

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## **Mekanik Sistemlerde Rejeneratif Frenleme ile Elde Edilebilecek Enerji Miktarının Belirlenmesi ve Verimlilik Analizi**

Huriye BURKUCU<sup>1</sup>, Sena KABAVE KILINÇARSLAN<sup>2</sup>, Şeyma KORKMAZ<sup>1</sup>,  
Abdulkadir ORAK<sup>1</sup>, M. Hüseyin ÇETİN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, Karabük  
<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük  
(ORCID: 0000-0001-9480-1279) (ORCID: 0000-0001-7302-4554) (ORCID: 0000-0002-6871-980X)  
(ORCID: 0000-0001-6611-4535) (ORCID: 0000-0003-0429-5507)

---

### **Öz**

Bu çalışmada, raylı sistemler araçlarında faydalı frenleme olarak adlandırılan rejeneratif frenleme veriminin hesaplanması amaçlanmıştır. Bir raylı sistemler aracına frenleme sırasında etki eden zıt yönlü kuvvetler belirlenmiş ve gerekli analitik bağıntılar elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kent içi hafif raylı sistemler araç özellikleri dikkate alınarak araç ağırlığı ortalama 160 ton (140 kişi yolcuyla beraber) olarak belirlenmiştir. Aracın sahip olduğu toplam enerji, belirli bir hız aralığında (80 – 30 km/sa) incelenmiştir. Hareket halindeki araca etki eden aerodinamik sürtünme kaybı 80 – 30 km/sa hız aralığında 126 kW olarak belirlenmiştir. Ray-teker etkileşimi kaynaklı kayıplar ise 80 – 30 km/sa hız aralığında 43,6 kW olarak belirlenmiştir. Dişli çark mekanizmasında oluşan mekanik ve elektrik motoru kayıpları 10 kW olarak kabul edilmiştir. Belirlenen hız aralığında aracın sahip olduğu toplam kinetik enerji, toplam kayıp ve üretilen rejeneratif enerji miktarlarına eşitlenerek frenleme süresi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken elde edilen rejeneratif enerji %24,26 verimle 4.121,94 kJ olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rejeneratif Frenleme, Enerji Verimliliği, Mekanik Sistemler, Raylı Sistemler.

---

## **Determination of the Energy Amount Can be Obtained by Regenerative Braking in Mechanical Systems and Productivity Analysis**

### **Abstract**

In this study, it is aimed to calculate the regenerative braking efficiency, which is called useful braking in railway vehicles. The forces acting of a railway vehicle during braking have been determined and the necessary analytical relations have been obtained. In this study, the average weight of the vehicle is determined as 160 tons (together with 140 passengers) considering the vehicle characteristics of urban light rail systems. The total energy of the vehicle is examined at a speed ranges (80- 30 km/h). The aerodynamic drag loss affecting the vehicle is determined as 126 kW at a speed range of 80- 30 km/h. The losses due to rail-wheel friction are determined as 43.6 kW in the range of 80- 30 km/h. The mechanical losses in gear mechanism and electrical motor losses have been accepted as 10 kW. Breaking times are calculated by equalizing the total kinetic energy of the vehicle at the specified speed range with the total loss and the amount of regenerative energy produced. As a result of the calculations, the regenerative energy obtained from 80 km/h to 30 km/h is determined as 4,211.94 kJ with 24,26% efficiency.

**Keywords:** Regenerative Braking, Energy Efficiency, Mechanical Systems, Railway Systems.

---

### **1. Giriş**

Günümüz endüstrisinin hızla gelişmesi sonucu, enerjinin ekonomik bir şekilde elde edilmesi ve tasarruflu bir şekilde kullanılmasının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Dünya genelinde yıllık üretilen enerjinin %20'si, ulaştırma sektöründe tüketilmektedir [1]. Ulaştırma sistemlerinde kullanılan enerji türlerini, raylı sistemlerde kullanılan elektrik ve mineral esaslı yakıt enerjisi (dizel yakıt), karayolu ve

---

\*Sorumlu yazar: [hcecin@karabuk.edu.tr](mailto:hcecin@karabuk.edu.tr)  
Geliş Tarihi: 11/02/2020 Kabul Tarihi: 01/03/2020

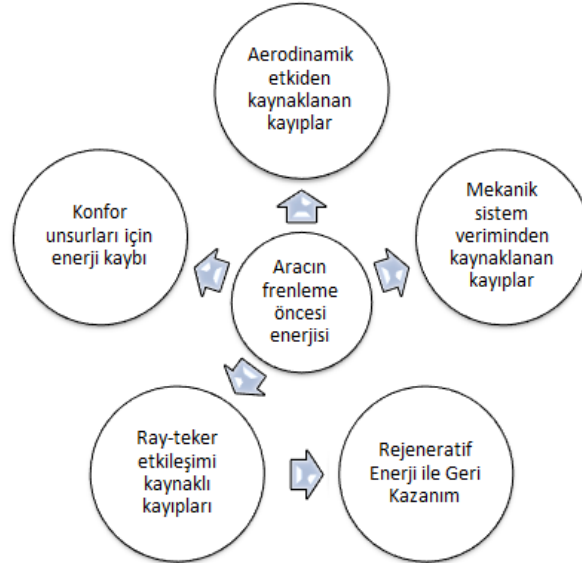
havacılıkta ise ağırlıklı olarak kullanılan mineral esaslı (benzin, dizel, LPG ve CNG) yakıt enerjisi oluşturmaktadır. Karayolu ulaşımında elektrik enerjisi kullanımı üzerine yoğun çalışmalar yapılıyor olsa da istatistikî olarak, mineral esaslı kaynak kullanımı ile kıyaslanabilir durumda değildir.

Elektrik enerjisi, enerji kaynakları açısından değerlendirildiğinde, en çevreci ve verimli enerji türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple ulaşım sektöründe elektrik enerjisi kullanımının sağlanması, daha temiz bir çevre ve daha ekonomik ulaşımı mümkün kılacaktır [2]. Günümüz raylı sistemler teknolojileri incelendiğinde elektrik enerjisine büyük oranda adaptasyonun sağlandığını (konvansiyonel ve hızlı tren hatları) gözlemlemek mümkündür. Bu durum çevreci ve ekonomik bir unsur olarak gözükmekle beraber tüketilecek enerji hacmi ve enerjinin temin edilebilirliği açısından tartışılır durumdadır. Raylı sistemler araçlarının büyük kütlelere sahip olmaları ve/veya yüksek hızlarda çalışmaları, yüksek miktarda elektrik enerjisi ihtiyacı doğurmaktadır.

2006 yılında Londra metrosunun, 1173 GWh enerji tüketimi ile Londra'nın en büyük enerji tüketicisi olduğu literatür kayıtlarında bulunmaktadır [3]. Bu örnek doğrultusunda, raylı sistemler sektöründe elektrik enerjisinin yalnızca temininin değil, verimli kullanımının da büyük önem taşıdığı sonucuna varılmaktadır. Günümüz üretim sektörlerinde enerjinin verimli kullanılmasını amaçlayan ısı yalıtımı, minimum yakıt tüketimi yaptırımları, enerji etiketlemesi gibi küresel ölçekli birçok uygulama bulunmaktadır. Raylı sistemler sektöründe ise enerji verimliliği çalışmaları incelendiğinde, akıllı sürüş teknolojileri ile enerji tasarrufu, rejeneratif frenleme ile enerjinin geri kazanımı amaçlanmakta ve bu doğrultuda adaptasyon çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle rejeneratif frenleme ile enerjinin geri kazanımı, kazanılabilecek enerji miktarının büyüklüğü açısından önem taşıyan bir uygulama olarak dikkat çekmektedir [4].

Rejeneratif frenleme, toplu ulaşım sistemlerinde sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahiptir. Rejeneratif enerji, araç frenlemeye geçtiği esnada üretilen ve üretim miktarı itibariyle önemli oranda enerjiden tasarruf sağlayan (%20 ile %25 arası) bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır [5–7]. Üretilen rejeneratif enerjinin verimliliği de raylı sistem aracının tasarım ve işletme koşullarına göre değişkenlik göstermektedir [6,8–10]. Rejeneratif enerji verimi teknik olarak frenleme sırasında araca etki eden zıt yönlü kuvvetlere bağlıdır. Araca etki eden zıt yönlü dirençler; aerodinamik etki, ray-teker sürtünmesi, mekanik verimsizlik unsurları (dişli, motor, kaplin verimleri) ve konfor öğeleri (klima, aydınlatma vb. araç üstü ekipmanları) olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1). Yapılan literatür taraması sonucu, araca etkileyen dirençlerin etkisi yüksekten düşüğe doğru; aerodinamik etki (≈ %40), ray-teker sürtünme etkisi (≈ %25), konfor öğeleri etkisi (≈ %20) ve verim kayıpları etkisi (≈ %15) şeklinde sıralanmaktadır [5,11]. Gonzalez- Gil vd. [12], kent içi raylı sistem araçlarında fren enerjisinin geri kazanımı ve yönetimi için enerji depolama ve rejeneratif frenleme teknolojilerini kapsayan uygulamaları kapsamlı şekilde incelemiştir. Literatür çalışmaları detaylı şekilde incelendiğinde rejeneratif frenleme teknolojisinin sistem güvenilirliği, enerji verimliliği ve emisyonların azaltılması açısından kent içi ulaşım için önemli bir uygulama olduğu sonucuna varılmıştır.

Rejeneratif enerji ray-teker etkileşimi sonucu (motor milinin dönüşüyle) ortaya çıkar. Enerjinin ortaya çıkabilmesi için, frenleme esnasında yuvarlanma direncine bağlı olarak azalan bir ivme ile hareketin sağlanması ve tren tekerleklerinin azalan bir açısız hızla dönme hareketini gerçekleştirilmesi gerekmektedir [13]. Dönme hareketi ile sağlanan mekanik enerji, tren tekerleklerinden aksa, akstan dişli kutusuna, dişli kutusundan kaplinler vasıtasıyla elektrik motoruna aktarılarak mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [14].



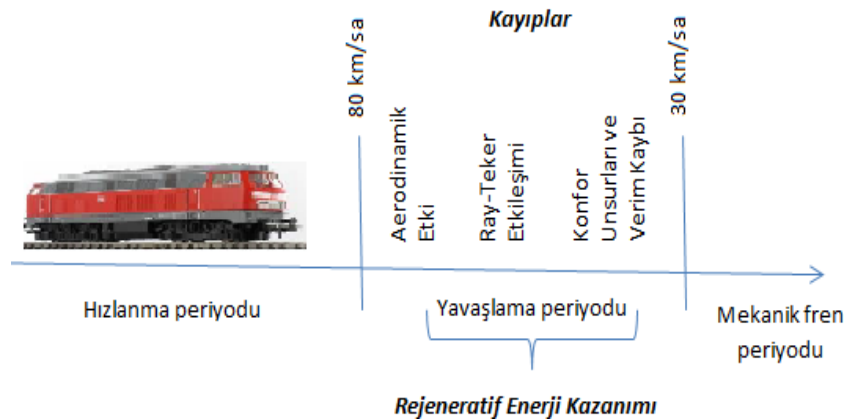
Şekil 1. Raylı sistem araçları için enerji balans diyagramı

Bu çalışmada, bir raylı sistemler aracına frenleme anında etki eden zıt yönlü kuvvetlerin hesaplamaları yapılmış ve rejeneratif frenleme uygulaması ile geri kazanılabilecek enerji miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Oluşturulan modelde, araç frenlemeye geçmeden önce sahip olduğu kinetik enerji miktarı belirlenmiş ve bu enerjiyle mekanik fren yapmadan ne kadar süre hareket edebileceği yani rejeneratif frenleme süresi hesaplanmıştır. Rejeneratif sürede cer motoruna tekerleklerden aktarılan net güç hesap edilmiş, toplam rejeneratif enerji miktarına ulaşılmıştır. Elde edilen enerjinin toplam frenleme enerjisine oranı hesaplanarak rejeneratif frenleme enerji verimliliği belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Raylı Sistemler Aracının Modellenmesi

Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda kent içi hafif raylı araç özellikleri dikkate alınmıştır. Araç ağırlığı ortalama 160 ton (140 kişi yolcuyla beraber) olarak belirlenmiştir. Kullanılan aracın teker çapı 680 mm'dir. Araç hızı 80 km/sa (22,2 m/s) değerine çıkacak şekilde modelleme yapılmıştır. Rejeneratif frenleme 30 km/sa (8,33 m/s) hız değerine düşene kadar verimli olarak gerçekleştirilebildiği için, aracın sahip olduğu toplam enerji 80 – 30 km/sa aralığında hesap edilmiştir [15]. 30 km/sa sonrası mekanik frenlemenin gerçekleştirildiği aşamadır. Aracın hızlanma, rejeneratif enerji kazanımı amacıyla yavaşlama ve mekanik frenleme periyotları için çizilen şematik Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Rejeneratif frenleme için hareket modeli

## 2.2. Aerodinamik Sürtünme Kayıpları

Aerodinamik kayıplar, havanın araç gövdesi üzerinde sürtünmesi sebebiyle oluşan kayıplardır. Parametre olarak; hava direnci faktörü ( $F_{hd}$ ), havanın yoğunluğu ( $\rho_{hava}$ ), hava direnç katsayısı ( $c_d$ ), araç kesit alanı ( $A_{kesit}$ ) ve araç hızı faktörlerinden ( $v_{araç}$ ) etkilenmektedir (Denklem 1). Denklem 1’de görüldüğü üzere hava direnç kuvveti üzerindeki en etkili parametre üstel olarak etki etmesi sebebiyle araç hızı faktörüdür. Hız arttıkça araç güç tüketimi parabolik olarak artmaktadır. Bu sebeple, enerji verimliliği açısından optimum hızların belirlenmesi önem taşımaktadır. Fakat hız faktörü, özellikle toplu taşıma araçlarında trafik akışının hızlı bir şekilde sağlanma gereği sebebiyle minimize edilebilecek bir parametre değildir. Hava direnç faktörünün minimizasyonu için etkin parametreler, hava direnç katsayısı ve araç kesit alanı faktörüdür [16].

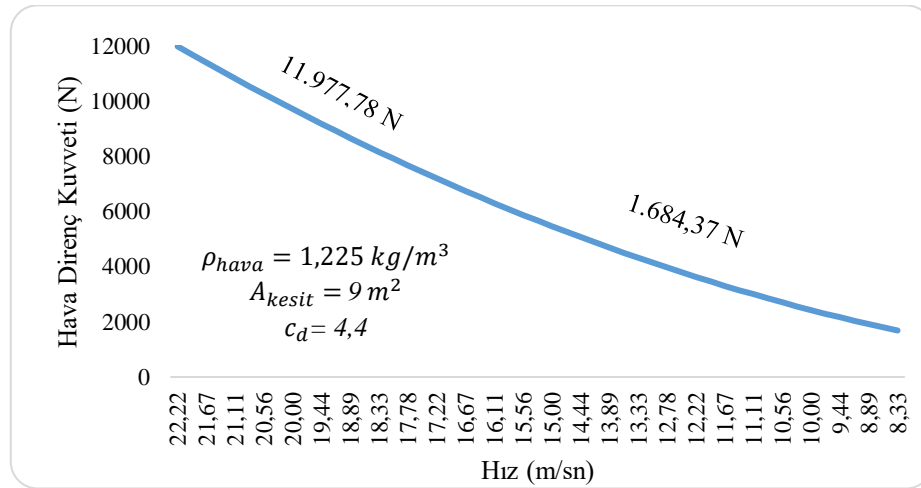
$$F_{hd} = 0,5 \cdot \rho_{hava} \cdot A_{kesit} \cdot c_d \cdot v_{araç}^2 \quad (1)$$

Çalışma kapsamında dikkate alınan metro aracının hava direnç hesabı için belirlenen faktörlere ait sayısal değerler Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de belirtilen sayısal değerler Denklem 1’de yerine yazılarak hesaplanan hava direnci değerinin hıza göre değişimini gösteren grafik Şekil 3’te verilmiştir.

**Tablo 1.** Aerodinamik direnç kuvveti parametreleri

Parametre	Sayısal Değer
$\rho_{hava}$	1,225 kg/m <sup>3</sup>
$A_{kesit}$	9 m <sup>2</sup>
$c_d$	4,4
$v$	80-30 km/sa

Hesaplanan hava direnci kuvveti değerleri araç hızı değerleri ile çarpılarak, hava direnci sebebiyle tüketilen toplam güç miktarı hesap edilmiştir (Tablo 2). Modelde kullanılan aracın 80 km/sa hızı ile anlık hava direncine harcadığı güç miktarı 266,18 kW, 30 km/sa hızı ile harcadığı anlık güç miktarı ise 14,04 kW olarak hesaplanmıştır. Hava direnci kaynaklı tüketilen güç miktarı hıza bağlı olarak parabolik olarak azalmaktadır. Matematiksel olarak güç-hız parabolik eğrisinin altında kalan alan, tüketilen enerji miktarını göstermektedir. Yapılan hesaplamalar sonucu, güç-hız eğrisinin doğrusal kabul edilerek işlem yapılmasının kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olacağı belirlenmiştir.



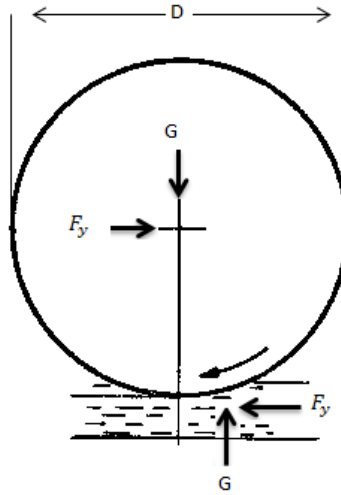
**Şekil 3.** Hava direnci kuvvetinin hıza bağlı değişim grafiği

**Tablo 2.** Aerodinamik etki sebebiyle tüketilen toplam güç miktarı

Hız (m/s)	Hava direnç kuvveti ( $F_{hd}$ , N)	Güç (kW)	Zamana bağlı toplam enerji tüketimi
22,2	11.977,78	266,18	126.t
8,33	1.684,37	14,04	

### 2.3.Ray-Teker Sürtünmesi Kaynaklı Kayıplar

Dairesel hareket yapan sistemlerde sürtünme davranışı yuvarlanma direnci ile ifade edilir. Bir yüzeyde yuvarlanan bir cismin hareketine direnen kuvvete yuvarlanma direnci denir. Demiryolu araçlarında tekerlek ile ray arasında ve aks yatağında yuvarlanma direnci sebebiyle enerji kaybı meydana gelir. Yuvarlanma direnci ( $F_y$ ), dingil yükünün ( $G$ ) ve araç/tren uzunluğunun artması ile lineer olarak artmaktadır [17] (Şekil 4).



**Şekil 4.** Raylı sistemler araç tekerleği üzerinde yuvarlanma direncinin gösterimi [17]

Yuvarlanma direnci ( $F_{yd}$ ), Newton bağıntısından (Denklem 2) yararlanarak hesaplanmıştır. Bağıntıda yuvarlanma direnci ( $F_{yd}$ ); aracın kütlesine ( $m$ ), yerçekimi ivmesine ( $g$ ) ve yuvarlanma direnç katsayısına ( $c_w$ ) bağlı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada oluşturulan modelde kullanılan araca ait yuvarlanma direnci hesap parametreleri Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de belirtilen sayısal değerler Denklem 2’de yerine yazılarak yuvarlanma direncinin hıza bağlı değişim değerleri (Tablo 4) elde edilmiştir. Yuvarlanma direncinin bugüne kadar raylı sistem araçları için hesaplanmamış olması göz önüne alınarak yuvarlanma direnci katsayısı ( $c_w$ ) teker-beton zemin yüzey sürtünmesi değerine göre hesaplanmıştır. Aracın frenleme esnasında yuvarlanma direnci sebebiyle kaybettiği toplam enerji; kuvvet-hız eğrisinin altında kalan alan dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$F_{yd} = m \times g \times c_w \quad (2)$$

**Tablo 3.** Yuvarlanma direnç kuvveti parametreleri

Parametre	Sayısal Değer
Hız	80-30km/sa
Aracın kütlesi	160.000 kg
Yerçekimi ivmesi	9,81 kg/m <sup>3</sup>
Yuvarlanma direnci katsayısı	0,004

**Tablo 4.** Yuvarlanma direnci ile tüketilen toplam güç miktarı

Hız (m/s)	Yuvarlanma direnç kuvveti ( $F_{yd}$ , N)	Güç (kW)	Zamana bağlı toplam enerji tüketimi
22,2	6278,4	139,52	43,6.t
8,33	6278,4	52,32	

#### 2.4. Konfor Unsurları ve Motor Verimi Kaynaklı Kayıplar

Raylı sistemler araçlarında yüksek güç ve verime sahip motorlar kullanılmaktadır. Aracın üzerinde kullanılan cer motorundan kaynaklı kayıplar hesaplamalara dâhil edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, motor kayıpları %10 olarak kabul edilmiş ve hesaplamalar bu kabule göre yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Modelde belirtilen raylı sistemler aracına etkiyen negatif kuvvetler nedeniyle oluşan kayıplar, belirlenen hız aralığında zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kayıplar Tablo 5’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Araca etki eden zıt yönlü kuvvetlere bağlı olarak tüketilen toplam güç miktarı

Enerji Kaybı Unsuru	Enerji Miktarı (kW.zaman)
Aerodinamik sürtünme kaybı ( $E_{hd}$ )	126. t
Ray-teker etkileşimi kaynaklı kayıplar ( $E_{yd}$ )	43,6. t
Konfor unsurları ve motor verimliliği kayıpları ( $E_{kd}$ )	10. t

Enerji yoktan var, vardan yok edilemez prensibi doğrultusunda aracın 80 km/sa hızdan 30km/sa hıza frenleme esnasında sahip olduğu toplam kinetik enerjisinin, toplam kayıp ve üretilen rejeneratif enerji miktarına ( $E_{rej}$ ) eşit olması gerekmektedir. Raylı sistemler araçlarında frenleme esnasında 30km/sa hızından daha düşük hızlarda mekanik (disk) fren gerçekleşeceği göz önüne alınarak, hesaplamalar 80 km/sa ile 30 km/sa aralığında yapılmıştır. Denklem 3 yardımı ile aracın belirlenen hız değeri arasındaki frenleme süresi hesaplanmıştır [18,19].

$$E_{k(80-30)} = E_{hd} + E_{yd} + E_{kd} \quad (3)$$

$$0,5. m. (22,222 - 8,332)^2 = 126. t + 43,6. t + 10. t$$

$$16.975,30 = 179,6.t (kW)$$

$$t_{80-30} = 94,51 \text{ s olarak hesaplanır.}$$

Raylı sistem araçlarında motorun jeneratör davranışı sonucu üretilen rejeneratif enerji miktarı, araç tekerleğinin dönüş miktarına bağlıdır. Elde edilen toplam rejeneratif enerji miktarı, zaman parametresine bağlı olarak tekerin dönme miktarı ile Denklem 4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$E_{rej.(80-30)} = 43,6. t \text{ (kW)} \quad (4)$$

$$E_{rej.} = 4.121,94 \text{ kJ}$$

Denklem 4 ile hesaplanan değer, aracın 80 km/sa hızından 30 km/sa hızına kadar yavaşlama süresince elde ettiği rejeneratif enerji miktarıdır. Aracın 80 km/sa ile 30 km/sa aralığında harcadığı toplam kinetik enerji miktarı Denklem 5'te hesaplanmıştır.

$$E_{k(80-30)} = 0,5. m. (22,222 - 8,332 \text{ km/sa})^2 \quad (5)$$

$$E_{k(80-30)} = 16.975,31 \text{ kJ}$$

Hesaplanan toplam kinetik enerji miktarının elde edilen rejeneratif enerji miktarına oranı verimi vermektedir.

$$\eta_{rej.} = E_{k(80-30)} / E_{rej.} = (4.121,94 / 16.975,31) * 100$$

$$\eta_{rej.} \cong \% 24,26$$

#### 4. Değerlendirme Ve Sonuç

Rejeneratif frenleme, yavaşlamakta olan bir raylı sistemler aracının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen bir frenleme sistemidir [20]. Bu çalışmada, bir kent içi hafif raylı sistemler aracının gerçek çalışma koşulları altında sahip olduğu kinetik enerjisinin modeli oluşturulmuştur. Belirli parametrelere bağlı olarak aracın sahip olduğu toplam kinetik enerji ve rejeneratif frenleme sonrası elde edilen enerji miktarı tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilen şekilde özetlenmiştir.

- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken hava direnci için harcadığı enerji miktarı 94 sn'de 11908 kJ'dur.
- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken yuvarlanma direnci için harcadığı enerji miktarı 94 sn'de 4120 kJ'dur.
- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken konfor unsurları ve mekanik kayıplar için harcadığı enerji miktarı 94 sn'de 951,4 kJ'dur.
- Araç 80 km/sa hızdan 30 km/sa hıza düşerken elde edilen rejeneratif enerji verimi % 24,26' dır. Raylı sistemler araçlarında hız faktörünün önemli olması sebebiyle 80 km/sa değerinin altında verimlilik analizi yapılmamıştır.
- Elde edilen verim değerleri mekanik sistemler açısından anlamlıdır ve enerji verimliliği açısından yeterli seviyededir.

#### 5. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

- Otomotiv sektörü ve demiryolu taşımacılığında kullanılan frenlerin servis ömrünün artırılması için fren malzemesi yüksek mukavemetli malzemelerle kaplanarak mekanik özellikleri incelenebilir.

- Yüksek mukavemetli malzemelerle kaplanmış frenlerin rejeneratif frenlemeye etkisi analiz edilebilir.

## Kaynaklar

1. Ceylan, H., Kardeşahin M, Haldenbilen, S. 2007. Gelişmiş ve Gelişmekte Olan Ülkelerde Ulaşım : Yenilenebilir Enerjiye Karşın Enerji Azal ( t )ımı, Ulaştırma Kongresi, 438–447.
2. Yoong M.K., Gan Y.H., Gan G.D., Leong C. K., Phuan Z. Y., Cheah B. K., Chew K. W. 2010. Studies of regenerative braking in electric vehicle, *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, IEEE, 20-21 November, 40–45.
3. Anonim, 2006. Environment Report. London Underground, Londra.
4. De La Torre S., Sánchez-Racero A.J., Aguado J.A., Reyes M., Martinez O. 2015. Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30: 1492–1500.
5. Kılıç, B., Tuna, S., Yağcıtekin, B., Temiz, M.S. 2011. DC Raylı Sistemlerde Frenleme Enerjisi Geri Kazanımı, Elektrikli Ulaşım Sistemleri, Eskişehir, Bursa.
6. Adinolfi A, Lamedica R, Modesto C, Prudenzi A., Vimercati S. 1998. Experimental Assessment of Energy Saving due to Trains Regenerative Braking in an Electrified Subway Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13: 1536–1542.
7. Goh S., Griffith M., Larbi K. 2010. Energy saving by using regenerating braking as normal train operation. *IET Conf. Railway Traction Syst*, 1–4.
8. Falvo M.C., Lamedica R., Bartoni R., Maranzano G. 2011. Energy management in metro-transit systems: An innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles. *Electric Power Systems Research*, 81: 2127–2138.
9. Foadelli F., Roscia M., Zaninelli D. 2006. Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-6.
10. Kim G., Lee H. 2009. A study on the application of ESS on SeoulMetro line 2. 2009 International Conference on Information and Multimedia Technology, ICIMT 2009, 38–42.
11. Açıkbay, S., Alataş, A., İstanbul Ulaşım A.Ş. 2006. Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş ve Frenleme Enerjisinin Geri Kazanılması, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi TÜRKİYE 10. ENERJİ KONGRESİ, İstanbul, 237–245.
12. González-Gil A., Palacin R., Batty P. 2013. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy, *Energy Conversion and Management*, 75: 374–388.
13. Lu S., Weston P., Hillmansen S., Gooi H.B., Roberts C. 2014. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15: 2506–2515.
14. Shimada M., Oishi R., Araki D., Nakamura Y. 2010. Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways, *Hitachi Review*, 59: 33–38.
15. Öztürk, M.M., Akbayır, Ö. 2018. Demiryolu Araçlarının Enerji Verimliliği.
16. Bacak, S., Gökoğlu, M., Tekir, M., Gedik, E. 2016. Yüksek Hızlı Bir Trenin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Aerodinamik Analizi, 3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'16), Karabük.
17. Akbayır, Ö., Çakır, F.H. 2017. Enerji Verimliliği İçin Tren Direnci Formüllerinin Karşılaştırılması, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 126: 112–126.
18. Şimşek, A.E. 2008. Elektrikli Raylı Sistemlerin İncelenmesi ve Kent İçi Raylı Ulaşım Sistemlerinde Enerji Kalitesi ve Geri Kazanımı. Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul.
19. Türk, O. 2017. Elektrikli Bir Taşıtta Rejeneratif Fren Sistemi Etkinliğinin Analizi. Gazi Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği, Lisans Tezi, Ankara.
20. Abdallah, T. 2017. *Sustainable Mass Transit: Challenges and Opportunities in Urban Public Transportation*, Elsevier, New York, USA,