



Türkiye Şartlarına Uygun Vagon Seyir Direnci Formülünün Enerji Verimliliği Açısından Deneysel Olarak Belirlenmesi

Ömür AKBAYIR¹, Beytullah BAŞEĞMEZ^{*2}

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sistemler Makine Teknolojisi Programı, Eskişehir, Türkiye

² Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Uşak, Türkiye

*beytullah.basegmez@usak.edu.tr

(Alınış/Received: 17.09.2020, Kabul/Accepted: 10.12.2020, Yayınlanma/Published: 31.01.2021)

Öz: Demiryolu taşıtının enerji sarfiyatına neden olan temel etken, tren hareketini negatif yönde etkileyen kuvvetler toplamı olan tren dirençleridir. Çeşitli çalışma koşullarında ortaya çıkan tren direncinin bilinmesi; ihtiyaç duyulan lokomotif çekiş kuvvetinin hesaplanması, lokomotifin güç gereksiniminin belirlenmesi, enerji tüketimi öngörüsü ve seyir süresinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılmaktadır. Birçok ülke, sahip oldukları demiryollarında işletim sırasında ortaya çıkan seyir direncini hesaplamak için kendi formüllerini geliştirmiştir. Türkiye koşullarına en uygun vagon seyir direnci formülünün tespit edilmesi amacıyla taşıyan çalışmada, Türkiye demiryolları 12 farklı hat kesiminde gerçekleştirilen deneylere ilişkin veriler, bu deneyde kullanılan trenlerin özellikleri ve deneylerin uygulandığı demiryolu şartları, 24 adet vagon seyir direnci formülüne uygulanmıştır. Gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde ortaya çıkan tren direnci sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada ortaya çıkan farkların ortalamaları, çeşitli tren direnci formüllerine göre %3 ila %12 arasında değişmektedir. Buradan hareketle, denklem 22'nin en düşük sapmaya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu formül, Türkiye demiryollarına en uygun vagon seyir direnci formülü olarak önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Enerji, Tren Direnci, Vagon Seyir Direnci

Experimental Determination of Wagon Running Resistance Formula in terms of Energy Efficiency for Turkish Railway Conditions

Abstract: The main factor causing the energy consumption of railway vehicle is train resistances that is the sum of the forces negatively affecting movement of the train. Knowing of the train resistances occurring in the various operating conditions is used for calculating desired locomotive tractive effort, identifying locomotive power requirement, prescience of the energy consumption and determining running time. Formulas are developed by many countries, for calculating of the running resistance that occurs during operating in the own railroads. This study has been undertaken to determine suitable train wagon running resistance formulas for the railroads in Turkey. The experimental data have been recorded over 12 line segments of the national railroad system. The characteristics of the railroad and the rolling stock sets are used to calculate the train resistance according to 24 wagon running resistance formulas. Actual measurements and calculated train resistances are compared. The averages of the differences between the calculated values and the measured values range from 3% to 12%. The formula that provides the smallest average difference is the equation 22. This formula has been recommended for the Turkish railroads wagon running resistance.

Keywords: Energy, Train Resistance, Wagon Running Resistance

1. Giriş

Taşımacılıkta tüketilen enerji, Eurostat [1] verilerine göre AB ülkeleri toplam enerji tüketiminin %31'ini oluşturmaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevresel kaygılar, enerji tüketiminin azaltılması

Atıf için/Cite as: Ö. Akbayır, B. Başegmez, "Türkiye şartlarına uygun vagon seyir direnci formülünün enerji verimliliği açısından deneysel olarak belirlenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 65-75, Jan. 20221. doi: 10.47072/demiryolu.796392

yönünde artan baskı oluşturmaktadır. Raylı sistemlerde harcanan enerjinin asgari seviyede tutulması da bu bağlamdadır.

Türkiye’de taşımacılık sektörü sürekli büyümektedir ve raylı sistemlerdeki büyümenin sektördeki büyümeden daha fazla olması amaçlanmaktadır. Raylı sistemlerin yük taşımacılığı içerisindeki oranının artırılması hedeflenmektedir. Artan demiryolu yük taşımacılığı ile birlikte oluşacak enerji sarfiyatının minimize edilmesi, gelişmişlik düzeyinin artışıyla paralel enerji talebi hızla katlanan ve elektrik üretiminin önemli bir kısmı ithal kaynak kullanımına dayanan Türkiye’de, kaynakların verimli kullanılması açısından yüksek öneme sahiptir.

Demiryolu taşıtı çekiş sisteminin enerji sarfiyatına neden olan temel etken, tren dirençleridir. Tren hareketini negatif yönde etkileyen kuvvetler toplamı, tren direnci olarak adlandırılmaktadır. Tren dirençleri; eğimin neden olduğu eğim direnci, hattaki kurlarda ortaya çıkan kurb direnci ve trenin salt seyahati sırasında meydana gelen seyir direnci olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Seyir direnci; yuvarlanma direnci, aerodinamik direnç, hattan kaynaklı dirençler ve muylu direncinin toplamını ifade eder.

Tren dirençlerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemler; çekiş gücü yöntemi, dinamometre yöntemi ve salıverme yöntemi olmak üzere üç ana grup altında sınıflandırılabilir. Tren direnci formülleri, bu yöntemlerden biri kullanılarak geliştirilen ampirik fonksiyonlardır. Gerçek şartlarda yapılan birçok test sonucu elde edilen verilerden, en küçük kareler yöntemi ile regresyon analizi yapılarak bir fonksiyon oluşturulmaktadır. Birçok ülke, sahip oldukları demiryollarında işletim sırasında ortaya çıkan tren direncini hesaplamak için kendi formüllerini geliştirmiştir. Bu çalışma, Türkiye demiryolları tren direnci formülü olarak kullanılacak formülün belirlenmesi amacıyla taşımaktadır.

2. Literatürdeki Vagon Seyir Direnci Formülleri

Schmidt [2] tarafından 1908-1909 yıllarında Illinois/ABD’de 40 mph (64 km/h) hıza kadar yapılan bir dizi deney sonucunda yılında geliştirilen seyir direnci formülü Denklem 1’de yer almaktadır. Denklem 1’de, R' seyir direnci (p/t), W araç ağırlığı(t), V hızdır.

$$R' = (V + 39,6 - 0,031 \cdot W)/4,08 + 0,152 \cdot W \quad (1)$$

Yük vagonları için Davis’in [3] geliştirdiği denklem;

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

Denklem 2’de; R' seyir direncidir (lb/ton), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır, A_f aracın ön alın yüzünün alanıdır (sq.ft), V hızdır (mph)

Schmidt ve Davis formülleri, yayın yılları göz önünde bulundurularak hesaplamaya katılmamıştır. 1940’lar ve 1950’lerde yapılan seyir direnci testleri sonucu, aşağıdaki ‘Değiştirilmiş Davis Formülü’ kullanılmaya başlanmıştır.

$$R' = 0,6 + 20/w + 0,01 \cdot V + K \cdot V^2/w \cdot n \quad (3)$$

Denklem 3’de; R' vagon seyir direnci (lb/t), w aks başına ağırlık (t), n aks sayısı, V hız (mph), K hava direnç katsayısıdır. (K ; konvansiyonel taşıtlar için 0,076, yük kamyonuyla yüklü taşıtlar için 0,16, konteynerler için 0,0935’dir) [4]. Yapılan hesaplamalarda konvansiyonel taşıtlara ait değer kullanılmıştır.

Lukaszewicz [5] tarafından İsveç'te 1995 yılında yapılan tam ölçekli testler sonucu çeşitli tipte yük vagonları için seyir direnci formülleri geliştirilmiştir. Denklem 4'de karışık yük vagonları için uygulanan formül verilmiştir. Denklemde, m_a aks yüküdür, n toplam aks sayısıdır, L_T tren uzunluğudur.

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

Fransa'nın standart UIC (Uluslararası Demiryolları Birliği) araçları için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 5'de verilmiştir [6].

$$R' = 1,25 + V^2/6300 \quad (5)$$

Cole'un [6] çalışmasında yer verdiği, Fransa'nın 10 ton dingil yüklü vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 6'da verilmiştir

$$R' = 1,5 + V^2/1600 \quad (6)$$

Denklem 5 ve 6'da; R' seyir direncidir (daN/t), V ise (km/h) cinsinden hızdır.

Fransa Demiryolları'nın (SNCF) 18 ton dingil yüklü dolu yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 7'de verilmiştir [6]. Denklemde; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,2 + V^2/4000 \quad (7)$$

SNCF'nin ağır yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 8'de yer almaktadır [7]. Denklemde; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1 + V^2/4000 \quad (8)$$

Yük trenleri için Rusya'da kayda alınan seyir direnci formülü Denklem 9'da verilmiştir [7].

$$R' = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2) \quad (9)$$

DB'nin (Deutsche Bahn) dolu yük trenleri için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 10'da verilmiştir [8]. Denklem 10'da; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

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

Cole'un [6] çalışmasında yer alan Amerikan Demiryolları tarafından kullanılan değiştirilmiş Davis formülü;

$$R' = K_a \cdot [2,943 + 89,2/m_a + 0,0306 \cdot V + 1,741 \cdot k_{ad} \cdot V^2/m_a \cdot n] \quad (11)$$

Denklem 11'de, seyir direnci N/t, V hız (km/h), m_a aks başına kütle (t), n , aks sayısıdır. Konteynerli platform vagonu için $K_a = 0,95$, treylerli platform vagonu için $K_a = 1,05$, kapalı dipten kapaklı vagon için $K_a = 1,05$, sırasıyla boş, dolu kapalı ve boş açık otomobil vagonları için $K_a = 1,2$, $K_a = 1,3$, $K_a = 1,9$ 'dur. k_{ad} , konvansiyonel taşıtlar için 0,07, konteynerler için 0,0935, treyler ve platform vagonlar için 0,16'dır. Sonuçları sunulan hesaplamalarda $K_a = 1,05$ ve $k_{ad} = 0,07$ alınmıştır.

Alman demiryollarında yük trenleri için kullanılan Strahl formülü aşağıda verilmiştir [9]. Denklem 12’de R' seyir direncidir (N/kg), V hızdır (m/s). Formüldeki m 'in değeri yük vagonları için 10'dur.

$$R' = 0,01 \left[(1,5 - 2,5) + \left(0,007 + \frac{1}{m} \right) \left(\frac{3,6V}{10} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Sırbistan ve Karadağ'da çeşitli tipteki yük vagonları için değiştirilmiş Strahl formülleri kullanılmaktadır [7]. Aşağıda sırasıyla rulmanlı yatağa sahip (Denklem 13) ve kaymalı yataklı (Denklem 14) karışık vagonlardan oluşan yük trenleri için kullanılan formüller verilmiştir. Denklem 13 ve 14’de R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 2,2 - 80/(V + 38) + (k + 0,007) \cdot (V/10)^2; k = 0,050 \quad (13)$$

$$R' = 2 + (k + 0,007) \cdot (v/10)^2; k = 0,050 \quad (14)$$

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

$$R' = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2 \quad (15)$$

Denklem 15’de; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h) [7].

Radosavljevic [7] tarafından karışık yük vagonları için Sırbistan, Hırvatistan hatlarında 2000 yılında yapılan testler sonucu geliştirilen seyir direnci formülü aşağıdadır. Denklem 16’da; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 0,483 + 0,0183 \cdot V + 0,0001 \cdot V^2 \quad (16)$$

Yük vagonları için AAR tarafından yayınlanmış değiştirilmiş Davis formülü verilmiştir [10]. Denklem 17’de; R' seyir direncidir (N/t), V hızdır (km/h), w her bir akstaki ağırlıktır (ton), n aks sayısıdır.

$$R' = 6,5 + 320/w \cdot n + 0,46 \cdot V + 0,096 \cdot V^2/w \cdot n \quad (17)$$

Çin ulusal demiryollarının rulmanlı yatağa sahip dolu vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 18’de verilmiştir [8]. Denklemde; direnç daN/t, hız km/h cinsindedir

$$R' = 0,92 + 0,0048 \cdot V + 0,000125 \cdot V^2 \quad (18)$$

Çin ulusal demiryollarının kaymalı yatağa sahip vagonlar için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 19’da verilmiştir [8]. Denklemde; R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,07 + 0,0011 \cdot V + 0,000236 \cdot V^2 \quad (19)$$

Koffman tarafından geliştirilen yük vagonları için seyir direnci formülü, Denklem 20’de verilmiştir [8]. Denklem 20’de, R' seyir direncidir (daN/t), V hızdır (km/h), m_a aks yüküdür (ton).

$$R' = 0,7 + (8 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2)/m_a \quad (20)$$

Avustralya’da dolu vagonlar için kullanılan seyir direnci formülü, Denklem 21’de yer almaktadır [8]. Denklemde; R' seyir direncidir (N/t), V hızdır (km/h).

$$R' = 5,17 + 0,010997.V + 0,00051.V^2 \quad (21)$$

Daha kısa zamanda uygulanabilen ve diğer yöntemlerle eşdeğer sonuçların elde edilebildiği, Milano Politeknik Üniversitesi'nden Somaschini, Rocchi, Tomasini ve Schito'nun [11] ortaya koyduğu yeni regresyon yöntemiyle elde edilmiş seyir direnci formülü aşağıda yer almaktadır. Denklem 22'de, R' seyir direncidir (N), m tren toplam kütlesi (t) ve V hızdır (m/s).

$$R' = 5,138.m + 21,91.V + 6,21.V^2 \quad (22)$$

Hızı 100 km/h olan ve tamamı aynı tip kapalı vagonlardan oluşan yük trenleri için Fransız Demiryollarının (SNCF) kullandığı seyir direnci formülü Denklem 23'de verilmiştir [12]. Denklemde; R' seyir direncidir (kp/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,5 + V^2/4200 \quad (23)$$

Yükü ve darası toplamı 80 ton olan spesifik vagonlar (kömür, cevher, boraks vb.) için Fransız Demiryollarının (SNCF) kullandığı seyir direnci formülü, Denklem 24'tedir. [12]. Denklemde; R' seyir direncidir (kp/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,2 + V^2/4500 \quad (24)$$

DB'nin yük vagonları için kullandığı seyir direnci formülü Denklem 25'de verilmiştir [12]. Denklemde; R' seyir direncidir (kp/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,5 + V^2/1200 \quad (25)$$

E tipi yüksek kenarlı açık vagonlardan oluşan trenler için geliştirilmiş seyir direnci formülü Denklem 26'da verilmiştir [13]. Denklem 26'da R' seyir direncidir (kg/ton), V hızdır (km/h).

$$R' = 1,333973 + 0,021983.V + 0,000242.V^2 \quad (26)$$

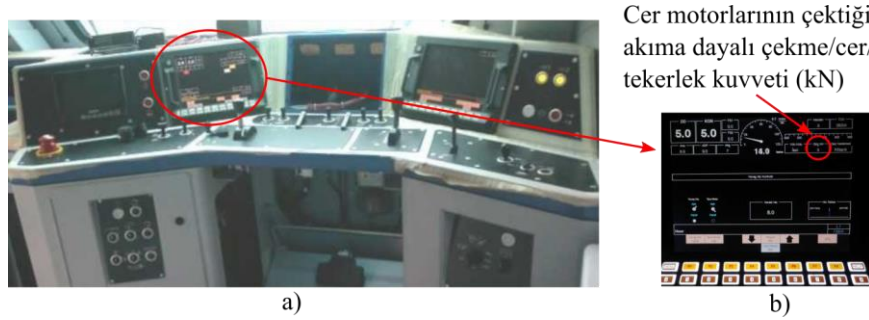
3. Metot

En uygun vagon seyir direncinin tespiti amacıyla, Türkiye demiryollarında gerçekleştirilen deney verileri çeşitli ülkeler/kuruluşlar tarafından kullanılmakta olan formüllere uygulanmıştır. Hesaplamalarda, TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) Kapasite Yönetim Daire Başkanlığının 3. ve 7. bölgelerde, 2017 yılında gerçekleştirilen deney verileri kullanılmıştır. Şekil 1'de bir test treni görülmektedir. Deneylerde karışık yük vagonları kullanılmıştır.



Şekil 1. Teste kullanılan DE 36005 lokomotif

Yapılan hesaplamalarda formüllere girilen deney verileri, Tablo 1’de yer almaktadır. Tekerlek kuvveti verileri Şekil 2’de görülen lokomotifin kumanda masasında bulunan akıllı ekran üzerinden temin edilmiştir. Tablo 1’de deneylerin gerçekleştiği hat kesimlerine ait rampa, kurb değerleri ve kritik mesafeler verilmiştir. Deneylerde kullanılan lokomotif tipleri, bu lokomotiflerin kütleleri ve kritik hız değerleri, ayrıca trenin toplam kütlesi ve hat kesimi içerisinde ulaşılan maksimum hız değerleri Tablo 1’de yer almaktadır. Giriş bölümünde verilen denklemler yardımıyla hesaplanan toplam dirençler ile karşılaştırmada kullanılan, cer akım kuvveti değerleri, her bir hat kesimi için Tablo 1’e eklenmiştir.



Şekil 2. a) DE 36000 tipi lokomotifin kumanda masası b) kumanda masası üzerinde bulunan akıllı ekran

Tablo 1. Deney verileri ve deney yapılan hat kesimlerinin karakteristikleri

Hat Kesimleri	Rampa	Kurb (m)	Tren Ton	Loko ton	Loko no	Kritik mesafe (km+m)	Kritik hız (km/h)	Kesim sonunda hız (km/h)	Cer kuvveti (kN)
Banaz-Nohutova	17,19	299	1586	129	DE 36020	316+300	23	25	328
Ekinova-Karakuyu	14,41	390	1700	129	DE 36002	90+800	23	30	315
Kütahya-Demirciören	9,93	368	2547	129	DE 36005	21+000	23	27	320
Piribeyler-Gazellidere	13,97	246	1751	129	DE 36021	188+200	23	26	310
Tavşanlı-Güzelyurt	14,18	294	1703	129	DE 36020	46+100	23	26	300
Tınaztepe-Kocatepe	18,90	292	1399	129	DE 36005	32+950	23	28	300
Oturak-Dumlupınar	25,09	286	1070	129	DE 36001	350+100	23	24	280
Kaklık-Bozkurt	19,95	400	1416	129	DE 36011	287+650	23	27	304
Güzelyurt-Köprüören	14,41	288	1383	88	E 68041	40+200	31	33	240
Kayı-Güzelyurt	14,17	294	1383	88	E 68041	47+600	31	43	240
Dinar-Karakuyu	20,04	300	1300	129	DE 36011	381+900	23	30	278
İhsaniye-Döğür	12,97	296	2024	129	DE 36003	119+200	23	27	309

Her bir hat kesimi için deney verilerinden yola çıkılarak kurb ve eğim dirençleri ile bunların toplamından ibaret olan eşdeğer direnç değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca ivmelenme ve lokomotif seyir dirençleri de hesaplanarak eklenmiştir. Bu direnç değerleri için birer formül üzerinden

hesaplama gerçekleştirilmiştir. Kurp direnci formülü olarak kullanılan Denklem 27’de R_c kurb direnci (kp/t) ve R kurp yarıçapıdır (m) [12].

$$R_c = \frac{800}{R} \quad (27)$$

Eğim direnci formülü olarak kullanılan Denklem 28’de R_g eğim direnci (kp/t) ve i eğim değeridir (1000 metrede yükseklik (m)) [12].

$$R_g = i \quad (28)$$

İvmelenme direnci formülü olarak, Denklem 29 kullanılmıştır. Burada, R_a N/t, V km/h ve t saniye cinsindedir.

$$R_a = \frac{1000 V_2 - V_1}{3,6 t} \quad (29)$$

Lokomotif seyir direnci değerleri ise Denklem 30 yardımıyla hesaplanmıştır. Burada, R_L lokomotif seyir direnci (kp/t) G_L lokomotif kütlesi (t), n aks sayısı, A ön yüzey alanı (m²) –10 alınmıştır- ve V km/h cinsinden hızdır [12].

$$R_L = 0,65. G_L + 13,15. n + 0,00932. G_L. V + 0,004526. A. V^2 \quad (30)$$

Türkiye şartlarına uygun formülü ortaya çıkarılmak istenen vagon seyir dirençleri ise ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hat kesimlerinin her birine ait veri kullanılarak giriş bölümünde sunulan formüllerle hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Her bir hat kesiminde denklem 27 ile 30 arasında verilen formüllerle hesaplanan direnç değerleri ile vagon seyir direnci formülleriyle hesaplanan direnç değerleri toplanmıştır. Tüm direnç türlerindeki birimler kN cinsine çevrilerek denklem 31’e göre toplam dirençler hesaplanmıştır.

$$R_T = R_c + R_g + R_a + R_L + R' \quad (31)$$

Yapılan hesaplamaların sonuçları ile deneylerde okunan, çekilen elektrik akımı değerleri karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen toplam direnç değerleri ile lokomotifin çektiği cer kuvveti değerleri arasındaki yüzde fark değerleri incelenerek en düşük sapmaya sahip formülü belirlemek, çalışmada uygun vagon seyir direnci formülünü seçmek için kullanılan yöntemdir.

4. Bulgular

Tablo 2’de her bir hat kesimi için 24 adet tren direnci formülüne göre toplam direnç değerleri yer almaktadır. Tablo 2’de belirtilen toplam direnç değerleri, Metot bölümünde belirtilen diğer dirençler ile belirtilen numaralı denklem yardımıyla hesaplanan vagon seyir direncinin toplamını ifade etmektedir.

Güzelyurt-Köprüören, Kayı-Güzelyurt, Dinar-Karakuyu ve İhsaniye-Döğler hatlarında gerçekleştirilen deneylerin verileriyle de hesaplama yapılmıştır. Ancak bu hat kesimlerinde cer kuvveti değeri ile kullanılan denklemler yardımıyla hesaplanan toplam direnç değerleri arasındaki farkların ortalamaları % 13 ila 20 gibi yüksek değerlerde çıkmıştır. Bu sebeple bu hat kesimleri için elde edilen sonuçlar, sunulmamıştır.

Tablo 2. Çeşitli tren direnci formüllerine göre hat kesimlerinde toplam dirençler (kN)

Denklem	Banaz- Nohutova	Ekinova- Karakuyu	Kütahya- Demirciören	Piribeyler- Gazellidere	Tavşanlı- Güzelyurt	Tınaztepe- Kocatepe	Oturak- Dumlupınar	Kaklık- Bozkurt
3	334,37	310,09	334,98	319,20	300,20	320,03	307,89	325,60
4	330,88	308,40	328,52	314,26	296,15	317,35	305,81	323,26
5	337,72	314,89	348,69	329,12	309,27	326,69	310,07	331,64
6	346,31	326,28	363,71	339,02	318,90	335,30	315,62	340,00
7	337,84	315,44	349,11	329,32	309,47	326,99	310,09	331,88
8	334,66	312,04	344,01	325,82	306,06	324,20	307,95	329,04
9	337,46	315,00	342,11	324,03	304,78	323,93	309,77	329,29
10	334,17	311,28	343,08	325,23	305,49	323,65	307,65	328,53
11	336,60	312,75	337,84	321,33	302,32	322,10	309,57	327,64
12	350,72	333,09	371,97	344,28	324,02	340,18	318,36	344,59
13	336,73	317,34	349,17	328,73	308,90	327,54	308,96	331,91
14	353,70	333,94	375,42	347,12	326,78	341,70	320,63	346,51
15	338,43	315,61	349,80	329,89	310,02	327,30	310,55	332,26
16	332,23	310,29	340,64	323,33	303,63	322,49	306,20	327,17
17	345,25	326,13	362,48	338,06	317,98	334,97	314,86	339,48
18	334,06	311,22	342,95	325,13	305,39	323,59	307,56	328,46
19	336,07	313,58	346,29	327,38	307,58	325,45	308,90	330,31
20	344,56	322,20	349,01	328,43	309,38	328,23	314,57	333,99
21	325,47	301,35	328,77	315,51	296,03	315,69	301,84	320,57
22	324,93	300,56	327,50	314,83	295,39	315,20	301,63	320,09
23	341,97	319,80	355,70	333,87	313,89	330,60	312,89	335,54
24	337,15	314,56	347,92	328,54	308,70	326,32	309,65	331,22
25	347,76	328,73	366,54	340,78	320,61	337,01	316,49	341,57
26	347,98	328,09	366,47	340,89	320,72	336,82	316,72	341,53

Her bir hat kesimi için 24 adet vagon seyir direnci formülü kullanılarak hesaplanan toplam direnç değerlerinin deney sırasında belirlenen cer kuvveti değerlerinden sapmaları, Tablo 3’de yer almaktadır. Her bir vagon seyir direnci formülü için tüm hat kesimlerindeki sapma miktarlarının ortalaması alınmış ve Tablo 3’ün en sağ sütununda sunulmuştur. Çizelgede görüleceği üzere; sapma miktarı en düşük olan formül; Denklem 22’dir, onu sırasıyla Denklem 21 ve Denklem 4 takip etmektedir.

Tablo 3. Çeşitli tren direnci formüllerinin hat kesimlerinde sapma miktarları ile sapma ortalamaları

Denklem	Banaz-Nohutova	Ekinova-Karakuyu	Kütahya-Demirciören	Piribeyler-Gazellidere	Tavşanlı-Güzelyurt	Tınaztepe-Kocatepe	Oturak-Dumlupınar	Kaklık-Bozkurt	% Sapma Ortalaması
3	%1,94	%1,56	%4,68	%2,97	%0,07	%6,68	%9,96	%7,10	%4,37
4	%0,88	%2,10	%2,66	%1,37	%1,28	%5,78	%9,22	%6,34	%3,70
5	%2,96	%0,03	%8,96	%6,17	%3,09	%8,90	%10,74	%9,09	%6,24
6	%5,58	%3,58	%13,66	%9,36	%6,30	%11,77	%12,72	%11,84	%9,35
7	%3,00	%0,14	%9,10	%6,23	%3,16	%9,00	%10,75	%9,17	%6,32
8	%2,03	%0,94	%7,50	%5,10	%2,02	%8,07	%9,98	%8,24	%5,49
9	%2,88	%0,00	%6,91	%4,52	%1,59	%7,98	%10,63	%8,32	%5,35
10	%1,88	%1,18	%7,21	%4,91	%1,83	%7,88	%9,87	%8,07	%5,35
11	%2,62	%0,72	%5,57	%3,66	%0,77	%7,37	%10,56	%7,78	%4,88
12	%6,93	%5,74	%16,24	%11,06	%8,01	%13,39	%13,70	%13,35	%11,05
13	%2,66	%0,74	%9,12	%6,04	%2,97	%9,18	%10,34	%9,18	%6,28
14	%7,83	%6,01	%17,32	%11,97	%8,93	%13,90	%14,51	%13,98	%11,81
15	%3,18	%0,19	%9,31	%6,42	%3,34	%9,10	%10,91	%9,30	%6,47
16	%1,29	%1,50	%6,45	%4,30	%1,21	%7,50	%9,36	%7,62	%4,90
17	%5,26	%3,53	%13,27	%9,05	%5,99	%11,66	%12,45	%11,67	%9,11
18	%1,85	%1,20	%7,17	%4,88	%1,80	%7,86	%9,84	%8,04	%5,33
19	%2,46	%0,45	%8,22	%5,61	%2,53	%8,48	%10,32	%8,66	%5,84
20	%5,05	%2,28	%9,07	%5,94	%3,13	%9,41	%12,35	%9,86	%7,14
21	%0,77	%4,33	%2,74	%1,78	%1,32	%5,23	%7,80	%5,45	%3,68
22	%0,94	%4,58	%2,34	%1,56	%1,54	%5,07	%7,73	%5,29	%3,63
23	%4,26	%1,52	%11,16	%7,70	%4,63	%10,20	%11,75	%10,38	%7,70
24	%2,79	%0,14	%8,73	%5,98	%2,90	%8,77	%10,59	%8,95	%6,11
25	%6,02	%4,36	%14,54	%9,93	%6,87	%12,34	%13,03	%12,36	%9,93
26	%6,09	%4,16	%14,52	%9,97	%6,91	%12,27	%13,11	%12,35	%9,92

5. Sonuç

Tren direnci formülleri, demiryolu taşıtlarının enerji tüketimi verilerinin öngörülmesi, lokomotifin güç gereksiniminin ve çekiş kuvvetinin belirlenmesi ve seyir süresi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı ülkeler tarafından kullanılan çeşitli vagon seyir direnci formüllerine; Türkiye Cumhuriyeti demiryollarının farklı hatlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler uygulanmıştır. Her bir hat kesimi için tren dirençleri formülleri ile yapılan hesaplamalar neticesinde Denklem 22'nin demiryollarımızda yapılan deney verileri sonuçları ile sapma miktarının en az olduğu görülmüştür. Buradan hareketle Türkiye demiryollarına en uygun vagon seyir direnci formülünün, $R' = 5,138.m + 21,91.V + 6,21.V^2$ olduğu anlaşılmıştır.

Denklem 21’de verilen $R' = 5,17 + 0,010997.V + 0,00051.V^2$ formülü de oldukça yakın sonuçlar verdiği için yapılacak tren direnci hesaplamalarında kullanılabilir. Tren direnci hesaplamalarında önerilen formülün tercih edilmesi ile Türkiye demiryollarının enerji tüketimine ilişkin veriler daha yüksek doğrulukla öngörülecek, enerji tüketimini azaltmaya yönelik yapılacak çalışmalarda kullanılabilir. Böylece enerji verimliliği artırılabilecek, etkin kaynak kullanımına gidilmiş olacaktır. Yük trenlerinin direnç kuvveti daha yüksek doğrulukla hesaplanacağından hatlarda çalıştırılacak lokomotif seçimi daha etkin yapılabilecek, benzer şekilde demiryollarının parametrelerine uyumlu lokomotif tasarımı/üretiminde güç, çekiş kuvveti vd. parametreler belirlenirken faydalanılabilecektir. Önerilen formül, yük trenlerinin maksimum hızının belirlenmesinde kullanılabilir, yüksek hızlı yük taşımacılığı gerçekleştirmek amacıyla yapılacak çalışmalarda yararlanılabilecektir.

Bu çalışmada diğer ülkeler tarafından geliştirilen vagon seyir dirençlerinden Türkiye için en uygunu belirlenmiştir. Vagon seyir direncini belirlenmesi amacıyla uygulanan çekiş gücü yöntemi, dinamometre yöntemi veya salıverme yöntemi ile Türkiye’ye özgü bir ampirik eşitlik geliştirilmesi başka bir çalışma konusu olabilir.

Kaynakça

- [1] Eurostat, “Energy statistics - an overview - Statistics Explained,” 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption. [Accessed: 16-Sep-2020].
- [2] E. C. Schmidt, “Freight Train Resistance. Its Relation to Car Weight.,” *Vol. 43 Eng. Exp. Stn. Illinois Univ. Urbana, Illinois.*, 1910.
- [3] W. J. Davis, *The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars*. Schenectady, N.Y. General Electric, 1926.
- [4] *AREMA Manual for Railway Engineering, Economics of Railway Engineering and Operation, Train Performance*. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 1999.
- [5] P. Lukaszewicz, “Energy Consumption and Running Time for Trains,” Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- [6] S. Iwnicki, *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [7] A. Radosavljevic, “Measurement of train traction characteristics,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 220, no. 3, pp. 283–291, May 2006.
- [8] C. Newman, “5AT Advanced Steam Locomotive Project Locomotive and Train Resistance,” 2010. [Online]. Available: <http://5at.co.uk/index.php/definitions/terrms-and-definitions/resistance.html#Plots>. [Accessed: 17-Sep-2020].
- [9] B. P. Rochard and F. Schmid, “A review of methods to measure and calculate train resistances,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 214, no. 4, pp. 185–199, Jul. 2000.
- [10] F. Szanto, “Rolling Resistance Revisited,” in *CORE2016 Conference on Railway Excellence RTSA*, 2016.
- [11] C. Somaschini, D. Rocchi, G. Tomasini, and P. Schito, “Simplified Estimation of Train Resistance Parameters: Full Scale Experimental Tests and Analysis,” in *Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2016.
- [12] C. Urlu, *Demiryolu Araçlarının İleri Dinamiği*. Ankara: TCDD Yayınları, 1999.
- [13] M. K. Jain, “Train, grade, curve and Acceleration Resistance | RailElectrica,” 2013. [Online]. Available: <https://www.railelectrica.com/traction-mechanics/train-grade-curve-and-acceleration-resistance-2/>. [Accessed: 16-Sep-2020].

Özgeçmiş**Ömür AKBAYIR**

Lise eğitimini Demiryolu Meslek Lisesinde, Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde, Doktora eğitimini Gazi Üniversitesinde tamamlamıştır. 15 yıl TCDD'nin çeşitli işyerlerinde çeşitli görevlerde bulunmuş olup, 2015 yılından beri Eskişehir Teknik Üniversitesinde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: omurakbayir@eskisehir.edu.tr

**Beytullah BAŞEĞMEZ**

1994 Eskişehir doğumludur. Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2016 yılında mezun oldu. 2018'de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Otomotivin temel konularından güç aktarma organları ile ilgili yazmış olduğu kitap, 2018 yılında yayınlandı. 2019 yılından beri Uşak Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır

E-Posta: beytullah.basegmez@usak.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Ömür AKBAYIR deneysel verileri, tren direnci formüllerini toplamış ve sonuçları yorumlamıştır. Beytullah BAŞEĞMEZ verileri ve formülleri kullanarak hesaplamaları ve analizini gerçekleştirmiştir.