



MAKÜ FEBED
ISSN Online: 1309-2243
<http://dergipark.ulakbim.gov.tr/makufebed>

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayı 1: 112-126 (2017)
The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University Special Issue 1: 112-126 (2017)

Enerji Verimliliği İçin Tren Direnci Formüllerinin Karşılaştırılması^a

Ömür AKBAYIR^{*}, Fatih Hayati ÇAKIR

Anadolu Üniversitesi Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Eskişehir

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author)*: omurakbayir@anadolu.edu.tr

ÖZ

Trenler bölgeler arasında ulaşımı sağlarken farklı koşullar ile karşılaşılırlar. Seyir, rampa, kurp ve hızlanma durumları belirli ölçülerde dirençlere yol açar. Hareketin devamlılığının sağlanması meydana gelen dirençlerin üstesinden gelmeye bağlıdır. Bu dirençlerin üstesinden gelebilmek için uygun şekilde uygulanabilecek kuvvetlere gereksinim vardır. Kuvvetin temini enerji tüketilerek meydana getirilir. Ortaya çıkan dirençlerin doğru hesaplanması ve önlemler alınarak enerji tüketimi azaltılabilir. Trenlerde enerji verimliliğine yönelik çalışmalar öncelikle tren direncinin farklı koşullar için doğru olarak hesaplanması ile mümkündür. Bu çalışmada literatürde bulunan, pratikte kullanılan, geçmişten günümüze geliştirilen tren direnci formülleri verilmiştir. Her bir tren direnci formülü ile hesaplama yapılmıştır. Elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Enerji verimliliği ve tren çekişi hesaplamaları için mevcut formüllerden bazılarının kullanımı önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, tren direnci, seyir direnci, kurp direnci, rampa direnci

Comparison of Train Resistance Formulas for Energy Efficiency

ABSTRACT

Trains encounter different conditions while they provide transportation between regions. Running, grade, curve and acceleration situations lead to certain degrees of resistance. Ensuring the continuity of the train movement depend on overcoming the resistances. Force is required to encounter these resistances. Force is generated with energy consumption. Energy consumption can be reduced by correct calculation of resistances and precautions. Studies on energy efficiency of trains are primarily possible with correctly calculation train resistance for different conditions. In this study, train resistance formulas in the literature, used in practice and developed from the past to present are reviewed. Each train resistance formula is evaluated. The values obtained are compared. The use of some of the available formulas for energy efficiency and train draw calculations has been proposed.

Keywords: Energy, train resistance, running resistance, curve resistance, grade resistance

GİRİŞ

Trenin hareket yönünün aksi yönünde çeşitli etkilerden (Şekil 1) dolayı meydana gelen kuvvetler tren direnci olarak adlandırılır. Seyir sırasında trende uygulanan tahrik kuvveti tren direncinde büyükse tren hızlanacak, tahrik kuvveti tren direncine eşitse tren sabit hızda gidecek, tahrik kuvveti tren direncinden küçükse tren yavaşlayacaktır.

Farklı çalışma koşulları için tren direncinin bilinmesi; uygun lokomotif çekerlerinin hesaplanması, lokomotif gücü gereksiniminin belirlenmesi, enerji tüketimi ve seyir süresi simülasyonu için gereklidir.

^a 11 -13 Mayıs 2017 tarihleri arasında Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi tarafından düzenlenen "MESTEK 2017: 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal ve Teknik Bilimler Kongresi" kapsamında sunulmuştur.

Pek çok önde gelen ülkenin demiryollarındaki tren direncini belirlemek için geliştirdikleri formüller vardır.

Tren direncinin sefer öncesi hesaplanmasının yanında son yıllarda, sefer sırasında makinistin verimli ve tasarruflu tren kullanabilmesine yardımcı olmak üzere seyir sırasında aktif olarak bilgilendirme yapan; "Makiniste tavsiye sistemleri" (Driver Advisory System, DAS) geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır (Lagos, 2011). Makiniste tavsiye sistemleri belirli kontrol algoritmaları kullanılarak tren direnci hesaplamaları temel alınarak geliştirilmektedir. Belirlenen orerlerin (hareket çizelgesi) ve livrelerin (tren tarife kitapçığı) yanında makinistin treni kullanma şekli/sürüş tekniği trenlerdeki enerji verimliliğinde büyük etkiye sahiptir.

Türkiye'deki uygulamayı incelediğimizde TCDD tarafından tren direnci hesaplamaları belirli formüller kullanılarak şebekedeki farklı lokomotif tipleri için hamule (yük) çeker değerlerinin farklı güzergâhlar için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar sistemlerdeki teknolojik gelişmeler, literatüreki çalışmalar ayrıca sahadan alınan geri beslemeler ile belirli aralıklarla güncellenmektedir (TCDD, 2009).

Tren direnci sahada deneysel olarak belirlenmektedir. Mekanik yuvarlanma direncini ve aerodinamik direnci belirlemek için geliştirilen birçok yöntem vardır. Bu yöntemler üç ana grup altında incelenmektedir (Lukaszewicz, 2001; Radosavljevic, 2006):

- Cer gücü metodu: Tahrik edilen trenden ölçümler alınmaktadır. Tren direnci cer sistemi tarafından üretilen güç veya tahrik kuvvetlerinin ölçülmesiyle hesaplanmaktadır. Tren sabit hızda seyrederken cer sistemi tarafından cer gücü veya kuvveti ölçülerek tren direnci belirlenir.
- Dinamometre veya cer tertibatı metodu: Dinamometre veya cer tertibatı kullanılarak ihtiyaç duyulan kuvvetler ölçülerek tren direnci hesaplanır. Günümüzde cer tertibatına takılan strain gaugelerle elektronik olarak ölçümler yapılmaktadır ('Dynamometer car', 2017).
- Salı verme metodu: Tren belli bir hıza çıkarılır. Eğimi bilinen bu yolda trenin cer gücü kesilir ve fren yapılmaz. Trenin, hız, yer ve zaman kayıtları yapılır. Salı verilen trenin kinetik enerjisi tren direncinden dolayı belirli bir mesafede sifıra düşecektir. Bu mesafe ölçülerek mevcut tren ve çalışma koşulları için tren direnci belirlenmiş olur.

Literatüre bakıldığında yukarıdaki metotlardan yaygın olarak ikincisinin kullanıldığı görülmüştür. Gerçek işletme şartlarında bir dinamometrik vagon (ölçüm vagonu) ölçülmek istenen trenin (lokomotiften sonra) başına verilmektedir. Bu vagon aynı yolda aynı şartlarda defalarca işletilmektedir. Söz konusu vagon verileri almakta ve depolamaktadır. Alınan ölçüm sonuçları analiz edilerek belirli demiryolu aracı için tren direnci belirlenir.

Tren direnci formülleri yukarıdaki metotlardan biri kullanılarak geliştirilen ampirik fonksiyonlardır. Gerçek şartlarda yapılan birçok test sonucu alınan verilerden, en küçük kareler yöntemi ile regresyon analizi yapılarak bir fonksiyon oluşturulmaktadır.

Trenin hareketini devam ettirebilmesi için tren direncinin bileşenlerini (yuvarlanma direnci, aerodinamik direnç, kurp direnci, rampa direnci ve diğer etkiler.) yenmesi gerekmektedir. Bu dirençleri aşabilmek için belirli miktarda enerji tüketilmektedir. Tren direncinin araç hızı ile çarpılmasıyla enerji tüketim değeri belirlenebilir. Sabit hızda seyahat için gerekli olan enerji miktarı toplam tren direnci ile orantılıdır (Lindgreen ve Spencer, 2005; Pritchard, 2013). Lukaszewicz tarafından İsveç'te yapılan testlerde; 25 ton dingil yüküne sahip 52 adet dolu yük vagonundan ve 3 rejeneratif frensiz lokomotiften oluşan 483m uzunluğunda bir trende yapılan testlerde enerji tüketim değerinin 64-66kWh/km olduğu belirlenmiştir. 1000 hamton.km de yaklaşık 13,9 kWh enerji tüketilmiştir (Lukaszewicz, 2007 ve 2009).

Bu çalışmada yük trenleri için TCDD'nin kullandığı tren direnci formülleri incelenmiş, ayrıca dünyada kullanılan ve son yıllarda geliştirilmiş formüller de incelenmiştir. Tren direnci ile ilgili mevcut anlayış durumu özetlenerek ülkemizdeki tren direnci algısının geliştirilerek enerji verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik temel araştırma bulguları raporlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Literatürdeki tren direnci ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ampirik verilere dayalı tren direnci formülleri ilk olarak Schmidt (1910) tarafından yayınlanmıştır. Benzer formüller Strahl (1913) ve Davis (1926) tarafından geliştirilmiştir. Ampirik çalışmalar sonucunda Tren direnci hıza bağlı ikinci derece bir polinomla ifade edilmekte ve 3 terimden oluşmaktadır. Eşitlik 1 ile gösterilen bu eşitliğe genel olarak Davis eşitliği denilmektedir. Literatürde bu eşitliğe; von Borries Formel, Leitzmann Formel, Barbier eşitliği de denilmektedir:

$$R = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

Eşitlik 1'de; V tren hızıdır ve birimi m/s dir. A, B, C ampirik katsayılarıdır ve birimleri sırasıyla N, Ns/m ve Ns^2/m^2 dir. A, B ve C katsayıları; hıza, dingil yüküne, dingil sayısına, vagon sayısına, tren uzunluğuna, yol tipine, araç tipine göre belirlenmektedir (Rochard ve Schmid, 2000; Lukaszewicz, 2001).

Birinci terim olan A mekanik direnci ifade eder; hızdan bağımsız olup dingil yükü, dingil sayısı, tren uzunluğu, araç tipi, yol tipi ile değişmektedir. A terimi özellikle dingil yükü ve dingi sayısı ile lineer olarak artmaktadır. A terimi dingil kutusu içindeki yataklardaki rulmanların direncini ve tekerlek ray arasındaki temas nedeniyle meydana gelen mekanik direnci, sürtünmeyi ifade eder (Rochard ve Schmid, 2000; Lukaszewicz, 2001).

İkinci terim olan BV, B katsayısı ve hız ile değişmektedir. B katsayısı; tren uzunluğu veya dingil sayısı gibi boyutsal etkiler ile değişmekte olup dingil yükünün etkisini içermemektedir. Dingil yükünün etkisinin bulunmaması, BV teriminde mekanik direncin ifade edilmediği anlamına gelmektedir. BV terimi üçüncü terimle ifade edilen hava direncinin bir bölümünü de içerir. Tren yükünden ziyade uzunluğunun bir fonksiyonudur (Rochard ve Schmid, 2000; Lukaszewicz, 2001).

Üçüncü terim olan CV^2 , C katsayısı ve hızın karesi ile değişmektedir. CV^2 terimi trenin ön ve arka alanına etki eden aerodinamik dirençleri ve trenin uzunluğu ile lineer olarak artan aerodinamik dirençlerin toplamını ifade eder (Lukaszewicz, 2007 ve 2009).

Tren direnci hesaplaması dikkate alındığı zaman düşük hızlarda birinci ve ikinci terimin tren direncinde baskın olduğu görülürken hızın artması ile birlikte aerodinamik etiler ön plana çıkar özellikle yüksek hızlarda (100 km/h ve üzeri) ve üçüncü terim baskın hale gelir (Rochard ve Schmid, 2000; Lukaszewicz, 2001).

Eşitlik 1'den anlaşılacağı üzere; demiryolu sisteminde hızın artması ile tren direnci artmaktadır. Trenlerin sefer hızlarının artması ile birlikte 1900 lü yılların başında Schmidt, Strahl ve Davis tarafından geliştirilen formüller geçerliliğini kaybetmiştir. Sahadan alınan veriler ile kıyaslandığı zaman bu eşitliklerin gerçeğe yakın sonuçlar vermediği görülmüştür. Özellikle hızlı tren ve demiryolu araçlarında meydana gelen gelişimler ile bu formüllerin de değiştirilmesi, güncellenmesi bir gereklilik olmuştur. Bu amaca hizmet etmek için eşitlik 1'i temel alan farklı birçok yeni eşitlik geliştirilmiştir. (Rochard ve Schmid, 2000).

Tren direncine (R_t) etki eden birçok faktör vardır. Tren direnci eşitlik 2'de görüldüğü gibi aşağıdaki dirençlerin toplamıdır. Temel olarak tren direnci beş kategoriye bölünebilir, bunlar:

- Yuvarlanma direnci (R_r): Düz yolda tekerlek ile ray arasındaki ve dingil kutusundaki yataklardaki hareket sırasında meydana gelen enerji kaybını ifade eder. Tekerlek-ray arasındaki ve dingil kutusundaki sürtünme kuvveti mekanik direnç olarak da adlandırılmaktadır. Yuvarlanma direnci dingil yükünün ve araç/tren uzunluğunun artması ile lineer olarak artmaktadır.
- Kurp direnci (R_c): Kurptan geçen trenin yuvarlanma direncinde meydana gelen artıştır. Tekerlekler arasındaki çevresel hızı telafi etmek için yapılan kayma hareketi sonucunda ray-teker ara yüzünde sürtünme meydana gelir. Kurp yarıçapının azalmasıyla hareket zorlaşır ve kurp direnci artar.
- Aerodinamik direnç (R_a): Seyir sırasındaki havayı yarmak için gerekli olan dirençtir.
- Rampa direnci (R_g): Rampanın tırmanışı sırasında yerçekiminin etkisi ile uygulanan direnç.
- Atalet direnci (R_i): Tüm tren sisteminin ataletin üstesinden gelerek hızlanmak için gerekli olan ekstra çer kuvvetini ifade eder.

$$R_t = R_r + R_c + R_a + R_g + R_i \quad (2)$$



Şekil 1. Trene etki eden kuvvetler

Yuvarlanma direnci, kurp direnci, aerodinamik dirençler geri kazanılamayan enerji kayıplarına neden olmaktadır. Rampa direncinin ve atalet direncinin üstesinden gelebilmek için kullanılan enerjinin bir kısmı, rampa inişlerinde rejeneratif fren vasıtasıyla geri kazanılmaktadır.

Seyir Direnci (R_{r+a})

Yuvarlanma direnci ve aerodinamik dirençlerin toplamı genelde tek bir formül altında birleştirilmekte ve R_{r+a} seyir direnci denilmektedir.

Radosavljevic ve arkadaşları tarafından karışık yük vagonları ile Sırbistan, Hırvatistan hatlarında 2000 yılında yapılan gerçek testler sonucu geliştirilen seyir direnci formülü (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006) ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$f_R^{osn} = 0,483 + 0,0183 \cdot v + 0,0001 \cdot v^2 \quad (3)$$

Eşitlik 3'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

Lukaszewicz tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan tam ölçekli testler sonucu geliştirilen seyir direnci formülleri aşağıda verilmiştir (Lukaszewicz, 2007 ve 2009):

Karışık yük vagonları için;

$$R = [n_{ax}(65 + 0,6 \cdot 10^{-3}Q) + (-22 + 0,6 \cdot L_T) \cdot V + (5,1 + 8,1 \cdot 10^{-2} \cdot L_T) \cdot V^2]/m \quad (4)$$

Açık yük vagonları için;

$$R = [n_{ax}(65 + 0,6 \cdot 10^{-3}Q) + (0,3 \cdot L_T) \cdot V + (5,1 + 9,2 \cdot 10^{-2} \cdot L_T) \cdot V^2]/m \quad (5)$$

Kapalı yük vagonları için;

$$R = [n_{ax}(65 + 0,6 \cdot 10^{-3}Q) + (-22 + 0,6 \cdot L_T) \cdot V + (5,1 + 4,9 \cdot 10^{-2} \cdot L_T) \cdot V^2]/m \quad (6)$$

Uad İsveç tipi ORE treni yük vagonları için;

$$R = [n_{ax}(65 + 9,8 \cdot 0,9 \cdot Q) + (0,2 \cdot L_T) \cdot V + (5,4 + 11,4 \cdot 10^{-2} \cdot L_T) \cdot V^2]/m \quad (7)$$

Eşitlik 4-7'de; R seyir direncidir (N/t), v hızdır (m/s), Q dingil yüküdür (ton), n_{ax} dingil sayısıdır, L_T tampondan tampona vagonun uzunluğudur (m), m vagon ağırlığıdır (ton). Test yapılan Uad tipi vagonlar üç parça döküm bojiden oluşmaktadır. Yapılan testlerde Rc4 tipi lokomotif için seyir direnci yaklaşık 2000N olarak bulunmuştur. 100 tonluk bir lokomotif için seyir direnci yaklaşık 2 daN/ton denebilir.

Fransa'nın standart UIC araçları için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Iwnicki, 2006):

$$R_{r+a} = 1,25 + v^2/6300 \quad (8)$$

Eşitlik 8'de; R_{r+a} seyir direncidir (daN/t), V ise (km/h) olarak ifade edilen hızdır.

Fransa'nın ekspres yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Iwnicki, 2006):

$$R_{r+a} = 1,5 + v^2/(2000\sim 2400) \quad (9)$$

Eşitlik 9'da; R_{r+a} seyir direncidir (daN/t), V ise (km/h) olarak ifade edilen hızdır.

Fransa'nın 10 ton dingil yüklü vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Iwnicki, 2006):

$$R_{r+a} = 1,5 + v^2/1600 \quad (10)$$

Eşitlik 10'da; R_{r+a} seyir direncidir (daN/t), V ise (km/h) olarak ifade edilen hızdır.

Fransa Demiryolları'nın (SNCF) 18 ton dingil yüklü dolu yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülü: (Radosavljevic et al., 2003) ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.) (Radosavljevic, 2006; Iwnicki, 2006) :

$$f_R^{osn} = 1,2 + v^2/4000 \quad (11)$$

Eşitlik 11'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

Karışık yük vagonları için DB seyir direnci formülü aşağıda verilmiştir (Steimel, 2008):

$$R_{r+a} = 2,5 + 0,0005 \cdot v^2 \quad (12)$$

Eşitlik 12'de; R_{r+a} seyir direncidir (N/kN), V hızdır (km/h).

SNCF'nin ağır yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü (Radosavljevic, 2006) (Radosavljevic et al., 2003) ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$f_R^{osn} = 1 + v^2/4000 \quad (13)$$

Eşitlik 13'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

İsveç'in aynı tip bojlili kapalı vagonlardan oluşan ağır yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006):

$$f_R^{osn} = [(65 + 0,6 \cdot 10^{-3}Q) \cdot n_{ax} + (-22 + 0,6 \cdot L) \cdot V/3,6 + (5,4 + 5,2 \cdot 10^{-2} \cdot L) \cdot (v/3,6)^2]/(10 \cdot m_v) \quad (14)$$

Eşitlik 14'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

Yük trenleri (eight wheels) için Rusya'da kayıt altına alınan seyir direnci formülü (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006) ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$f_R^{osn} = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot v + 0,0025 \cdot v^2)/q_{st} \quad (15)$$

Eşitlik 15'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h), q_{st} dingil yüküdür (ton).

DB'nin dolu yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006) ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$f_R^{osn} = 1 + 0,1 \cdot 0,2 \cdot (v/10)^2 \quad (16)$$

Eşitlik 16'da; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

Sauthof tarafından geliştirilen Almanya'da kullanılan seyir direnci formülü (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006):

$$f_R^{osn} = 1 + 0,0025 \cdot v + 0,48 \cdot (n_{st} + 2,7) \cdot 1,45 \cdot (v/10)^2/m_v \quad (17)$$

Eşitlik 17'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

Çek Cumhuriyeti'nin dolu yük trenleri (eight wheels) için kullandığı seyir direnci formülü (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006) ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$f_R^{osn} = 1,3 + 0,00015 \cdot v^2 \quad (18)$$

Eşitlik 18'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h).

Sırbistan ve Karadağ'da JZ demiryolları tarafından aşağıdaki değiştirilmiş Strahl formülleri kullanılmaktadır (Radosavljevic ve ark., 2003; Radosavljevic, 2006):

Kaymalı yataklı boş vagonlardan oluşan yük trenleri için;

$$f_R^{osn} = 2 + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,100 \quad (19)$$

Kaymalı yataklı karışık vagonlardan oluşan yük trenleri için;

$$f_R^{osn} = 2 + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,050 \quad (20)$$

Kaymalı yataklı konteyner vagonlarından oluşan yük trenleri için;

$$f_R^{osn} = 2 + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,040 \quad (21)$$

Rulmanlı yatağa sahip boş vagonlardan oluşan yük trenleri için;

$$f_R^{osn} = 2,2 - 80/(v + 38) + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,100 \quad (22)$$

Rulmanlı yatağa sahip karışık vagonlardan oluşan yük trenleri için;

$$f_R^{osn} = 2,2 - 80/(v + 38) + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,050 \quad (23)$$

Rulmanlı yatağa sahip konteyner vagonlarından oluşan yük trenleri için;

$$f_R^{osn} = 2,2 - 80/(v + 38) + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,040 \quad (24)$$

Eşitlik 19-24'de; f_R^{osn} seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h). Kaymalı yataklı karışık vagonlardan oluşan yük trenleri için eşitlik 20 deki değiştirilmiş Strahl formülü TCDD tarafından uzun yıllardır trenlerin hamule çekerlerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Urlu, 1999).

Schmidt tarafından 1908-1909 yıllarında Illinois/ABD'de 64 km/h (40 mph) hıza kadar yapılan bir dizi deney sonucunda 1910 yılında geliştirilen formül (Schmidt, 1910):

$$R = (S + 39,6 - 0,031 \cdot W)/(4,08 + 0,152 \cdot W) \quad (25)$$

Eşitlik 25; R seyir direncidir (pouns/ton), W araç ağırlığıdır (ton), S hızdır (mph). Schmidt (1910) tarafından 1908-1909 yıllarında Illinois/ABD'de 64 km/h (40 mph) hıza kadar yapılan bir dizi deney, 1937 yılında aynı koşullarda Tuthill (1948) tarafından 112 km/h (70 mph) a kadar tekrarlanmıştır. Tuthill (1948) tarafından farklı trenlerde farklı işletme şartlarında beklenmeyen durumlar için hesaplanan tren direncine %8 eklenmesi önerilmiştir (Hay, 1982).

Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği (AREA) tarafından yayınlanmış tren direnci formülleri aşağıdadır. Bu formüller 1940-1950 yıllarında yapılan testler sonucu değiştirilmiş Davis formülleridir ('Rail Resistance Equations, CEE 3604, Rail Transportation: Addendum', n.d.) (AREMA, 1999):

$$R_u = 0,6 + (20/w) + (0,01 \cdot v) + (K \cdot v^2)/(w \cdot n); K = 0,07 \quad (26)$$

$$R_u = 0,6 + (20/w) + (0,01 \cdot v) + (K \cdot v^2)/(w \cdot n); K = 0,0935 \quad (27)$$

$$R_u = 0,6 + (20/w) + (0,01 \cdot v) + (K \cdot v^2)/(w \cdot n); K = 0,16 \quad (28)$$

Eşitlik 26-28'de; R_u seyir direncidir (lb/ton), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır, W toplam araç ağırlığıdır (tons), V hızdır (mph), K sürüklenme katsayısıdır. K 'nın değeri konvansiyonel ekipmanlar için 0.07, konteynerler için 0.0935, platform vagonlar üzerindeki treylerler (piggyback taşınması) için 0.16 dır.

Yük vagonları için Davis eşitliğinin (1926) orijinali (AREMA, 1999; Szanto, 2016):

$$R' = 1,3 + (29/w) + 0,045 \cdot v + (0,0005 \cdot a \cdot v^2)/(w \cdot n) \quad (29)$$

Eşitlik 29'da; R' seyir direncidir (lb/ton), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır, a aracın ön alın yüzünün alanıdır (sq.ft), v hızdır (mph).

Yük vagonları için AAR tarafından yayınlanmış değiştirilmiş Davis eşitliği (Szanto, 2016):

$$R' = 6,5 + (320/w \cdot n) + 0,46 \cdot v + (0,096 \cdot v^2)/(w \cdot n) \quad (30)$$

Eşitlik 30'da; R' seyir direncidir (N/t), v hızdır (km/h), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır. v hızdır (km/h).

Kanada Ulusal Demiryolları tarafından kullanılan 1990 yılında yayınlanmış seyir direnci formülleri (AREMA, 1999):

Kapalı vagon (Box Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 4,9, a = 140 \quad (31)$$

Dolu platform vagon (Bulkhead Flat Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 5,3, a = 140 \quad (32)$$

Boş platform vagon (Bulkhead Flat Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 12, a = 140 \quad (33)$$

Dolu açık kömür vagonu (Coal Gondola Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 4,2, a = 105 \quad (34)$$

Boş açık kömür vagonu (Coal Gondola Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 12, a = 105 \quad (35)$$

Kapalı vagon (Covered Hopper Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 7,1, a = 125 \quad (36)$$

Sarnıç vagonu (Tank Car) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 5,5, a = 95 \quad (37)$$

Treylerli Standart Platform vagonu (Standard Flat Car without trailers) için;

$$R_r = 1,5 + 18 \cdot N/W + 0,03 \cdot V + (C \cdot a \cdot V^2)/(10000 \cdot W); C = 5, a = 25 \quad (38)$$

Treylersiz Standart Platform vagonu (Standard Flat Car with trailers) için;

$$R_r = 1,5 + 18. N/W + 0,03. V + (C. a. V^2)/(10000. W); C = 5, a = 125 \quad (39)$$

Eşitlik 31-39'da; R_r seyir direncidir (lb/ton), W vagonun ağırlığıdır (ton), N aks sayısıdır, a aracın ön alın yüzünün alanıdır (sq.ft), C değişik tipteki araçlar için katsayıdır, v hızdır (mph).

1988 yılında Amerikan Demiryolcular Birliği (AAR) tarafından Davis eşitliği aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir. AAR'nin yaptığı testlerde yolun durumuna göre B teriminin hesaba katılmayabileceğini belirlemiştir.

$$R = 1,3 + 18/W + (C. a. V^2)/(W. N) \quad (40)$$

Eşitlik 40'da; R seyir direncidir (lb/ton), W her bir akstaki ağırlıktır (ton), N aks sayısıdır, a aracın ön alın yüzünün alanıdır (sq.ft), C değişik tipteki araçlar için katsayıdır, v hızdır (mph).

Çin ulusal demiryollarının rulmanlı yatağa sahip dolu vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = 0,92 + 0,0048. v + 0,000125. v^2 \quad (41)$$

Eşitlik 41'de; R seyir direncidir (N/kN), v hızdır (km/h).

Çin ulusal demiryollarının boş vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = 2,23 + 0,0053. v + 0,000675. v^2 \quad (42)$$

Eşitlik 42'de; R seyir direncidir (N/kN), v hızdır (km/h).

Çin ulusal demiryollarının kaymalı yatağa sahip vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = 1,07 + 0,0011. v + 0,000236. v^2 \quad (43)$$

Eşitlik 43'de; R seyir direncidir (N/kN), v hızdır (km/h).

Koffman tarafından geliştirilen BR boji vagonlar için seyir direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = 0,7 + (8 + 0,1. v + 0,0025. v^2)/L \quad (44)$$

Eşitlik 44'de; R seyir direncidir (daN/t), v hızdır (km/h), L aks yüküdür (ton).

Avustralya'da dolu vagonlar için kullanılan seyir direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = 5,17 + 0,010997. v + 0,00051. v^2 \quad (45)$$

Eşitlik 45'de; R seyir direncidir (N/t), v hızdır (km/h).

Avustralya'da boş vagonlar için kullanılan seyir direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = 18,74 + 0,1111. v + 0,00372. v^2 \quad (46)$$

Eşitlik 46'da; R seyir direncidir (N/t), v hızdır (km/h).

Hızı 100 km/h olan ve tamamı aynı tip kapalı vagonlardan oluşan yük trenleri için Fransız Demiryollarının (SNCF) kullandığı seyir direnci formülü (Urlu, 1999):

$$r_{vs} = 1,5 + v^2/4200 \quad (47)$$

Eşitlik 47'de; r seyir direncidir (kp/ton), v hızdır (km/h).

Yükü ve darası toplamı 80 ton olan spesifik vagonlar (kömür, cevher, boraks vb.) için Fransız Demiryollarının (SNCF) kullandığı seyir direnci formülü (Urlu, 1999):

$$r_{vs} = 1,2 + v^2/4500 \quad (48)$$

Eşitlik 48'de; r seyir direncidir (kp/ton), v hızdır (km/h).

Alman Demiryollarının (DB) yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülü (Urlu, 1999):

$$r_{vs} = 1,5 + v^2/1200 \quad (49)$$

Eşitlik 49'da; r seyir direncidir (kp/ton), v hızdır (km/h).

General Electric Şirketi ve TÜLOMSAŞ ortaklığı ile Eskişehir'de üretilen DE37000 lik lokomotifin hız rampa eğrisi için kullanılan seyir direnci formülü ('DE 37000 Lokomotif Yük Hız Rampa Eğrisi', 2011):

$$r = 7,4 + 80,7 \cdot n/W + 0,044 \cdot V + (0,00113 \cdot a \cdot V^2)/W \quad (50)$$

Eşitlik 50'de; r seyir direncidir (N/ton), W vagonun ağırlığıdır (ton), n aks sayısıdır, a aracın ön alın yüzünün alanıdır (m^2), v hızdır (km/h).

Hyundai Rotem Şirketi ve TÜLOMSAŞ ortaklığı ile Eskişehir'de üretilen E68000 lik lokomotifin cer eğrileri ve işletme simülasyonları için kullanılan seyir direnci formülü aşağıdadır. Söz konusu formül Çek Demiryolları tarafından karma yük trenleri için yaygın olarak kullanılmaktadır ('E 68000 Cer Eğrileri ve İşletme Simülasyonları', n.d.):

$$r_f = 2 + 0,0008 \cdot v^2 \quad (51)$$

Eşitlik 51'de; r_f seyir direncidir (daN/ton), v hızdır (km/h).

Kurp Direnci (R_c)

Lukaszewicz tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan gerçek testler sonucu geliştirilen kurp direnci formülü (Lukaszewicz, 2007 ve 2009):

$$F_{Mc} = 780/(R - 55) \cdot g \cdot \sum_{i=1}^{n_c} Q_i(N), R > 350m, n_c \leq n_{ax}, \text{Uad tipi yük vagonları} \quad (52)$$

Eşitlik 52'de; F_{Mc} kurp direncidir (N), Q dingil yüküdür, n_{ax} toplam dingil sayısıdır, n_c kurptaki dingil sayısıdır. Test yapılan Uad tipi vagonlar üç parça döküm bojiden oluşmaktadır.

Profillidis tarafından ortaya konulan kurp direnci formülü (Rochard ve Schmid, 2000) ('Rail Resistance Equations, CEE 3604, Rail Transportation: Addendum', n.d.):

$$r_c = 0,01 \cdot k/R_c \quad (53)$$

Eşitlik 53'de; r_c kurp direncidir (kN/t), k trenin tasarımına bağlı 500-1200 arası değişen ortalama 800 alınan boyutsuz bir parametredir, R_c kurp yarıçapıdır (m).

Sachs tarafından ortaya konulan kurp direnci formülü (Rochard ve Schmid, 2000):

$$w_k = (1,6 \cdot a + 1,62)/R_c \quad (54)$$

Eşitlik 54'de; w_k kurp direncidir (kN/t), a bir bojide dingiller arası mesafedir, R_c kurp yarıçapıdır.

Diğer bir kurp direnci formülü aşağıda verilmiştir (Iwnicki, 2006):

$$F_{cr} = 6116/R \quad (55)$$

Eşitlik 55'de; F_{cr} kurp direncidir (N/t), R kurp yarıçapıdır (m). Boden yağlama ile kurp direnci % 50 azaltılabilir. İlk harekette kurp direnci seyir halinde hesaplananın iki katıdır (Iwnicki, 2006).

DB tarafından kullanılan ve Röckl tarafından ortaya konulan kurp direnci formülü (Steimel, 2008):

$$w_c = 650/((R/m) - 30); R \geq 300m \quad (56)$$

$$w_c = 500/((R/m) - 30); R < 300m \quad (57)$$

Eşitlik 56-57'de; w_c kurp direncidir (N/kN), R kurp yarıçapıdır (m).

Fransız demiryolları (SNCF) tarafından kullanılan kurp direnci formülü (Steimel, 2008) (Urlu, 1999):

$$w_c = 800/(R/m) \quad (58)$$

Eşitlik 58'de; w_c kurp direncidir (N/kN), R kurp yarıçapıdır (m).

Diğer bir kurp direnci formülü aşağıda verilmiştir (Rangelov, 2012):

$$R_c = 623,7/R \quad (59)$$

Eşitlik 59'da; R_c kurp direncidir (kg/ton), R kurp yarıçapıdır (m).

Sırbistan demiryolları (JZ) ve Çek Cumhuriyeti demiryolları tarafından kullanılan Röckl tarafından ortaya konulan kurp direnci formülü aşağıdadır. Söz konusu formül Hyundai Rotem Şirketi ve TÜLOMSAŞ ortaklığı ile Eskişehir'de üretilen E68000 lik lokomotifin cer eğrileri ve işletme simülasyonları için de kullanılmıştır (Radosavljevic, 2006) ('E 68000 Cer Eğrileri ve İşletme Simülasyonları', n.d.):

$$F_R^{dod} = 650/(R - 55) \cdot m_L \quad (60)$$

Eşitlik 60'da; F_{RR}^{dod} kurp direncidir (N), m_L küttedir (ton), R kurp yarıçapıdır (m).

Çin ulusal demiryolları tarafından kullanılan kurp direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = (600 \cdot L_c)/(Rad \cdot L_t) \quad (61)$$

Eşitlik 61'de; R kurp direncidir (daN/ton), Rad kurp yarıçapıdır (m), L_t trenin uzunluğudur (m), L_c kurpun uzunluğudur (m). $L_t \leq L_c$ ise $L_t = L_c$ kabul edilir.

Protopapadakis tarafından yaz mevsimi için ortaya konulan kurp direnci formülü (Urlu, 1999):

$$r_k = (232,2 + 103,4 \cdot a)/\rho \quad (62)$$

Eşitlik 62'de; r_k kurp direncidir (kp/ton), a dingiller arası rijit uzunluktur (m), $a=1,75m-8,25m$, ρ kurp yarıçapıdır.

Protopapadakis tarafından kış mevsimi için ortaya konulan kurp direnci formülü (Urlu, 1999):

$$r_k = (175 + 77,6 \cdot a)/\rho \quad (63)$$

Eşitlik 63'de; r_k kurp direncidir (kp/ton), a dingiller arası rijit uzunluktur (m), $a=1,75m-8,25m$, ρ kurp yarıçapıdır.

Rampa Direnci (R_g)

Rampa direnci, rampanın eğimi ve araç kütlesi ile ilgilidir. Aşağıdaki formülle rampa direnci bulunabilir (Rochard ve Schmid, 2000; Nawaz, 2015):

$$F_g(N) = m \cdot g \cdot \sin\alpha \approx m \cdot g \cdot \tan\alpha \quad (64)$$

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

$$\text{Lineer kuvvet (kN)} = (M \cdot g)/X \quad (65)$$

Eşitlik 65'de; m trenin kütlesidir (kg), M trenin toplam kütlesidir (t), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), α rampanın eğimidir ($^\circ$ olarak), X binde rampa eğimidir.

Schmidt tarafından aşağıdaki rampa direnci formülü kullanılmıştır (Schmidt, 1910):

$$R_g = 0,379 \cdot G \quad (66)$$

Eşitlik 66'da; R_g kurp direncidir (pounds/ton), G eğimdir (feet/pounds).

Amerikan Demiryolu Mühendisleri Birliği (AREA) tarafından kullanılan rampa direnci formülü ('Rail Resistance Equations, CEE 3604, Rail Transportation: Addendum', n.d.):

$$R_g(\text{kN}) = (M \cdot g)/X \quad (67)$$

Eşitlik 67'de; R_g eğim nedeniyle meydana gelen dirençtir (kN), M trenin kütlesidir (metrik ton), g yerçekimi ivmesidir (m/s^2), X eğimdir (örnek olarak; %3 eğimde $1/0.03=33.3$ alınır)

Çin ulusal demiryolları tarafından kullanılan rampa direnci formülü ('Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project', n.d.):

$$R = \text{Grade} \quad (68)$$

Eşitlik 68'de; R rampa direncidir (daN/ton), Grade ‰ olarak eğimdir. Örnek olarak; ‰ 10 için bu değer Grade değeri 10 dur.

Hyundai Rotem Şirketi ve TÜLOMSAŞ ortaklığı ile Eskişehir'de üretilen E68000 lik lokomotifin cer eğrileri ve işletme simülasyonları için kullanılan rampa direnci formülü ('E 68000 Cer Eğrileri ve İşletme Simülasyonları', n.d.):

$$S = s \quad (69)$$

Eşitlik 69'da; S kurp direncidir (daN/ton), s ‰ olarak eğim oranıdır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 1'de eşitlik 3-51'e göre hesaplanan 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h hızlardaki seyir direnci (daN/ton) değerleri görülmektedir. 40 km/h hız için seyir direnci 0,64 daN/ton (eşitlik 19) ile 3,71 daN/ton (eşitlik 45) arasında değişmektedir. Eşitlik 20'deki seyir direnci formülü TCDD tarafından lokomotif tiplerine göre hamule (yük) çekerleri hesaplarında eskiden beri kullanılmaktadır. TCDD'nin kullandığı formülle 40 km/h hız için seyir direnci 1,93 daN/ton olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Eşitlik 3-51'e göre çeşitli hızlar için hesaplanan seyir direnci (daN/t)

| Eşitlik | Hız (km/h) | | | | | | | |
|---------|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| 3 | 0,68 | 0,89 | 1,12 | 1,38 | 1,65 | 1,94 | 2,25 | 2,59 |
| 4 | 0,32 | 0,46 | 0,71 | 1,09 | 1,57 | 2,18 | 2,90 | 3,73 |
| 5 | 0,37 | 0,56 | 0,88 | 1,32 | 1,87 | 2,54 | 3,33 | 4,25 |
| 6 | 0,31 | 0,44 | 0,67 | 1,00 | 1,44 | 1,98 | 2,63 | 3,38 |
| 7 | 1,25 | 1,46 | 1,80 | 2,27 | 2,88 | 3,62 | 4,48 | 5,48 |
| 8 | 1,27 | 1,31 | 1,39 | 1,50 | 1,65 | 1,82 | 2,03 | 2,27 |
| 9 | 1,55 | 1,70 | 1,95 | 2,30 | 2,75 | 3,30 | 3,95 | 4,70 |
| 10 | 1,56 | 1,75 | 2,06 | 2,50 | 3,06 | 3,75 | 4,56 | 5,50 |
| 11 | 1,23 | 1,30 | 1,43 | 1,60 | 1,83 | 2,10 | 2,43 | 2,80 |
| 12 | 2,55 | 2,70 | 2,95 | 3,30 | 3,75 | 4,30 | 4,95 | 5,70 |
| 13 | 1,03 | 1,10 | 1,23 | 1,40 | 1,63 | 1,90 | 2,23 | 2,60 |
| 14 | 0,31 | 0,45 | 0,69 | 1,05 | 1,51 | 2,09 | 2,78 | 3,58 |
| 15 | 1,76 | 2,20 | 2,76 | 3,45 | 4,26 | 5,20 | 6,26 | 7,45 |
| 16 | 1,02 | 1,08 | 1,18 | 1,32 | 1,50 | 1,72 | 1,98 | 2,28 |
| 17 | 1,08 | 1,26 | 1,54 | 1,93 | 2,42 | 3,02 | 3,71 | 4,52 |
| 18 | 1,32 | 1,36 | 1,44 | 1,54 | 1,68 | 1,84 | 2,04 | 2,26 |
| 19 | 2,11 | 2,43 | 2,96 | 3,71 | 4,68 | 5,85 | 7,24 | 8,85 |
| 20 | 2,06 | 2,23 | 2,51 | 2,91 | 3,43 | 4,05 | 4,79 | 5,65 |
| 21 | 2,05 | 2,19 | 2,42 | 2,75 | 3,18 | 3,69 | 4,30 | 5,01 |
| 22 | 0,64 | 1,25 | 1,99 | 2,89 | 3,97 | 5,24 | 6,70 | 8,37 |
| 23 | 0,59 | 1,05 | 1,54 | 2,09 | 2,72 | 3,44 | 4,25 | 5,17 |
| 24 | 0,58 | 1,01 | 1,45 | 1,93 | 2,47 | 3,08 | 3,76 | 4,53 |
| 25 | 1,09 | 1,25 | 1,40 | 1,56 | 1,72 | 1,88 | 2,03 | 2,19 |
| 26 | 0,75 | 0,90 | 1,12 | 1,41 | 1,77 | 2,20 | 2,70 | 3,27 |
| 27 | 0,76 | 0,95 | 1,23 | 1,60 | 2,06 | 2,62 | 3,28 | 4,02 |
| 28 | 0,80 | 1,08 | 1,53 | 2,13 | 2,90 | 3,82 | 4,91 | 6,15 |
| 29 | 1,30 | 1,46 | 1,64 | 1,83 | 2,05 | 2,29 | 2,55 | 2,83 |
| 30 | 1,48 | 1,97 | 2,48 | 3,02 | 3,57 | 4,15 | 4,75 | 5,37 |
| 31 | 1,13 | 1,26 | 1,41 | 1,58 | 1,79 | 2,01 | 2,27 | 2,55 |
| 32 | 1,13 | 1,26 | 1,42 | 1,60 | 1,81 | 2,05 | 2,32 | 2,62 |
| 33 | 1,15 | 1,33 | 1,58 | 1,89 | 2,26 | 2,70 | 3,21 | 3,78 |
| 34 | 1,13 | 1,24 | 1,36 | 1,51 | 1,67 | 1,84 | 2,04 | 2,25 |
| 35 | 1,14 | 1,30 | 1,51 | 1,76 | 2,06 | 2,41 | 2,81 | 3,26 |
| 36 | 1,14 | 1,27 | 1,44 | 1,64 | 1,88 | 2,15 | 2,46 | 2,80 |
| 37 | 1,13 | 1,24 | 1,38 | 1,53 | 1,71 | 1,90 | 2,12 | 2,35 |
| 38 | 1,12 | 1,21 | 1,31 | 1,41 | 1,51 | 1,62 | 1,74 | 1,86 |
| 39 | 1,13 | 1,25 | 1,40 | 1,56 | 1,76 | 1,97 | 2,21 | 2,48 |
| 40 | 0,96 | 0,99 | 1,04 | 1,11 | 1,20 | 1,32 | 1,45 | 1,61 |
| 41 | 0,98 | 1,07 | 1,18 | 1,31 | 1,47 | 1,66 | 1,87 | 2,10 |
| 42 | 2,35 | 2,61 | 3,00 | 3,52 | 4,18 | 4,98 | 5,91 | 6,97 |
| 43 | 1,10 | 1,19 | 1,32 | 1,49 | 1,72 | 1,99 | 2,30 | 2,67 |
| 44 | 1,11 | 1,19 | 1,29 | 1,41 | 1,56 | 1,72 | 1,91 | 2,12 |
| 45 | 0,53 | 0,56 | 0,60 | 0,64 | 0,70 | 0,77 | 0,84 | 0,93 |
| 46 | 2,02 | 2,24 | 2,54 | 2,91 | 3,35 | 3,87 | 4,46 | 5,13 |
| 47 | 1,52 | 1,60 | 1,71 | 1,88 | 2,10 | 2,36 | 2,67 | 3,02 |
| 48 | 1,22 | 1,29 | 1,40 | 1,56 | 1,76 | 2,00 | 2,29 | 2,62 |
| 49 | 1,58 | 1,83 | 2,25 | 2,83 | 3,58 | 4,50 | 5,58 | 6,83 |
| 50 | 1,14 | 1,19 | 1,24 | 1,29 | 1,35 | 1,41 | 1,47 | 1,53 |
| 51 | 2,08 | 2,32 | 2,72 | 3,28 | 4,00 | 4,88 | 5,92 | 7,12 |

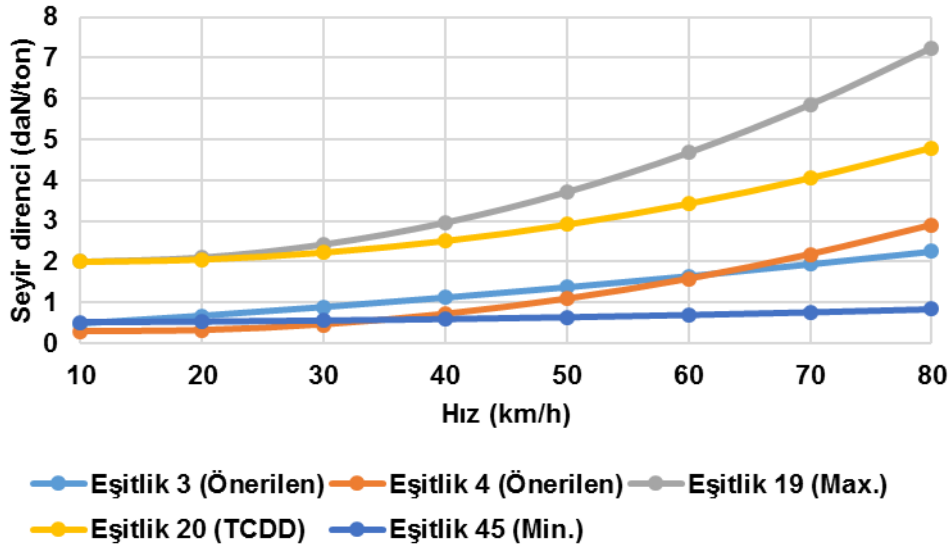
Tablo 2'de eşitlik 52-63'e göre hesaplanan 300 m, 400 m, 500 m, 600 m, 700 m, 800 m, 900 m, 1000 m kurp yarıçapları için kurp seyir direnci (daN/ton) değerleri görülmektedir. 600 m kurp yarıçapı için kurp direnci 0,52 daN/ton (eşitlik 63) ile 1,43 daN/ton (eşitlik 52) arasında değişmektedir. Eşitlik 58'deki kurp direnci formülü TCDD tarafından lokomotif tiplerine göre hamule (yük) çekerleri

hesaplarında eskiden beri kullanılmaktadır. TCDD'nin kullandığı formülle 600 m kurp yarıçapı için kurp direnci 1,33 daN/ton olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Eşitlik 52-63'e göre çeşitli kurp yarıçapları için hesaplanan kurp direnci (daN/t)

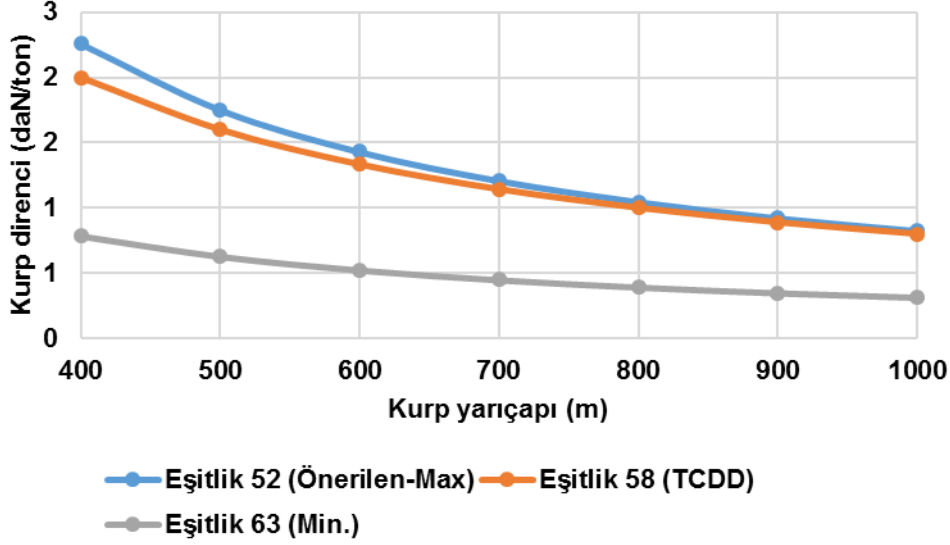
| Eşitlik | Kurp Yarıçapı (m) | | | | | | | |
|---------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| 52 | - | 2,26 | 1,75 | 1,43 | 1,21 | 1,05 | 0,92 | 0,83 |
| 53 | 2,67 | 2,00 | 1,60 | 1,33 | 1,14 | 1,00 | 0,89 | 0,80 |
| 54 | 1,50 | 1,13 | 0,90 | 0,75 | 0,64 | 0,56 | 0,50 | 0,45 |
| 55 | 2,04 | 1,53 | 1,22 | 1,02 | 0,87 | 0,76 | 0,68 | 0,61 |
| 56 | 2,41 | - | - | - | - | - | - | - |
| 57 | - | 1,35 | 1,06 | 0,88 | 0,75 | 0,65 | 0,57 | 0,52 |
| 58 | 2,67 | 2,00 | 1,60 | 1,33 | 1,14 | 1,00 | 0,89 | 0,80 |
| 59 | 2,08 | 1,56 | 1,25 | 1,04 | 0,89 | 0,78 | 0,69 | 0,62 |
| 60 | 2,65 | 1,88 | 1,46 | 1,19 | 1,01 | 0,87 | 0,77 | 0,69 |
| 61 | 2,00 | 1,50 | 1,20 | 1,00 | 0,86 | 0,75 | 0,67 | 0,60 |
| 62 | 1,39 | 1,05 | 0,84 | 0,70 | 0,60 | 0,52 | 0,46 | 0,42 |
| 63 | 1,05 | 0,79 | 0,63 | 0,52 | 0,45 | 0,39 | 0,35 | 0,31 |

Seyir direnci için TCDD tarafından kullanılan eşitlik 20 yerine; Radosavljevic ve arkadaşları tarafından karışık yük vagonları ile Sırbistan, Hırvatistan hatlarında 2000 yılında yapılan gerçek testler sonucu geliştirilen eşitlik 3 veya Lukaszewicz tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan tam ölçekli testler sonucu geliştirilen eşitlik 4'ün kullanılması önerilmektedir. Söz konusu formüller yapılan en son testler sonucu geliştirildikleri için önerilmiştir. Eşitlik 3, 4, 19, 20 ve 45'in karşılaştırmaları şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Eşitlik 3, 4, 19, 20 ve 45'in farklı hızlar için karşılaştırması

Kurp direnci için TCDD tarafından kullanılan eşitlik 58 yerine; Lukaszewicz tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan gerçek testler sonucu geliştirilen eşitlik 52'nin kullanılması önerilmektedir. Söz konusu formül yapılan en son testler sonucu geliştirildikleri için önerilmiştir. Eşitlik 52, 58 ve 63'ün karşılaştırmaları şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Eşitlik 52, 58 ve 63'ün farklı kırp yarıçapları için karşılaştırması

SONUÇLAR

Trenlerin seyir süresinin, tren çekerinin ve enerji tüketiminin belirlenmesi; trenin gidiş yönünün tersine meydana gelen kuvvetlerin bilinmesi ile mümkündür. Bu kuvvetlerin tüm koşullar için deneysel olarak ölçümü zahmetli olacağı için belirli şartlarda yapılan deneyler ile tren direnci formülleri geliştirilmiştir. Geliştirilen tren direnci formülleri trenlerin seyir süresi, tren çekeri ve enerji tüketimi hesaplarını yapan bilgisayar programlarında kullanılmaktadır. Bu formüllerin sahadaki gerçek koşullara yakın sonuçlar vermesi operasyonel verimliliği artıracaktır. 1910 yılında Schmidt, 1913 yılında Strahl ve 1926 yılında Davis tarafından geliştirilen formüller; kaymalı yataklı eski demiryolu araçlarında 64 km/h hıza kadar doğru sonuçlar vermektedir. Bu formüller günümüz trenlerine ve daha yüksek hızlar için uygulandığında gerçekçi sonuçlar vermemektedir. 1900 lü yılların başlarından bu yana demiryolu araçlarının taşıdıkları yükler, hızları ve boyutları artmış, araçların dingil kutularının içindeki yataklar ve yol yapısı gelişmiştir. Bu nedenle; eski formüller son yıllarda geliştirilen formüllere göre farklı sonuçlar vermektedir. Demiryolu ve araç teknolojilerindeki gelişmeler ortaya çıkan tren direnci değerlerini de etkilemektedir. Bu nedenle formüllerin belirli aralıklarla güncellenmesi gereklidir. Bu çalışmada literatürdeki eski ve son yıllarda geliştirilmiş farklı formüller ve TCDD'nin kullandığı formüller karşılaştırılmıştır. Mevcut formüllerden bazılarının kullanımı önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- AREMA (1999). Manual for Railway Engineering, Economics of Railway Engineering and Operation, Train Performance. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association.
- Davis, W. J. (1926). The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars. Schenectady, N.Y. General Electric.
- DE 37000 Lokomotif Yük Hız Rampa Eğrisi. 2011, June 30. General Electric Company.
- E 68000 Cer Eğrileri ve İşletme Simülasyonları. (n.d.). Hyundai Rotem.
- Hay, W. W. (1982). Railroad engineering (2nd ed). New York: Wiley.
- Iwnicki, S. (Ed.). (2006). Handbook of railway vehicle dynamics. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis.
- Lagos, M. (2011). CATO Offers Energy Savings. Railway Gazette International.
- Lindgreen, E., Spencer C., S. (2005). Driving Resistance From Rialroad Trains (No. MEK-ET 2005 – 03). Technical University of Denmark.
- Locomotive and Train Resistance | 5AT Advanced Steam Locomotive Project. (n.d.). Retrieved 26 April 2017, from <http://5at.co.uk/index.php/definitions/terms-and-definitions/resistance.html#Plots>
- Lukaszewicz, P. (2007). Running resistance - results and analysis of full-scale tests with passenger and freight trains in Sweden. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 221(2), 183–192. <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT89>
- Lukaszewicz, P. (2001). Energy Consumption and Running Time for Trains (Doctoral Thesis). Department of Vehicle Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Lukaszewicz, P. (2007). Running Resistance of Ore trains in Sweden (pp. 111–120). Presented at the High Tech in Heavy Haul 2007.

- Lukaszewicz, P. (2009). Running resistance and energy consumption of ore trains in Sweden. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 223(2), 189–197. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT233>
- Nawaz, M. U. (2015). Estimation of Running Resistance in Train Tunnels. Norwegian University of Science and Technology.
- Pritchard, J. (2013). Investigating The Operational Energy Consumption of a Train–Understanding The Factors Which Affect It, And The Potential of Rail to be A Sustainable Mode of Transport. Presented at the 13th WCTR, Rio de Janeiro, Brazil.
- 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. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT40>
- Radosavljevic, A., Milutinovic, D., Jovanovic, R., Lucanin, V. (2003). Experimental determination of mixed freight train running resistance and influence on energy consumption. Presented at the World Congress on Railway Research (WCRR) 2003, Edinburgh, UK.
- Rail Resistance Equations, CEE 3604, Rail Transportation: Addendum. (n.d.). Transportation Engineering (A.A. Trani), VirginiaTech.
- Rangelov, V. N. 2012. Gradient modelling with calibrated train performance models (pp. 123–134). <https://doi.org/10.2495/CR120111>
- 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. <https://doi.org/10.1243/0954409001531306>
- Schmidt, E. C. (1910). Freight Train Resistance. Its Relation to Car Weight. Vol. 43 of Engineering Experiment Station Illinois University, Urbana, Illinois.
- TCDD (2009). Şebekemizdeki Lokomotif Tiplerine Göre; Hamule (Yük) Çekerleri ile Koşum Takımı Çekerlerini Gösterir Tablolar. 2009. TCDD Tesisler Dairesi Başkanlığı Orer Şubesi.
- Steimel, A. 2008. Electric traction - motive power and energy supply: basics and practical Experience. München: Oldenbourg Industrieverl.
- Strahl, G. 1913. Verfahren zur Bestimmung der Belastungsgrenzen der Dampflokomotiven. Z. Des. Vereins Dtsch. Ing. 57, 251.
- Szanto, F. (2016). Rolling Resistance Revisited. Presented at the CORE2016 Conference on Railway Excellence RTSA.
- Tuthill, J. K. (1948). High Speed Freight Train Resistance: Its Relations to Average Car Weight. University of Illinois Engineering Experiment Station, Vol. 45, No.32, Bulletin Series 376, Urbana.
- URL-1 (2017). Dynamometer car. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dynamometer_car&oldid=764155907 (Erişim tarihi: 7 Şubat 2017)
- Urlu, C. (1999). Demiryolu Araçlarının İleri Dinamiği. Ankara: TCDD Yayınları.
-