virajlı kısımlarıdır. Bu viraj da bir dairenin yayı olup, belli bir yarıçapı vardır. Kurp direnci, bir kurp üzerinde hareket eden bir trenin aşması gereken ek dirençtir. Coğrafik ve geometrik koşulları nedeniyle demiryolu hatlarında yapılan kurplar trenin hareketini olumsuz yönde etkiler. Bu olumsuzlukları azaltmak ve trenin hareketi esnasında V hızına bağlı olarak meydana gelen merkezkaç kuvvetini dengelemek için yolun dış kısmında kalan rayına dever verilmektedir. Türkiye’de maksimum 130 mm’ye kadar raya dever verilmektedir (Urlu, 1999:14).

Trenlerin konforlu bir şekilde seyir etmesi için hızlar verilen dever ölçüsüne göre hesaplanmaktadır. Trenlerin verilen devere göre hesaplanan hızlarda seyir etmemesi durumlarında, tekerlekler raya yaslanır ve normalde olması gerekenden daha büyük bir direnç meydana gelir. Dever ölçüsüne uygun hızlarda kurptan geçilmediğinde artan dirençler ray ve tekerlekleri arındıran bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır(Urlu, 1999:14).

Kurp direnci aşağıdaki durumlarda oluşur;

- Ön dingilin dış tekerleğinin flanşı, dış rayın iç yüzeyine sürtünerek trenin hareketine karşı direnç oluşturur.
- Dış tekerlek, iç tekerleğe göre daha hızlı dönerek enine kaymaya neden olur ve bu nedenle kayma sürtünmesi artar.
- Kurp üzerinde raylar arasındaki yükseklik farkı düşük ise dış ray üzerinde fazla bir basınç oluştururken, raylar arasında yükseklik farkı fazla olduğu takdirde iç ray üzerindeki basınç artar ve böylece kurp direncini artırılmış olur.
- Ray bakımları düzenli yapılmadığı takdirde, ray seviye farklılığı uygun değerlerde olmadığı ve aşınmış raylarda kurp direncinde artışlar olmaktadır.

Birçok ülkede kullanılan formüllerde kurp dirençleri, kurp yarıçapı ile ters orantılı olarak hesaplanır. Bu nedenle söz konusu ülkeler kurp direncinin hesaplanmasında hızı ve

raylar arasındaki seviye farklılığını (dever) etkisinin az olması nedeniyle ihmal ederler. Birim tona etki eden kurp direnci r_k 'dir. G_V (ton) vagonların toplam ağırlığı, G_L (ton) ise lokomotifin ağırlığıdır. Kurp üzerindeki trenin direnci;

$$R_k = r_k \times (G_V + G_L) \text{ (daN)} \quad (3.16)$$

Kurp üzerinde meydana gelen trenin direncini bulmak için deney ve testler sonucu uluslararası kabul edilen formüller aşağıda incelenmiştir.

3.3.1. Fransız ve İtalyan demiryollarında kurp direnci

Fransız demiryolları SNCF ve İtalyan demiryolları kurp direncini hesaplarırken aynı formülü kullanmaktadırlar. Deney ve testler ile elde edilmiş olan formül aşağıdaki gibidir;

$$r_k = \frac{800}{R} \quad (3.17)$$

Bu formülde;

- R_1 =Kurbun yarıçapı(m)
- r_k =Kurbun birim direnci (daN/ton) olarak ifade edilir.

3.3.2. Amerikan demiryollarında kurp direnci

Amerikan demiryolları yaptığı testler sonucu Avrupa ülkelerine göre kurbun direncinin etkisinin daha düşük olduğunu öngörmüş olup, kullandıkları formül aşağıdaki gibidir;

$$r_k = \frac{446}{R} \quad (3.18)$$

3.3.3. Alman demiryollarında kurp direnci

Almanya, Avusturya, İsviçre, Çek Cumhuriyeti, Slovakya, Macaristan ve Romanya demiryolları kullandıkları formülde diğer Ülkelerden farklı olarak paydada R kurp eğrisi yarıçapı yerine (R-b) farkı olarak kabul edilir. Burada “b” sabit değer kurbun yarıçapına göre değişkenlik gösterir;

$$r_k = \frac{650}{R-55} \quad - \quad R > 300 \text{ m} \quad (3.19)$$

$$r_k = \frac{650}{R-30} \quad - \quad R < 300 \text{ m} \quad (3.20)$$

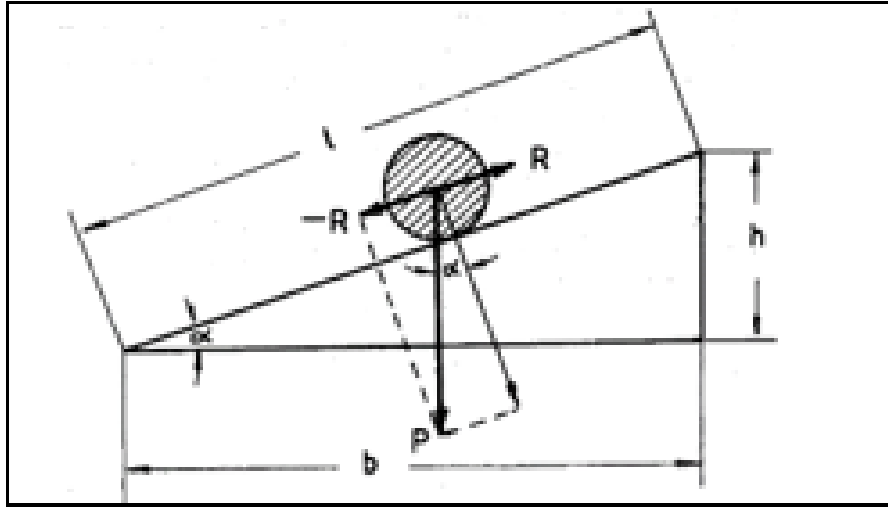
Ancak demiryolu hatlarında kurp yarıçapları genellikle 300m'den daha büyük olduğu için (3.12) nolu formüldeki denklem kullanılabilir.

Tablo 3.3. Ülkelerin kurp direnç formülleri.

Ülkeler	Kurp direnci(daN)
İtalyan	$r_k = \frac{800}{R}$
Alman	$r_k = \frac{650}{R-55}$ - $R > 300$ m $r_k = \frac{650}{R-30}$ - $R < 300$ m
Fransız	$r_k = \frac{800}{R}$
Amerikan	$r_k = \frac{446}{R}$

3.4. Rampa direnci

Demiryollarında hattın eğimi (rampalar), binde olarak gösterilir. Rampa direnci trenin hattın yukarı yönlü eğimini tırmanırken karşılaştığı dirençtir. Hızdan bağımsızdır.



Şekil 3.6. Rampa direnci.

Şekil 3.5.'te P ağırlığındaki tren sistemine göre yer çekimi ivmesi nedeniyle meydana gelen düşey kuvvetin sinüslü bileşeni olan $-R$ tren sisteminin rampa çıkış yönüne ters yönde aşağıya doğru bir çekme kuvveti oluşturur. Bu çekme kuvvetine rampa direnci denir. Rampa direnci R_r olarak gösterilir. Rampa üzerindeki trenin direnci;

$$R_r = r_r \times (G_V + G_L) \text{ (daN)} \quad (3.21)$$

Rampa üzerinde birim tona etki eden tren direnci için Uluslararası alanda aşağıdaki formül çok yaygın olarak kullanılır;

$$r_r = i \quad (3.22)$$

Bu formülde;

- i =Hattın eğimi
- r_r =Rampa birim direnci (daN/ton) olarak ifade edilir.

Rampa direnci hesaplanırken trenin seyir edeceği güzergahtaki en yüksek rampa dikkate alınır. Ülkemizin coğrafik konumunun engebeli arazilerden oluştuğu için demiryolu hatlarımız iniş ve çıkış eğimleri çok olan yerlerden geçmektedir. Bu nedenle trenin seyri yönündeki rampalar farklı boyutlarda ve büyüklüklerde olmaktadır. Trenin rampa direncinin hesaplanabilmesi için trenin çalışacağı hatta öncelikle itibari rampa (ortalama eğim) hesabı yapılmalıdır.

Bir hattın itibari eğim hesabı yapılırken, söz konusu hatta çalışan en uzun trenin uzunluğu içinde kalan veriler dikkate alınır. Bu verilerin ortalaması alınarak itibari eğim hesaplanır.

3.5. Eşdeğer direnç

Demiryolları literatüründe rampa ve kurp dirençleri hızdan bağımsız direnç oldukları için ayrı ayrı belirtilmesi yerine söz konusu dirençler toplanarak tek bir direnç olarak tanımlanır. Bu dirence eşdeğer direnç adı verilir. Eşdeğer direnç;

$$r_e = r_r + r_k \quad (3.23)$$

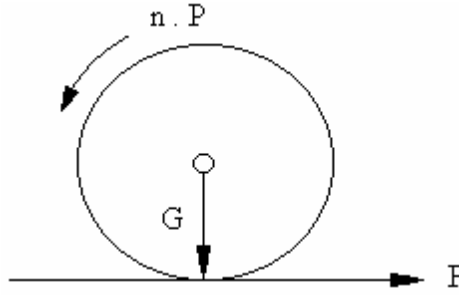
Bu formülde;

- r_e =Eşdeğer direnç (daN/ton) olarak ifade edilir.

4. ADERANS

Karayolu taşıtları ve uçaklar gibi diğer bazı ulaşım araçlarının aksine, demiryolu araçları, traversler ve balastlar veya levhalar aracılığıyla zemine sabitlenmiş raylar üzerinde çalışır. Tipik bir demiryolu tekerleği, tekerleğin genellikle rayla temas ettiği bir tekerlek sırtına ve yanal yönlendirmeyi iyileştirmek için bir flanşa sahiptir. Tekerlek profilleri, sürüş performansını kolaylaştırmak için konik şeklindedir. Raylar, konik tekerlek profiline uyması ve traverslere ve balastlara daha iyi yük aktarımı için içeri doğru eğimle monte edilir. Aderans ray ile tekerlek ara yüzüne etki eden bir yapışma kuvvettir. Lokomotifin raylar üzerindeki hareketinde tekerleklerin patinaja girmeden ilerlemesini sağlayan kuvvet olarak tanımlanabilir.

Demiryolu teknolojisinin hızlı gelişimi ile bağlantılı olarak yirminci yüzyılın başında, aynı zamanda tekerlek-ray yapışmasının fiziksel yasalarını yansıtan çeşitli bilimsel teoriler ortaya çıkmıştır. O. Reynolds tarafından psödosliding teorisi veya sünme teorisi, yapışma kuvveti hesaplama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Reynolds teorisi, raya göre tekerlek kayma miktarının teorik olarak belirlenmesi için teknik geliştirirken, F. Carter tarafından uygulanmıştır.



Şekil 4.1. Tekerlek ile ray arasındaki yapışma.

Şekil 4.1.'de F kuvvetinin meydana gelebilmesi için, bu kuvvetle ray arasında yapışmanın (aderans) olması gerekmektedir.

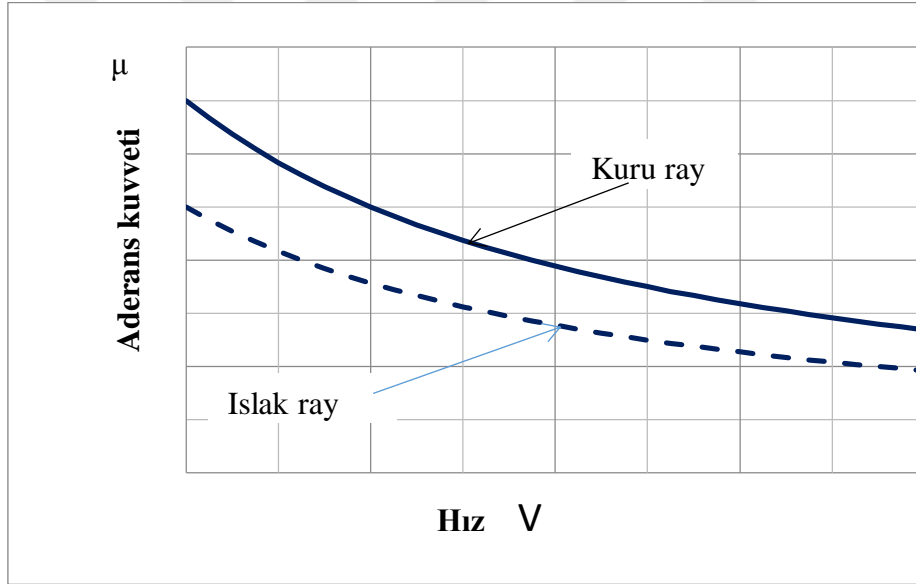
$$\mu = \frac{F}{G} \quad (4.1)$$

Bu formülde;

- μ =Ray ile tekerlek arasındaki yapışma kuvveti (daN/ton)
- F=Tekerlek kuvveti (daN)
- G=Ağırlık(ton)

(4.1) nolu formülden tekerlek kuvvetinin aderansa bağımlı olduğu anlaşılır. Tekerlek kuvveti aderans değerinin üstünde uygulandığı takdirde tekerlek kayarak patinaj yapar. Patinaj demiryollarında istenilmeyen bir durumdur. Raya ve tekerleğe etkisi kötü olup, aşınma miktarını artırır.

Aderans hız ile ters orantılıdır. Hız arttıkça aderans değeri düşer, hız azaldıkça aderans değeri artmaktadır. Bu değişime bağlı olarak tekerlek kuvveti de değişmektedir. Aynı zamanda aderans değeri rayların ıslak veya kuru olmasına göre de değişir.



Şekil 4.2. Aderans ile hız arasındaki ilişki.

Aderans bunlar dışında ray üzerinde yağ izlerine, raya düşen yapraklara, ray ve tekerlek aşınmalarına, rayların kaynak yapılan bölgelerine bağlıdır.

Trenin ray üzerinde hareketi esnasında akslar üzerindeki ağırlık dağılımı değiştiği zaman azalır. Kurp başlangıç eğrileri, nivelman hataları, bağlantı malzemelerinin uygun bir şekilde bağlanmamış olması örnek olarak gösterilebilir.

Aderans değeri ilgili araştırmacılar tarafından uzun yıllar incelenmiş ve tecrübeleriyle bazı formüller oluşturmuşlardır.

4.1. Alman demiryollarında aderans

1944 yılında bilim adamları Curtius ve Kniffler güçlü bir lokomotif ile yaptıkları testler sonucu aşağıdaki formülü bulmuşlardır.

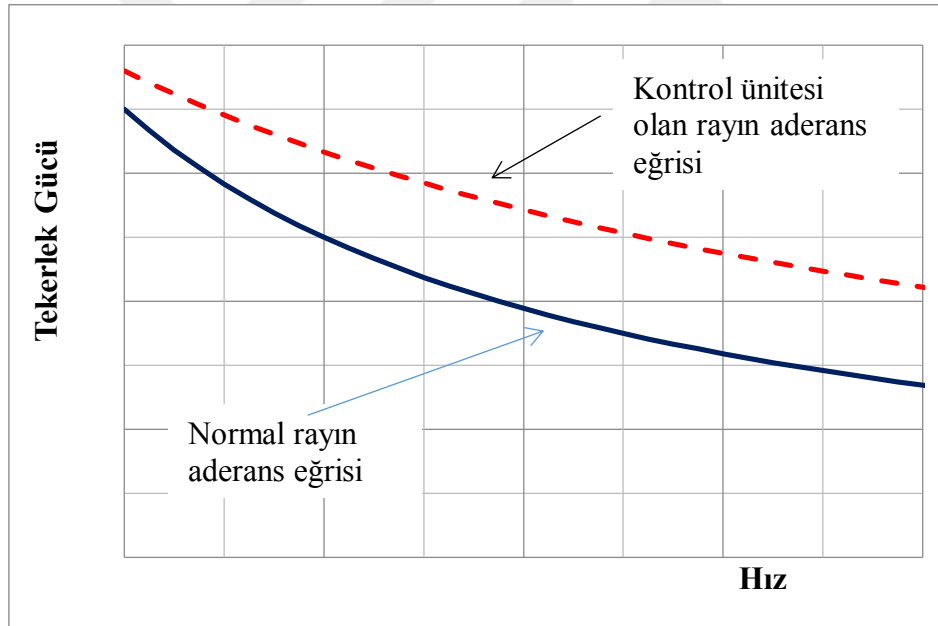
$$\mu=0,161+\frac{7,5}{V+44} \quad (4.2)$$

Bu formülde;

- μ =Ray ile tekerlek arasındaki yapışma değeri
- V =Aracın hızı (km/sa)

4.2. İtalyan demiryollarında aderans

İtalyan demiryolları da rayın üstü ıslak, donmuş, gres yağı veya kum ile kirlenmişse aderans katsayısını azalacağını dikkate almaktadır. Ayrıca İtalyan demiryolları aderansın etkisini artırmak için çoğu hattında raylar için kontrol ünitesini kurmuştur.



Şekil 4.3. Kontrol ünitesi olan rayın aderansa etkisi.

İtalyan demiryolları yaptıkları testler neticesinde aşağıdaki formülü kullanmaktadırlar.

$$\mu=\frac{\mu_0}{1+k \times V} \quad (4.3)$$

Bu formülde;

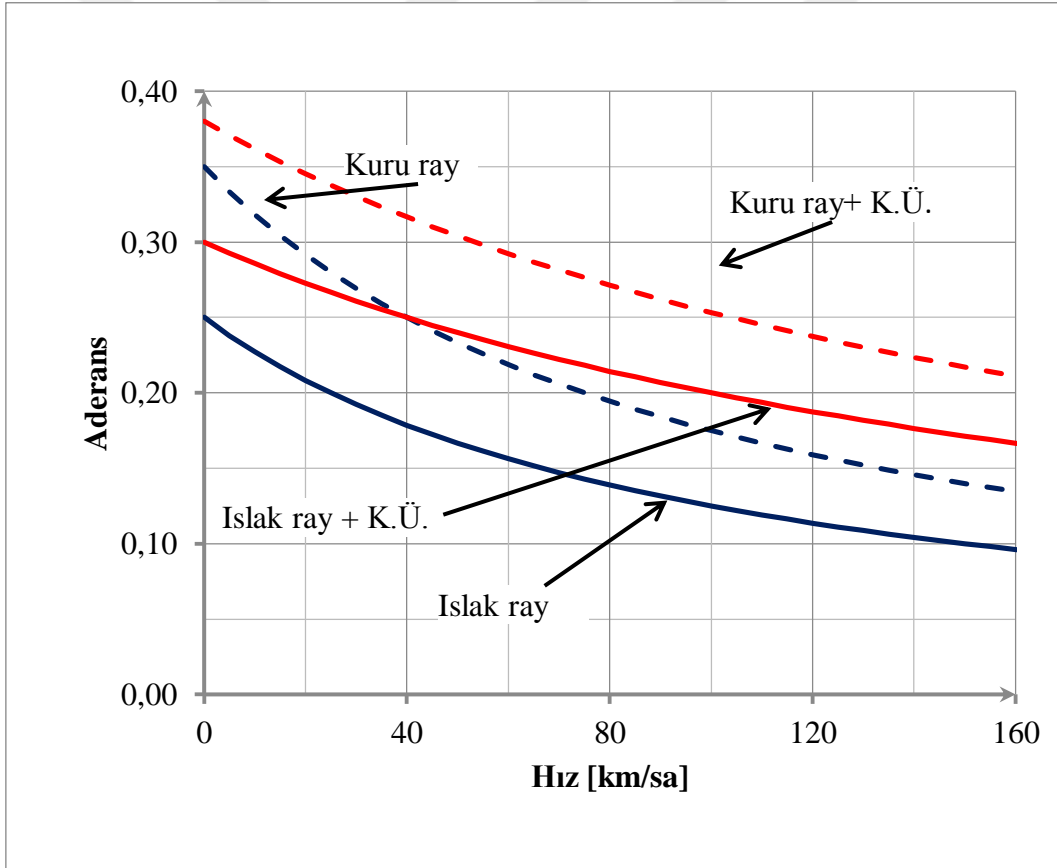
- μ_0 = $v=0$ km/sa değeri için; aderans katsayısı
- V =Aracın hızı (km/sa)

- k =sabit değer

Tablo 4.1. İtalyan demiryollarında aderansın hesaplanması.

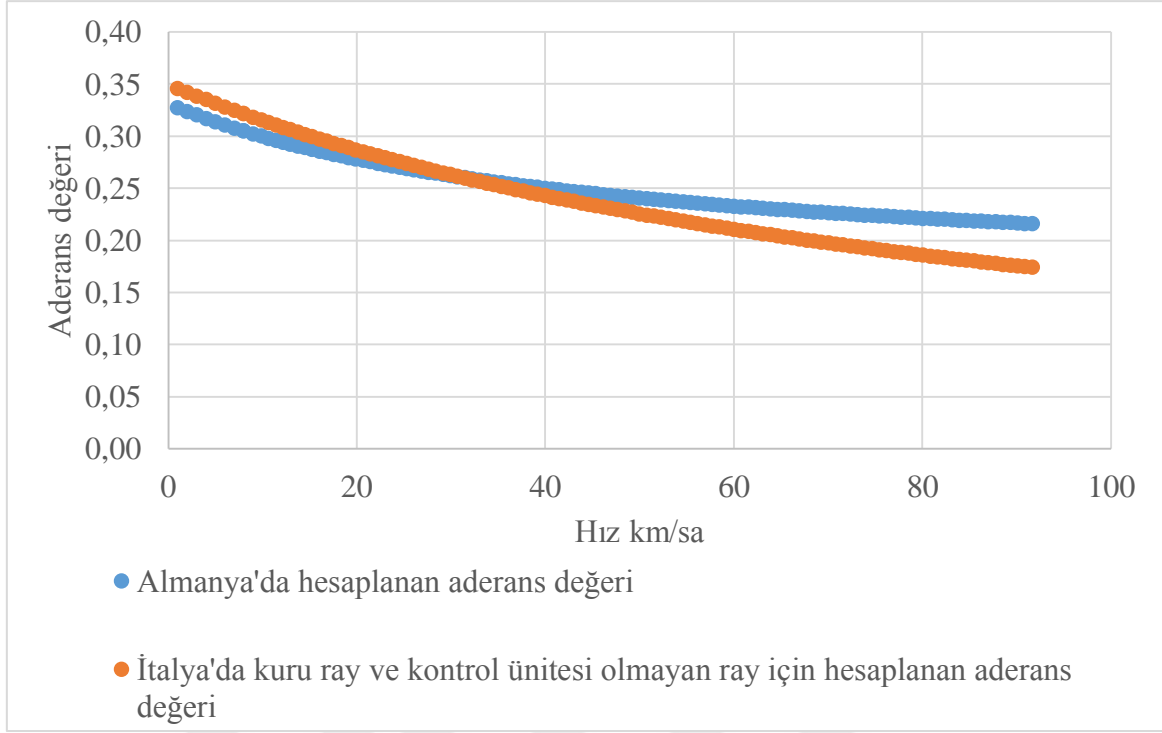
Katsayılar	Ray durumu	Kontrol ünitesi olmayan	Kontrol ünitesi olan
μ_0	Islak ray	0,25	0,30
	Kuru ray	0,35	0,38
k	Islak veya kuru ray	0,011	0,005

İtalyan demiryolları tarafından (4.3) nolu eşitliğe yukarıdaki tablo uygulanmaktadır.



Şekil 4.4. Aderansın rayın durumu ve trenin hızına göre etkisini gösteren grafik.

İtalyan demiryollarında ıslak rayın kuru rayla kıyasla aderans katsayısına etkisi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



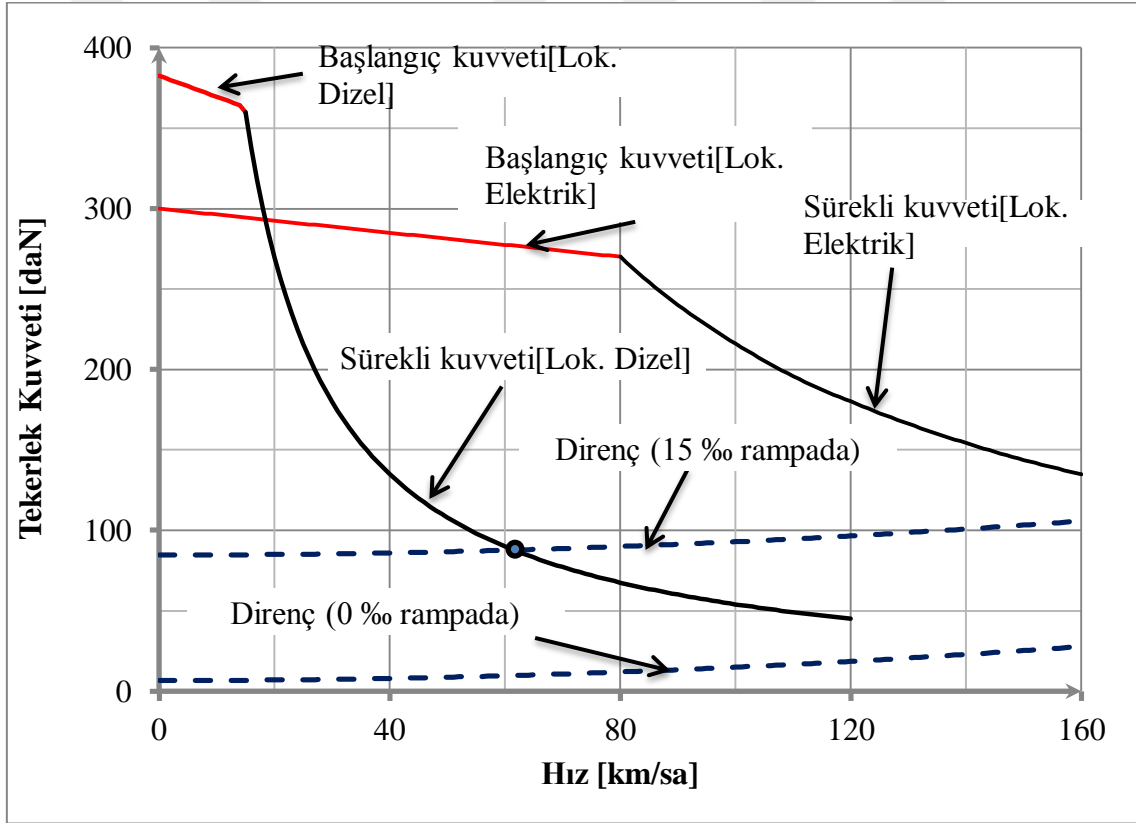
Şekil 4.5. Almanya ve İtalya için hesaplanan aderans değerinin karşılaştırılması.

Almanya'da hesaplanan aderans katsayısının hızın ≤ 30 km/s için daha yüksek olduğu, İtalya'da hesaplanan aderans katsayısının hızın >30 için daha yüksek olduğu Şekil 4.5'de görülmektedir.

5. ÇEKİLECEK YÜK HESABI

Trenin çekeceği yük, lokomotifine bağlı olan vagonların toplam ağırlığıdır. Trenin çekebileceği yük aşağıda belirtilen hususlara bağlıdır;

- Trenin hızına,
 - Eşdeğer direncine (Rampa ve kurp direncine),
 - Lokomotif ve vagonların seyir direncine,
 - Koşum takımlarının mukavemetinden gelen sınırlamalara,
 - Aderans değerinden dolayı gelen sınırlamalara,
 - Lokomotifin gücüne,
- Bağlı olmaktadır.



Şekil 5.1. Elektrikli ve dizel lokomotiflerde tekerlek kuvvetinin belirli rampalarda hızla olan durumunu gösteren grafik.

Trenlerin istenilen yükü çekebilmesi için yukarıda bahsedilen dirençlerin üstüne çıkması gerekmektedir. Bu dirençlerin toplamı;

$$F_{SÜR} = R_L + R_v + R_r + R_k \quad (5.1)$$

olarak ifade edilir.

Lokomotifin çekebileceği yük hesaplanırken tekerlek kuvvetinin sürekli olmaya başladığı nominal kuvvet seçilir. Lokomotif bu kuvveti zaman sınırı olmadan sürekli olarak uygulayabilir. Daha önceden de belirttiğimiz üzere lokomotifin başlangıç içerisindeki kuvvet için lokomotif o gücü ancak zamanla sınırlı olarak verebilir.

Demiryolları literatürlerinde hattan gelen rampa ve kurp dirençlerinin toplamı eşdeğer direnç (R_e) olarak ifade edilir. (5.1) numaralı formülden çekilebilecek yük hesabı için;

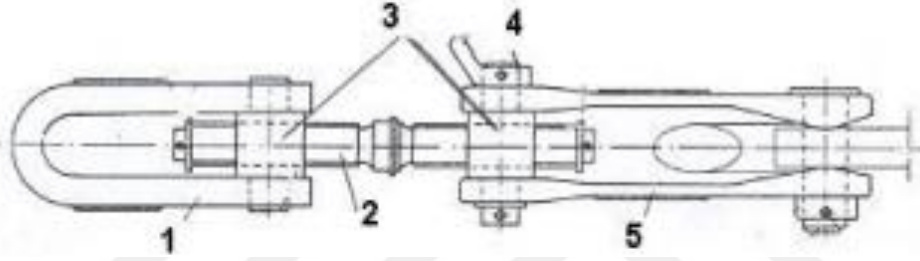
$$G_V = \frac{F_{SÜR} - R_L - r_e \times G_L}{r_V + r_e} \quad (5.2)$$

denklemini bulunur.

Lokomotifin maksimum çekebileceği yük boylamsal kuvvetin trene olan etkisi nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Uluslararası Demiryolu Birliğinin 421 numaralı fişinde bu hususlar düşünülerek bir lokomotifin çekebileceği tonaj 2500 ton ile sınırlandırılması gerektiği vurgulanmıştır.

6. KOŞUM TAKIMI (KANCA) ÇEKERİ

Koşum takımı, iki demiryolu taşıtını birbirine bağlamak için kullanılan ekipmanın genel adıdır. Koşum takımları tam otomatik, yarı otomatik ve vidalı olmak üzere üç tipte imal edilmişlerdir. Vidalı koşum takımları; koşum bilyeli, koşum vidası, koşum emniyeti, koşum somunu ve koşum üzengisinden meydana gelir. Cer kancalarına takılarak vagon plakalarının birbiri ile bağlanmasını sağlar. Bağlantı yapıldıktan sonra koşum vidası ile koşum takımı sıkılarak tampon birbirine temas ettirilmelidir. Koşum takımı gevşek olursa ani çekmelerde kırılma ve kopmalara sebep olur. Koşum takımı aşırı sıkılırsa özellikle kurplarda, tamponların zorlanmasına ve tampon sustalarının kırılmasına neden olur



Şekil 6.1. Vidalı koşum takımı.

Kaynak: TS EN 15566 2011:14

Şekildeki kısımlar;

- 1.Koşum üzengisi
- 2.Koşum vidası
- 3.Koşum somunları
- 4.Koşum emniyeti
- 5.Koşum bilyeli

olarak adlandırılır.

Tablo 6.1. Koşum takımlarının minimum kırılma kuvvetine göre sınıflandırılması.

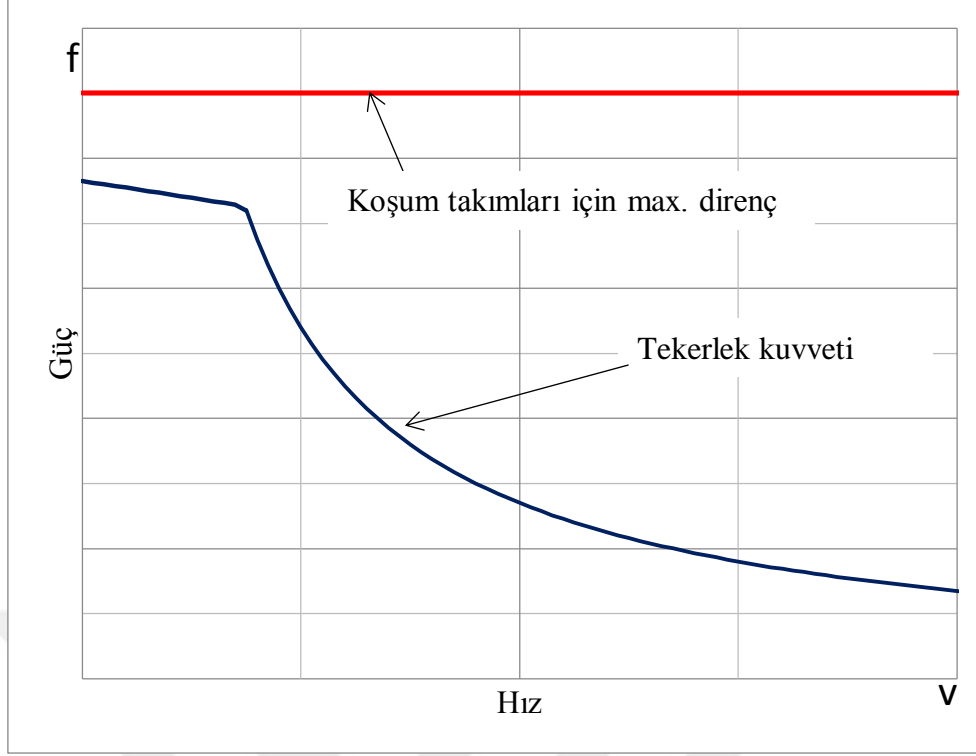
Koşum takımı adı	Koşum takımlarının minimum kırılma kuvveti (MN)	Kancanın minimum kırılma kuvveti (MN)	Çekme mukavemeti (MN)
1 MN	0,85	1	1
1,2 MN	1,02	1,2	1,2
1,5 MN	1,35	1,5	1,5

Kaynak: TS EN 15566 2011:9

TS EN 15566 Standardına göre koşum takımlarının sınıflandırılması Tablo 6.1.'de görülmektedir. Türkiye'de demiryolları literatüründe 1 meganewton çekme mukavemeti sahip koşum takımına 100 tonluk koşum takımı, 1,5 meganewton çekme mukavemeti sahip koşum takımına 150 tonluk koşum takımı denmektedir. Ayrıca Tablo 6.1.'de gösterilen koşum takımlarının minimum kırılma kuvvetine 3 dakika boyunca dayanabilecek şekilde üretimleri yapılmaktadır.

Otomatik ve yarı otomatik koşum takımları hem cer kancası hem de tampon görevini üstlenirler. Günümüzde tam otomatik koşum takımları 350 ton çekme mukavemetine, yarı otomatik koşum takımları 150 ton çekme mukavemetine, vidalı tip dediğimiz normal kancalı koşum takımları 100 ton çekme mukavemetine sahip olacak şekilde imal edilmektedir. Türkiye'de genel olarak 100 tonluk koşum takımları kullanılmaktadır. 100 tonluk koşum takımlarının kanca tarafından kopma sınırı 100 ton, gövde kısmından kopma sınırı 85 ton olarak kabul edilmektedir.

Bir lokomotifin üretebileceği çekiş gücü, koşum takımları vasıtasıyla trenin geri kalanına aktarılmalıdır. Çekiş gücü, çeki demiri/vida kuplörünün direncinden daha düşük kalmalıdır. Koşum takımı direnci sabit bir değerdir. Koşum takımı mukavemeti, rampa çıkışlarında tekerlek kuvveti istenilen kuvveti sağlamış olsa bile lokomotifin çekebileceği yük miktarını sınırlayan bir etkidir. Rampa inişlerinde koşum takımı mukavemeti dikkate alınmaz.



Şekil 6.2. Koşum takımı direnci ile tekerlek kuvveti arasındaki diyagram.

Düz bir hatta koşum takımına vagon seyir dirençleri, kurplu hatta vagon seyir direnci ve kurp direnci, aynı zamanda rampa çıkışı olan bir hatta ise belirtilen dirençlere ilaveten rampa direnci eklenir.

Türkiye’de en çok kullanılan koşum takımı tipi 100 tonluktur. 100 tonluk koşum takımının özellikleri;

- Kopma mukavemeti 85000 daN olması,
- Pnömatik ve elektrik bağlantısının olmaması,
- Manuel olarak takılıp sökülmesi,
- Kırılma durumunda ikinci bir bağlantı elemanının olması,
- Maliyetinin düşük olması,

Koşum takımlarının çekebileceği tren yükü Türkiye’de;

$$G_V = \frac{Z}{5+r_e} \quad (6.1)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

100 ton çekme mukavemetine karşılık Z değeri30000

150 ton çekme mukavemetine karşılık Z değeri.....45000

350 ton çekme mukavemetine karşılık. Z değeri.....105000

Kopma sınırı 85000 daN olan 100 tonluk koşum takımında;

$$85000/30000=2,83 \quad (6.2)$$

Kanca çekeri emniyet katsayısı alınarak hesaplanmıştır. İtalya’da bu koşum takımı için alınan emniyet katsayısı 1,89’dur.

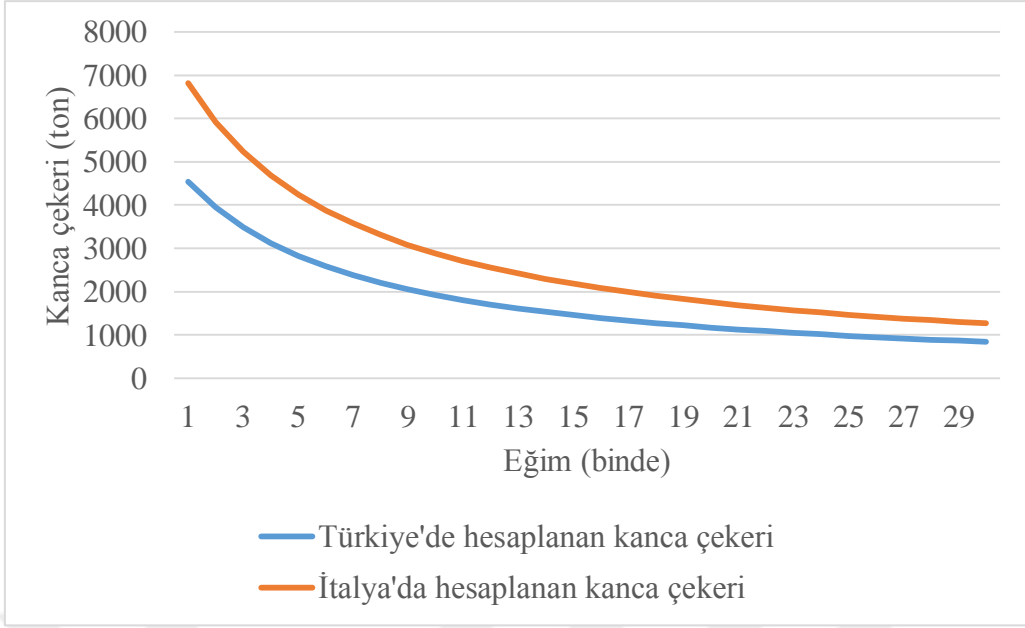
Tablo 6.2.’de Türkiye ve İtalya’da hesaplanan kanca çekeri değerleri görülmektedir.



Tablo 6.2. İtalyan ve Türkiye’de hesaplanan kanca çekeri.

Eğim (Binde)	Türkiye’de hesaplanan kanca çekeri (ton)	İtalya’da hesaplanan kanca çekeri (ton)
1	4545	6818
2	3947	5921
3	3488	5233
4	3125	4688
5	2830	4245
6	2586	3879
7	2381	3571
8	2206	3309
9	2055	3082
10	1923	2885
11	1807	2711
12	1705	2557
13	1613	2419
14	1531	2296
15	1456	2184
16	1389	2083
17	1327	1991
18	1271	1907
19	1220	1829
20	1172	1758
21	1128	1692
22	1087	1630
23	1049	1573
24	1014	1520
25	980	1471
26	949	1424
27	920	1380
28	893	1339
29	867	1301
30	843	1264

Emniyet katsayısını İtalyan demiryolları daha düşük aldığı için lokomotif çekerleri hesaplamalarında kanca çekerinden gelen sınırlamaların etkisinin az olduğunu görülmektedir.



Şekil 6.3. Türkiye ve İtalya için hesaplanan kanca çekerlerinin karşılaştırılması.

7. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde Fransız, Alman, Amerikan ve İtalyan demiryollarının seyir dirençleri, eşdeğer dirençleri ve lokomotif çekerleri hesaplanmış ve tablolar ile karşılaştırılmıştır. Belirtilen hesaplamalar aşağıda verilen kabul değerleri alınarak yapılmıştır;

- 129 ton lokomotif
- 6 dingil sayısı
- 21,5 ton dingil basıncı
- 25 km/sa sürekli kuvveti uygulayabildiği hız
- 800 ton toplam vagon ağırlığı
- 500 metre hattın ortalama kurp yarıçapı.

Yukarıda kabul edilen lokomotifle ilgili veriler Türkiye’de demiryollarında sıklıkla kullanılan DE 36000 lokomotifine ait özelliklerdir. Hat ve vagon için kabul edilen veriler ise ortalama değerlerdir.

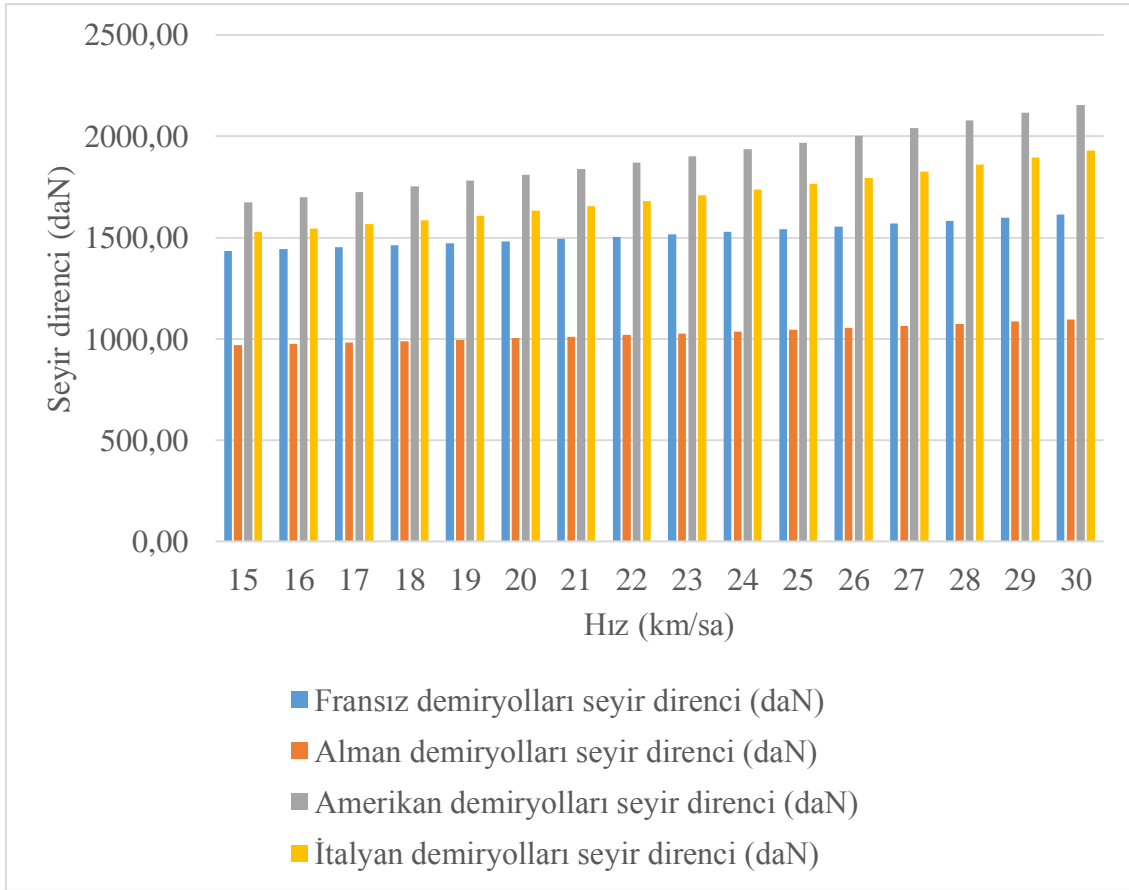
7.1. Hesaplanan seyir dirençleri

Seyir dirençleri hesaplanırken tekerlek kuvveti eğrisinde sürekli gücün sağlanabildiği hız dikkate alınır. Dizel lokomotiflerde bu değer genellikle 15-30 km/sa arasında değişkenlik gösterirken, elektrikli lokomotiflerde bu değer 50-80 km/sa olmaktadır.

129 ton lokomotif ve 800 ton toplam vagon ağırlığı ile 6 dingile ve 21,5 ton dingil basıncına sahip bir dizel lokomotifi olan trenin seyir dirençleri aşağıdaki gibi olmaktadır;

Tablo 7.1. İtalyan, Türkiye, Fransa ve Almanya için hesaplanan seyir dirençleri.

V (km/sa)	Fransız demiryolları seyir direnci (daN)	Alman demiryolları seyir direnci (daN)	Amerikan demiryolları seyir direnci (daN)	İtalyan demiryolları seyir direnci (daN)
15	1434.18	970.81	1674.36	1527.28
16	1442.77	976.56	1699.28	1545.71
17	1451.83	982.70	1725.20	1565.33
18	1461.36	989.20	1752.14	1586.14
19	1471.37	996.07	1780.08	1608.14
20	1481.84	1003.32	1809.03	1631.32
21	1492.79	1010.94	1838.99	1655.70
22	1504.20	1018.93	1869.95	1681.27
23	1516.09	1027.29	1901.93	1708.02
24	1528.44	1036.02	1934.91	1735.97
25	1541.27	1045.13	1968.90	1765.10
26	1554.57	1054.60	2003.90	1795.42
27	1568.34	1064.45	2039.91	1826.93
28	1582.58	1074.67	2076.93	1859.64
29	1597.30	1085.26	2114.95	1893.52
30	1612.48	1096.22	2153.98	1928.60



Şekil 7.1. Seyir dirençlerinin karşılaştırılması.

Alman demiryolları tarafından hesaplanan seyir dirençlerinin diğer ülkelere oranla daha az etkilediği Şekil 7.1’de görülmektedir. Ülkelerin test ve deneyler sonucu elde etmiş olduğu hesaplamalarda İtalyan ve Amerikan demiryollarının hızın artması ile direncin oldukça arttığı gözlemlenmekte, Almanya ve Fransa’da bu oran çok değişmemektedir. Bu durumda İtalyan ve Amerikan demiryollarında kullanılan seyir direnç formüllerinin kullandığı ampirik katsayılarından C teriminin daha baskın olduğu anlaşılmaktadır.

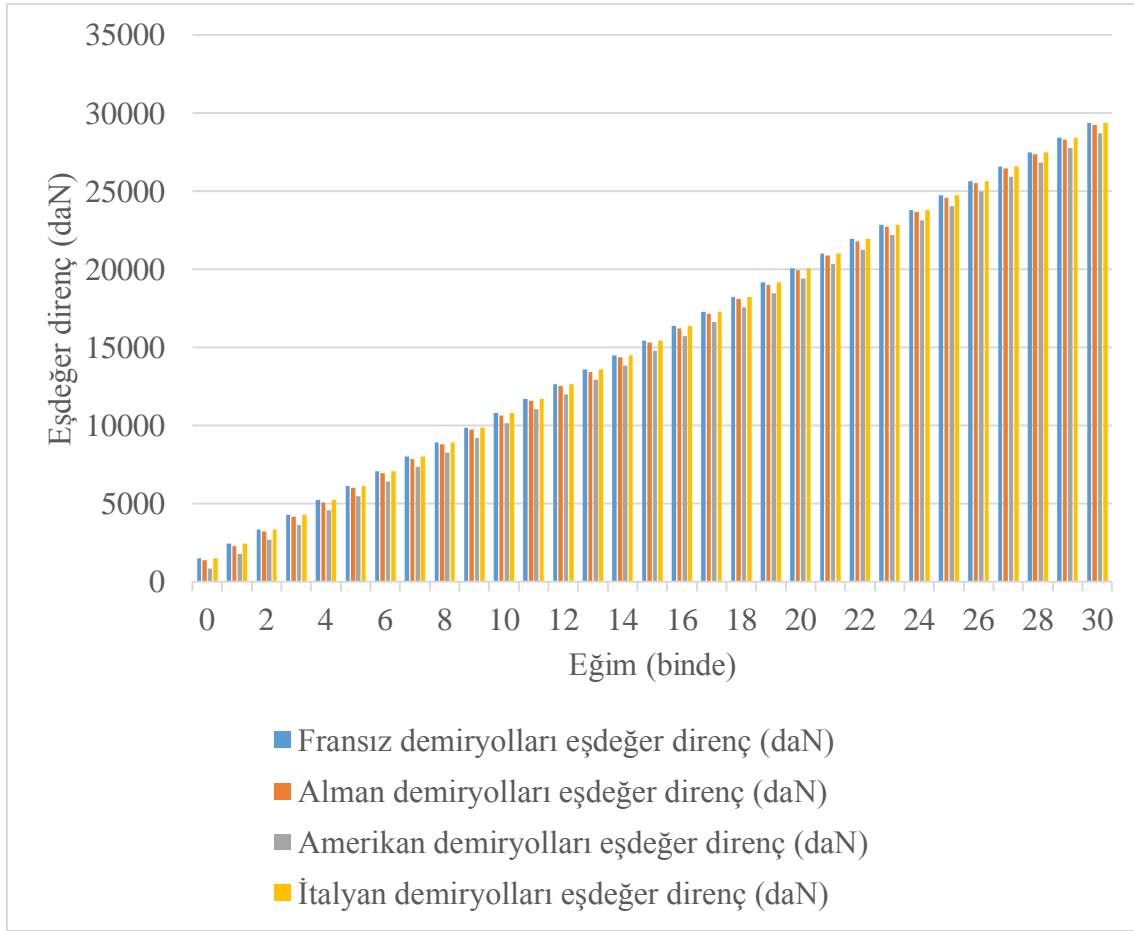
7.2. Hesaplanan eşdeğer dirençler

Türkiye’nin coğrafik konumu nedeniyle demiryolu hatları iniş ve çıkışları çok olan eğimli arazilerden geçmektedir. Bu rampalar binde 30’a kadar çıkmaktadır. Rampa değerlerinin artması trenin karşılaşacağı eşdeğer direnci de artırmaktadır.

129 ton dizel lokomotif ve 800 ton toplam vagon ağırlığına sahip bir tren ile 500 metre ortalama kurp yarıçapına sahip olan bir hattın eşdeğer dirençleri Tablo 7.2’de gösterilmektedir;

Tablo 7.2. İtalyan, Türkiye, Fransa ve Almanya için hesaplanan eşdeğer dirençleri.

Rampa (binde değeri)	Fransız demiryolları eşdeğer direnç (daN)	Alman demiryolları eşdeğer direnç (daN)	Amerikan demiryolları eşdeğer direnç (daN)	İtalyan demiryolları eşdeğer direnç (daN)
0	1486	1357	829	1486
1	2415	2286	1758	2415
2	3344	3215	2687	3344
3	4273	4144	3616	4273
4	5202	5073	4545	5202
5	6131	6002	5474	6131
6	7060	6931	6403	7060
7	7989	7860	7332	7989
8	8918	8789	8261	8918
9	9847	9718	9190	9847
10	10776	10647	10119	10776
11	11705	11576	11048	11705
12	12634	12505	11977	12634
13	13563	13434	12906	13563
14	14492	14363	13835	14492
15	15421	15292	14764	15421
16	16350	16221	15693	16350
17	17279	17150	16622	17279
18	18208	18079	17551	18208
19	19137	19008	18480	19137
20	20066	19937	19409	20066
21	20995	20866	20338	20995
22	21924	21795	21267	21924
23	22853	22724	22196	22853
24	23782	23653	23125	23782
25	24711	24582	24054	24711
26	25640	25511	24983	25640
27	26569	26440	25912	26569
28	27498	27369	26841	27498
29	28427	28298	27770	28427
30	29356	29227	28699	29356



Şekil 7.2. Eşdeğer dirençlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.2’de hesaplanan eşdeğer dirençlerde ülkeler arasında pek fark olmadığı gözlenmektedir. Amerikan demiryolları tarafından hesaplanan eşdeğer dirençler diğer ülkelere oranla lokomotif çekerine daha az etki etmektedir. Rampa dirençleri için kullanılan formül ülkeler için aynı olduğundan bu farklılık kurp direncinin hesaplanma yönteminden kaynaklanmaktadır.

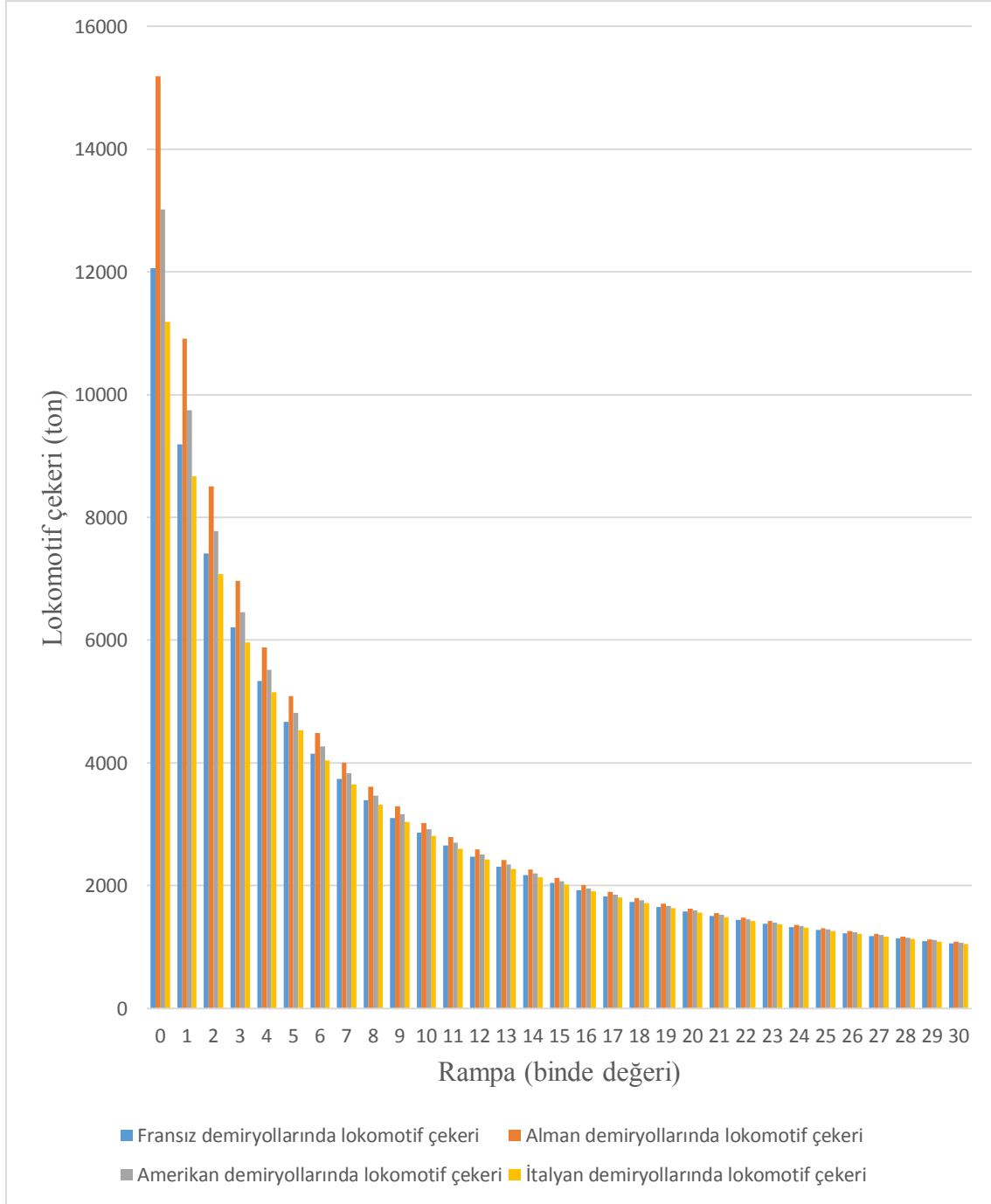
7.3. Hesaplanan lokomotif çekerleri

Lokomotif çekerini bulmak için hesaplanan dirençler arasında lokomotide etki eden en büyük direnç rampa direncidir. Bu sebepten dolayı hattın binde olarak her eğiminde lokomotifin ne kadar yük çekebileceğinin hesaplanması gerekmektedir.

Ağırlığı 129 ton ve sürekli kuvveti uygulayabildiği ilk hızı 25 km/sa olan bir dizel lokomotifin ortalama kurp yarıçapı 500 metre olan bir hatta çekebildiği yük Tablo 7.3’de gösterilmektedir.

Tablo 7.3. İtalyan, Türkiye, Fransa ve Almanya için hesaplanan lokomotif çekerleri.

Rampa (binde değeri)	Fransız demiryollarında lokomotif çekeri	Alman demiryollarında lokomotif çekeri	Amerikan demiryollarında lokomotif çekeri	İtalyan demiryollarında lokomotif çekeri
0	12057	15186	13021	11185
1	9189	10915	9743	8671
2	7413	8507	7773	7071
3	6206	6961	6459	5963
4	5332	5884	5519	5151
5	4670	5091	4814	4530
6	4151	4483	4265	4039
7	3734	4002	3826	3642
8	3390	3612	3467	3314
9	3103	3289	3168	3039
10	2859	3017	2914	2804
11	2649	2786	2697	2602
12	2467	2586	2509	2426
13	2307	2412	2344	2271
14	2166	2259	2199	2134
15	2040	2123	2070	2012
16	1928	2002	1954	1902
17	1826	1893	1850	1803
18	1734	1795	1756	1713
19	1650	1706	1670	1631
20	1574	1624	1592	1556
21	1504	1550	1520	1487
22	1439	1482	1454	1424
23	1379	1419	1393	1365
24	1324	1361	1337	1311
25	1272	1307	1285	1260
26	1225	1256	1236	1213
27	1180	1209	1190	1169
28	1138	1166	1148	1128
29	1099	1125	1108	1089
30	1062	1086	1071	1053



Şekil 7.3. Lokomotif çekerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.3'ü incelediğimizde, trenin direnç formüllerinde belirtilen ampirik katsayıları ne kadar büyük olursa, lokomotifin çekebileceği yük miktarının düşeceği gözlemlenmiştir. Şekil 7.3'de hesabı yapılan lokomotif çekerleri için düz olan hatlarda veya hattın aşağı yönlü inişlerinde Alman demiryollarının kullandığı hesaplama yöntemi ile lokomotiflerin daha fazla yük çekebileceği görülmektedir. Lokomotif çekerleri açısından Alman demiryollarını

sırasıyla Amerikan, Fransız ve İtalyan demiryolları izlemektedir. Rampa değeri büyüdükçe ülkeler arasında lokomotiflerin çekebileceği yük farkının kapandığı gözlemlenmektedir.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Dünya ve Türkiye demiryolları ile demiryolu araçlarının (lokomotif ve vagonların) zaman içerisinde gelişimi incelenmiştir. Daha sonra lokomotifin icadı ile birlikte lokomotif çeker hesabının günümüze kadar nasıl değiştiği araştırılmış olup, hangi parametrelerin dikkate alındığı gözlenmiştir. Türkiye demiryolları yük ve yolcu taşımacılığında en çok kullanılan lokomotiflerin teknik özellikleri incelenmiştir.

Tekerlek kuvvetinin hıza bağlı olan değişimi elektrikli lokomotifler için Şekil 3.2’de, dizel lokomotifler için Şekil 3.3’de görülmektedir. Genel olarak elektrikli lokomotiflerin sürekli gücü sağlayabildiği hız 50-80 km/sa arasında değişirken, dizel lokomotiflerde bu değer 15-30 km/sa arasında değişmektedir.

Demiryollarında öncü ülkelerden olan Almanya, İtalya, Fransa ve Amerika’da trenlere etki eden dirençler formüller üzerinden incelenmiştir. Boyutsal kuvvetten gelen dirençlerin İtalya ve Almanya tarafından dikkate alınmadığı tespit edilmiştir.

Dizel bir lokomotif için Şekil 7.1’de yukarıda bahsedilen dört ülkenin seyir direnci karşılaştırılarak hangi direncin trene daha az etki ettiği gözlemlenmeye çalışılmıştır. Almanya’da hesaplanan seyir direncinin daha düşük olduğu görülmektedir. (3.2) nolu eşitlikteki Davis denkleminin katsayılarının Alman demiryolları tarafından daha düşük tutulması sebebiyle seyir direnci trene daha az etki etmektedir. Amerikan ve İtalyan demiryollarında bu parametrelerin daha yüksek olması sebebiyle seyir direnci trene daha çok etki etmektedir. Ayrıca Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’deki değerleri beraber incelediğimizde rampa değeri arttıkça seyir direncinin lokomotif çekerine olan etkisinin çok düşük olduğu tespit edilmektedir.

Şekil 7.2’de aynı ülkelerin hesapladığı eşdeğer dirençler karşılaştırılmış olup, Amerika’da hesaplanan eşdeğer direncin lokomotif çekerine daha az etki ettiği tespit edilmiştir. Eşdeğer direncin kurp direnci ve rampa direncinin toplamı olduğundan bahsedilmişti. Rampa direnci tüm söz konusu ülkelerde aynı formül üzerinden hesaplanmaktadır. Kurp direncinde ise Amerikan demiryollarının kullanmış olduğu (3.18) nolu formüldeki sabit katsayının düşük tutulması sebebiyle kurp direnci trene daha az etki etmektedir. Fransız ve İtalyan demiryollarında bu parametrenin daha yüksek olması sebebiyle kurp direnci trene daha çok etki etmektedir. Tüm dirençler incelendiğinde lokomotif çekerini en çok sınırlandıran direncin özellikle yüksek rampalarda eşdeğer direnç olduğu tespit edilmektedir.

Şekil 7.3'te yukarıda hesaplanan dirençlere karşılık gelebilecek lokomotif çekerleri her Ülkenin kendi yöntemi ile hesaplanarak karşılaştırılmış olup, Alman demiryollarının kullandığı yöntem ve metotlarla lokomotiflerin daha fazla tonaj çektiği tespit edilmiştir. İtalyan demiryolları ise aynı tip lokomotif ve hat için en az tonajı çekebilmektedir. Bir lokomotifin daha fazla tonaj çekebilmesi hat üzerinde daha az tren çalışmasına sebep olmaktadır. Bu durum da hatta daha fazla tren işletilmesine ve hattın daha verimli bir şekilde çalışmasına neden olmaktadır.

Aderans katsayısının İtalya ve Almanya demiryollarında nasıl hesaplandığı, hangi parametrelerin dikkate alındığı gösterilmiş olup, Şekil 4.5'de birbiri ile kıyaslanarak farklar gözlemlenmiştir. İtalya demiryolları kuru ve ıslak raylar için farklı katsayılar kabul ederek farklı değerlerde sonuçlar görülmektedir. Ancak Almanya demiryolları tek tip koşul kabul ederek aderans hesaplamalarını yapmaktadır. Almanya demiryollarının kullanmış olduğu formül sebebiyle trenin ilk hızlanmasında aderans değeri daha yüksek iken, İtalya demiryollarında daha düşük olduğu görülmektedir. İtalya demiryollarının kullanmış olduğu formül sebebiyle ise tren hızı arttıkça aderans değerinin yüksek hızlarda Almanya demiryollarının hesaplamış olduğu aderans değerini geçtiği görülmektedir. Aderans değerinin yüksek olması lokomotifin başlangıçta vereceği gücü sınırlandırmaktadır. Trenin patinaja girmemesi için lokomotifin verebileceği güçten daha düşük güç kullanmasına sebep olmaktadır. Yüksek hızlarda aderans değeri çok düşük olduğundan aderans değerinin lokomotifin verebileceği güce tesiri çok azdır.

Kanca çekerleri hesaplanırken emniyet katsayısının Türkiye ve İtalya için farklı kabul edilmesinin sonuçlara etkisi Tablo 6.12'de görülmektedir. İtalya'nın emniyet katsayısını Türkiye'ye oranla daha düşük kabul etmesi sebebi ile lokomotif çekerlerine kanca çekerlerinden gelen sınırlamaların daha az etki ettiği anlaşılmaktadır.

Devlet demiryolları 2017 yılında özelleştirilerek yük taşımacılığı yapan firmaların demiryolları üzerinde kendi lokomotifi ile yük taşımacılığı yapabilir duruma getirilmiştir. Bu nedenle lokomotif çekerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi çok daha fazla önem taşımaktadır. Bu çalışmada genel olarak Türkiye demiryolları sektöründe demiryollarında öncü olan ülkelerden alınan bu direnç formüllerinin hangisi kullanılırsa, lokomotiflerin hangi eğimde ne kadar çekebileceği ile aderans ve kanca çekerlerinden gelen sınırlamaların lokomotif çekerini ne kadar kısıtlayacağı araştırılmıştır.

Farklı lokomotifler ve demiryollarında gelişmiş başka ülkelerin hesaplamaları ile trene seyri esnasında etki eden boylamsal kuvvetler araştırılıp, bir lokomotifin çekebileceği maksimum tonaj hesaplamaları bu konulara dahil edilerek benzer çalışmaların devam ettirilmesi önerilebilir.



KAYNAKÇA

- Akbayır, Ö., & Çakır, F. H.** (2017). Enerji verimliliği için tren direnci formüllerinin karşılaştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(Özel (Special) 1), 112-126.
- Armstrong, D. S. & Swift P. H.** (1990). "Lower energy technology. Part A, identification of energy use in multiple units. Report MR VS 077, British Rail Research, Derby.
- Beni, H. E.** (2021). Lokomotif Çekerleri Hesaplama Yöntemi. *Demiryolu Mühendisliği*, (13), 122-133.
- Borodin A.** (1893) *Sluzhby podvizhnogo sostava Yugo-Zapadnykh zheleznykh dorog v period desyatiletia 1880 - 1889 gg* [The Rolling Stock Services of the Southern-Western Railways of the Decade 1880 - 1889]. Kiev.
- Boschetti, G., & Mariscotti, A.** (2012, September). The parameters of motion mechanical equations as a source of uncertainty for traction systems simulation. In *XX IMEKO World Congress*.
- Davis W. J.** (1904) Train resistance. *The Street Railway Journal*. Vol. 24. No. 23, p.p. 1000-1003.
- Davis, W. J.** (1926). *The tractive resistance of electric locomotives and cars*. General Electric.
- Dobronravov A. G.** (1858) *Obshchaya teoriya parovykh mashin i teoriya parovozov* [General Theory of Steam Engines and Theory of Steam Locomotives]. Sankt-Peterburg.
- Huang, J., Xiao, J., & Weiss, H.** (2008, April). Simulation study on adhesion control of electric locomotives based on multidisciplinary virtual prototyping. In *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 1-4). IEEE.
- Kılıç, O., & Beni, H. E.** (2018). Demiryollarında kapasite geliştirme. *Demiryolu Mühendisliği*, (8), 25-39.
- Lehmann, H.** (2006). *Fahrdynamik der Zugfahrt: Theorie und Anwendung*. Shaker.
- Lopushinskyi V.** (1880) *Soprotivlenie parovoza i vagona dvizheniyu i deystviyu parovoy mashiny parovoza* [Resistance of Steam Engines and Wagons to the Movement and the Influence of the Engines]. Sankt-Peterburg.
- Lukaszewicz, P.** (2001). *Energy consumption and running time for trains* (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis). Railway Technology, Department of Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm).

- Megep Yayınları.** 2014. *Tren Dinamiği ve Tekerlek Kuvvetleri.* Ankara. [Erişim: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Trenlerin%20Dinami%C4%9Fi%20Ve%20Tekerlek%20Kuvvetleri.pdf]
- Megep Yayınları.** 2013. *Raylı Sistemler Teknolojisi.* Ankara. [Erişim: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Mekanik%20Sistemler.pdf]
- Megep Yayınları.** 2011. *Raylı Sistem Araçları.* Ankara. [Erişim: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Rayl%C4%B1%20Sistem%20Ara%C3%A7lar%C4%B1.pdf]
- Radosavljevic, A.** (2006). Measurement of train traction characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(3), 283-291.
- Radosavljevic, A., Milutinovic, D., Jovanovic, R., & Lucanin, V.** (2003). Experimental determination of mixed freight train running resistance and influence on energy consumption. In *6th World Congress on Railway Research WCRR* (pp. 40-47).
- Rail Resistance Equations.** CEE 3604, Rail Transportation: Addendum. (n.d.). Transportation Engineering (A.A. Trani), VirginiaTech.
- Rochard, B. P., & Schmid, F.** (2000). A review of methods to measure and calculate train resistances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 214(4), 185-199.
- Sapronova, S. Y., Tkachenko, V. P., Fomin, O. V., Kulbovskiy, I. I., & Zub, E. P.** (2017). Real Vehicles: The Resistance to the Movement and Controllability. *Dnipro: Ukrmetallurginform STA, Akcent PP*, 160.
- Schmidt, E. C.** (1927). *Freight train curve resistance on a one-degree curve and on a three-degree curve.* University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- Schmidt, E. C.** (1910). *Freight train resistance: its relation to car weight* (No. 43). The University.
- Schmidt, E. C., & Marquis, F. W.** (1912). *The effects of cold weather upon train resistance and tonnage rating.* University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- Stallkamp, J. A.** (1977). *Parametric studies of north east corridor rail passenger service between New York City and Washington, D. C* (No. NASA-CR-155553).
- Strahl, G.** (1913). Verfahren zur bestimmung der belastungsgrenzen der dampflokomotiven. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 57, 521-257.

- Türk Standartlar Enstitüsü.** (2011). Demiryolu Uygulamaları- Demiryolu Vagonları - Cer Tertibatı Ve Vidalı Kavrama. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları.** (2018) Demiryolu Sektör Raporu. [Erişim: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/2018sektorrapor.pdf>].
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları.** (2019) Demiryolu Sektör Raporu. [Erişim: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/2019sektorrapor.pdf>].
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları.** (2019) Faaliyet Raporu. [Erişim: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/2019faaliyetraporu.pdf>].
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları.** (2015-5019) İstatistik Yıllığı. [Erişim: <https://www.tcdd.gov.tr/files/istatistik//20152019yillik.pdf>].
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları** (2019). 2019-2023 Stratejik Plan.
- Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayi (TÜLOMSAŞ)** Lokomotif Bilgileri [Erişim: 06.02.2020, <https://tulomsas.gov.tr/>].
- Urlu, C.** (1999). Demiryolu araçlarının ileri dinamiği. *Ankara: TCDD Yayınları.*
- Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC)** Rules fort he consist and braking of international freight trains: UIC CODE 421.
- Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC)** Technical specification fort he supply of screw couplings for tractive and treiling stock: UIC CODE 826.
- Zhu, Y., Olofsson, U., & Söderberg, A.** (2013). Adhesion modeling in the wheel–rail contact under dry and lubricated conditions using measured 3D surfaces. *Tribology International*, 61, 1-10.