

Döngüsel Atalet Kavramı ile Bir Demiryolu Aracının Etkin Kütle Değerinin Değerlendirilmesi

Niyazi Özgür BEZGİN*¹

*1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, , Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
34320, Avcılar, İstanbul*

**ozgur.bezgin@istanbul.edu.tr*

(Alınış / Received: 12.06.2018, Kabul / Accepted: 31.07.2018)

Özet: Bir demiryolu aracının hareketi ile birlikte aracın tekerlek setleri ve fren diskleri gibi unsurları döngüsel harekete geçerler. Belirli kütlelere sahip olan bu unsurların hareketlenmelerinde aşılması gereken iki ayrı hareketsizlik değeri bulunmaktadır. Doğrultulu ve döngüsel harekete bağlı olarak bu kütlelerin hareket halindeki kütle değerleri, durağan hallerindeki kütle değerlerinden farklı olmaktadır. Ortaya çıkan bu farklı kütle değerleri, etkin kütle değerleri ile ifade edilir. Etkin kütle değerinin bilinmesi ile aracı ivmелendirmek için gereken kuvvetin ve bu kuvvetin belirli hızlarda sağlanması için gereken güç değerinin hesaplanmasındaki hassasiyet artar. Kaynaklarda etkin kütle hesabının detaylarına çoğunlukla girilmemektedir. Bu çalışma içerisinde döngüsel hareket kavramı, kavramın fiziksel temellerinden başlayarak incelenecek ve örnek bir demiryolu aracı üzerindeki etkisi irdelenecektir.

Anahtar kelimeler: Kütle, Atalet, Hareketsizlik, Döngüsel atalet, Etkin tekerlek kütlesi, Etkin araç kütlesi, Boji.

Evaluation of the Effective Mass Value of a Railway Vehicle through the Concept of Rotational Inertia

Abstract: The wheel sets and brake disks of a railway vehicle initiate a rotational motion with the motion of a railway vehicle. There are two different types of inertias that these elements with certain masses need to overcome. Depending on translational and rotational motions, the masses of these elements during motion are different from their masses under stationary conditions. This different mass that arises is commonly referred to as the effective mass of these elements. Proper estimation of this value leads to a precise estimation of the force required to accelerate these masses and the power required to maintain forces at certain speeds. In many references on this important subject, the effective mass concept is typically dealt without a detailed assessment and an explicit procedure. In this study, the concept of rotational inertia will be studied through its physical foundations and its effect will be discussed through an exemplary railway vehicle.

Key words: Mass, Inertia, Rotational Inertia, Effective wheel mass, Effective vehicle mass, Bogie.

1. Giriş

Bir cismi harekete geçirebilmek için üzerine bir kuvvet uygulamak gerekir. Uygulanması gereken bu kuvvet, cismin “hareketsizlik istemi” (inertia, atalet) ile hızının zamana göre değişimi ile ilişkilidir ve bu iki değer ile doğru orantılıdır. Bir cismin hareketsizlik istemi veya hareketsizlik değeri, cisim üzerinde gerçekleştirilmeye çalışılan hareketinin niteliği ile ilişkilidir. Klasik mekanik sınırları içerisinde inceleyecek olursak bir cismin muhtemel üç ayrı hareketi vardır. Bunlar, cismin belirli doğrultular boyunca hareket ettiği “doğrultulu hareket (translational motion)”, cismin kendisine ait bir noktadan geçen eksen etrafında döndüğü “döngüsel hareket (rotational motion)” ve cismin bir doğrultuda hareket ederken kendisine ait bir eksen etrafında da döndüğü “yuvarlanma hareketi”dir (rolling motion)”. Doğrultulu hareket, sıklıkla “Kartezyen düzen (sistem)” içerisinde, x, y ve z-eksenleri boyunca tanımlanabilen bir harekettir. Döngüsel hareket ise kendisine ait bir noktadan geçen eksen etrafında dönen bir cismi bu noktaya birleştiren belirli bir uzunlukta olan doğru parçasının, eksen çevresinde kat ettiği açı değerlerinin belirtildiği “açısal düzen (sistem)” ile ifade edilebilir. Yuvarlanma hareketi ise her iki düzenin birlikte kullanımı ile tanımlanabilir. Doğrultulu hareket eden bir cismin hızı “çizgisel hız (v)” olarak anılırken döngüsel hareket eden bir cismin hızı ise “açısal hız (ω)” olarak anılır [1].

Doğrultulu hareket yapan bir cismin hareketsizlik değerinin bir diğer ismi cismin kütesidir (m). Döngüsel hareket yapan bir cismin eylemsizlik değeri ise döngüsel atalet veya döngüsel kütle olarak anılır. Belirli bir çizgisel hızda (v) doğrultulu hareket halinde olan bir cismin sahip olduğu enerji, cismin hareket enerjisi veya kinetik enerjisi (KE) olarak anılır ve Denklem 1 ile ifade edilir.

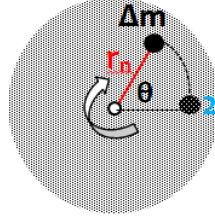
$$KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Şekil 1’de ise ağırlık merkezi, geometrik merkezi ile çakışan, eş-dağılımlı (homojen) bir yapıda olan bir tekerlek görülmektedir. Bu tekerlek geometrik merkezi etrafında saat yönünde dönmektedir. Toplam kütesi “m” olan bu tekerleğin “ Δm ” değerinde koyu siyah nokta ile ifade edilen küçük bir parçası bulunmaktadır. Bu parçanın tekerlek merkezine uzaklığı “ r_n ” uzunluğunda ve yatay eksen ile yaptığı açı θ olan bir doğru parçası ile tanımlanmaktadır. Döngüsel hareket esnasında Δm , bir süre sonra (Δt) “2” numaralı konumuna gelmektedir. Bu esnada Δm ’nin bir yay izi boyunca kat ettiği doğrultulu mesafenin uzunluğu Denklem 2 ile verilmektedir. Belirli bir süre içinde kat edilen bu mesafe sonucu ait olduğu tekerleğin döngüsel hareketi esnasında Δm ’nin sahip olduğu anlık doğrultulu hızı (v) ve tekerleğin açısal hızı (ω) arasındaki ilişki Denklem 3 ile belirtilmiştir.

$$s = \theta \cdot r_n \quad (2)$$

$$\frac{s}{\Delta t} = \frac{\theta}{\Delta t} \cdot r_n \rightarrow v = \omega \cdot r_n \quad (3)$$

Denklem 3’den çıkan sonuç, ω açısal hızına ve m kütesine sahip bir tekerleğin Δm değerinde kütleyle sahip parçasının çizgisel hızı, bu parçanın, tekerleğin kütle merkezine olan mesafesi r_n ile doğru orantılıdır.



Şekil 1. Ağırlık merkezi etrafından dönen ve kütlesi “m” olan bir tekerleğin Δm kütlesine sahip parçasının açısız hareketinin tasviri.

Sahip olduğu anlık çizgisel hızı ile Δm kütlelerinin kinetik enerjisi, bu kütlelerin çizgisel ve açısal hızlarına bağlı olarak Denklem 4 ile tanımlanmıştır [1].

$$KE_n = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot (\omega \cdot r_n)^2 = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot r_n^2 \cdot \omega^2 \quad (4)$$

Denklem 5’te yer alan ve Δm kütlesi ile bu kütlelerin ait olduğu tekerleğin etrafında döndüğü merkeze olan mesafesinin karesinin birlikte ifade edilmesi ile “döngüsel atalet veya döngüsel kütle” (I_n) kavramını elde ederiz. Bir diğer anlamı ile döngüsel hareket yapan bir kütlelerin döngüsel ataleti, etrafında döndüğü eksene uzaklığının karesiyle doğru orantılı olarak artar.

$$KE_n = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot r_n^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot I_n \cdot \omega^2 \quad (5)$$

Denklem 5 ile ifade edilen ve “m” kütlesine sahip bir tekerleği meydana getiren tüm “ Δm ” kütlesine sahip parçalarının kinetik enerji değerlerini toplarsak, Denklem 6 ile ifade edilen genel ifadeye kavuşuruz [1].

$$\sum_{n=1}^n KE_n = \sum_{n=1}^n \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot r_n^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (6)$$

Denklem 6’da, tekerleğin “I” ile ifade edilen döngüsel ataleti ile cismin kütlesi arasında önemli bir ilişki yer alır. Bu ilişki, Denklem 7’de sunulan ve “atalet yarıçapı” olarak anılan ve bir cismin kütlelerinin, etrafında döndüğü eksen çevresinde nasıl yayıldığını anlatan değerdir. Etrafında döndüğü eksene yakın olan bir kütleyle sahip olan cismin döngüsel harekete karşı göstereceği düşük direnci temsilen “r” değeri de düşük olacaktır. Ancak aynı kütleyle sahip fakat kütle merkezine daha uzak mesafede dağılım gösteren bir cismin “r” değeri ise daha büyük olacaktır.

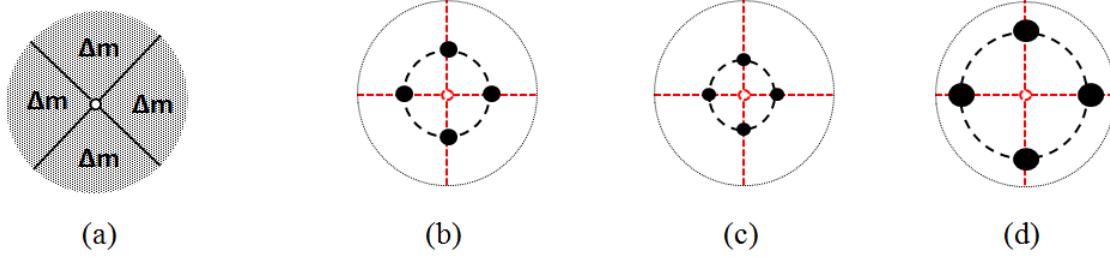
$$r = \sqrt{\frac{I}{m}} \quad (7)$$

Bu noktaya kadar açıklanan ve bir kütlelerin doğrultulu hareketi ve döngüsel hareketi ile ilişkili kinetik enerji kavramlarının ardından sıradaki bölüm, bir kütlelerin yuvarlanması sonucu sahip olduğu kinetik enerji kavramını irdelenecektir.

2. Yuvarlanma Hareketi ile Ortaya Çıkan Etkin Kütle

Bu bölümde, önceki bölümde yer alan “m” kütesine sahip tekerleğin, doğrultulu ve döngüsel hareketlerinden kaynaklı kinetik enerjilerinin toplam değeri üzerinden giderek bu tekerleğin etkin kütlesi (m_e) incelenecektir.

Şekil 2a’ da, “m” kütesine sahip ve “r” yarıçapında olan tekerlek, her biri “ $\Delta m=m/4$ ” kütesine sahip dört parça ile tasvir edilmektedir. Şekil 2b’de, Δm kütesine sahip siyah nokta ile tasvir edilen her bir parçanın kütle merkezinin, tekerlek merkezine “ $r/2$ ” mesafe yer aldığı bir tekerlek tasarımı tasvir edilmektedir. Şekil 2c’de her bir parçanın kütle merkezi, tekerlek merkezine “ $r/4$ ” mesafede, Şekil 2d’de ise her bir parçanın kütle merkezi, tekerlek merkezine “ $3r/4$ ” mesafededir.



Şekil 2. (a) $\Delta m=m/4$ kütesine sahip dört parça ile tasvir edilen tekerleği oluşturan kütlelerin tekerleğin ağırlık merkezine farklı mesafelerde olan halleri (b) $r/2$, (c) $r/4$, (d) $3r/4$

Bu tekerlek “v” doğrultulu hızı ile yatay ekseninde sağa doğru hareket ediyorsa, doğrusal hareketten kaynaklı kinetik enerjisi Denklem 1’de ifade edildiği gibidir. Bununla birlikte tekerleğin birim zamanda dönüş sayısı (n) Denklem 8 ile verilmektedir. Tekerleğin açısal hızı ise Denklem 9 ile verilmektedir.

$$n = \frac{v}{2\pi.r} \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi.n = \frac{v}{r} \quad (9)$$

Dört parça ile temsil edilen tekerleğin, Şekil 2b ile tasvir edilen durumunda, tekerleğin çizgisel hızı ile ifade edilen döngüsel kinetik enerjisi Denklem 10’da ifade edilmektedir.

$$\sum_{n=1}^4 KE_n = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot r_n^2 \cdot \omega^2 = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{4} \cdot \left(\frac{r}{2}\right)^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{8} \cdot m \cdot v^2 \quad (10)$$

Aynı tekerleğin Şekil 2c ve 2d’ de tasvir edilen durumlarında, tekerleğin çizgisel hızı ile ifade edilen döngüsel kinetik enerji değerleri ise sırasıyla Denklem 11 ve 12’de ifade edilmektedir.

$$\sum_{n=1}^4 KE_n = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot r_n^2 \cdot \omega^2 = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{4} \cdot \left(\frac{r}{4}\right)^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{32} \cdot m \cdot v^2 \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^4 KE_n = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot r_n^2 \cdot \omega^2 = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{4} \cdot \left(\frac{3r}{4}\right)^2 \cdot \omega^2 = \frac{9}{32} \cdot m \cdot v^2 \quad (12)$$

“v” doğrultulu hızı ile yatay ekseninde yuvarlanan tekerleğin döngüsel merkezi etrafında kütle dağılımı için tasvir edilen üç durum için ortaya çıkan toplam kinetik enerji değerleri (KE_T) sırasıyla Denklem 13, 14 ve 15’te verilmiştir.

$$KE_{T, \frac{r}{2}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{8} \cdot m \cdot v^2 = \frac{5}{8} \cdot m \cdot v^2 \quad (13)$$

$$KE_{T, \frac{r}{4}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{32} \cdot m \cdot v^2 = \frac{17}{32} \cdot m \cdot v^2 \quad (14)$$

$$KE_{T, \frac{3r}{4}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{9}{32} \cdot m \cdot v^2 = \frac{25}{32} \cdot m \cdot v^2 \quad (15)$$

Elde edilen bu toplam kinetik enerji değerlerine eşit değerde kinetik enerjiye sahip, “v” doğrultulu hızında “etkin tekerlek kütlesi (m_e)” sırasıyla Denklem 16, 17 ve 18’de verilmektedir.

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = \frac{5}{8} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow m_e = 1,25m \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = \frac{17}{32} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow m_e = 1,0625m \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = \frac{25}{32} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow m_e = 1,5625m \quad (18)$$

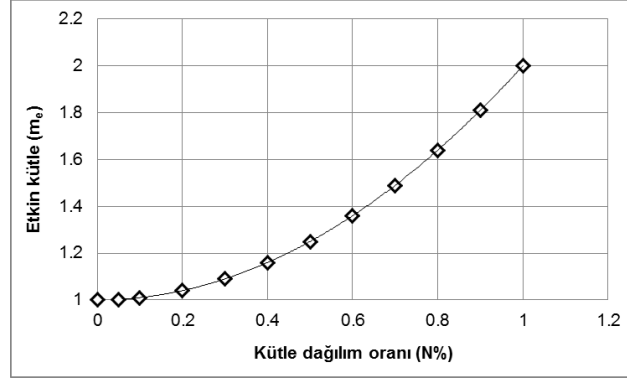
Buradan çıkan önemli bir sonuç, etkin kütle, tekerleğin kütle dağılımına bağlı olduğudur. Denklem 10, 11 ve 12’de yapılan çözümleri içeren bir genel denklem türetmek mümkündür. Tekerlek kütlelerinin tekerleğin döngüsel eksen etrafındaki dağılımını tekerleğin yarıçapı ile oranlayan bir değer olan “kütle dağılım oranı”, “N” ile ifade edilirse, tekerleğin toplam kinetik enerji değeri Denklem 19 ile ifade edilebilir.

$$KE_T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (N \cdot r)^2 \cdot \left(\frac{v}{r}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot (1+N^2) \quad (19)$$

Bu durumda etkin kütle değeri “ m_e ” Denklem 20 ile ifade edilir.

$$m_e = m \cdot (1+N^2) \quad (20)$$

Bu denkleme göre, tekerleğin tüm kütlesi tekerleğin merkezinde yoğunlaşacak olursa ($N=0$ durumu) tekerleğin etkin kütle değeri $m_e=m$ olur. Eğer tekerleğin tüm kütlesi tekerlek sınırları boyunca tekerlek çemberine yayılacak olursa ($N=100\%=1$ durumu) tekerleğin etkin kütle değeri $m_e=2m$ olur. Şekil 3’te tekerleğin etkin kütlelerinin (m_e), tekerleğin merkezi etrafında kütle dağılım oranı (N) ile değişimi görülmektedir. Bu durumda, hareket halinde bir aracın tekerleği, tekerlek kütlelerinin (m), tekerlek merkezi etrafındaki dağılımına bağlı olarak m ve 2m arasında bir değer alacaktır.



Şekil 3. Bir tekerlek kütesinin, tekerleğin yarıçapına oranla dağılımı ile etkin kütle değerinin değişimi.

Son olarak, tekerleğin hareket halinde etkin kütlesi (m_e) ile durağan halde kütlesi (m) arasındaki oran da Denklem 21’de, “etkin kütle katsayısı (p)” olarak ifade edilmektedir.

$$p = \frac{m_e}{m} = 1 + N^2 \quad (21)$$

3. Demiryolu Aracının Bileşenleri ve Demiryolu Aracının Etkin Kütlesi

Günümüzde demiryolu araçlarını dört bileşen ile tanımlamak mümkündür. Bu bölümler, demiryolu aracının kullanım niteliğine bağlı olarak gereken unsurları barındıran gövde yapısı ve bu gövdenin içindeki sabit aksam, bu gövdeyi taşıyan iskelet veya şasi, şasiyi taşıyan bojiler ve bojilerin içerisinde yer alan ve dingilleri aracılığıyla birleştirilmiş tekerleklerden oluşur [2]. Bu yapısal oluşum içerisinde tren hareketi ile birlikte dönmeye başlayan unsurlar ise tekerlekler, dingil çubukları ve muhtemel fren diskleridir. Tren kütleleri, birleşik halde gövde ve şasi kütlesi, boji kütlesi ve tekerlek setinin birleşik kütlesi olarak ifade edilmektedirler. Tekerlek seti içerisinde, tekerlekler, dingil çubuğu ve fren disk aksamı yer almaktadır. Ülkemizde yük vagonlarının ağırlıkları, vagonun gerektirdiği gövde unsurlarına ve uzunluklarına bağlı olarak 25 – 30 Ton arasında olabilmektedirler [3,4]. Yolcu vagonlarının ağırlıklarında değişkenlik daha az olup ortalama 45 Ton mertebesindedirler [3,4]. Boji kütleleri de, tekerlek setleri hariç içerdikleri aksam ve motorlara bağlı olarak 5 – 8 Ton mertebesinde olabilmektedirler [5, 6]. Yolcu trenlerinin dingil başına taşıdıkları yük değeri, dingilin motris nitelikte olup olmamasına da bağlı olarak 17-19 Ton/dingil arasında olabilmektedir. Yük trenlerinde ise bu değer Avrupa’da genelde 22.5 – 25 Ton/dingil düzeyinde, Amerika, Avustralya ve Rusya’da bazı maden hatlarında ise 36 Ton’a kadar nadiren de olsa çıkabilmektedirler [2, 7, 8].

Gövde kütlesi m_g , boji kütlesi m_b , tekerlek seti kütlesi m_t olan bir demiryolu aracının boji sayısı n_b ve tekerlek seti sayısı n_t ise bu aracın hareket halinde toplam etkin kütlesi “ M_e ” için Denklem 22 önerilebilir. Bu denklem içerisinde yer alan “ p ” katsayısı, demiryolu aracının hareketi ile birlikte döngüsel harekete geçen ve ağırlıklı olarak da tekerleklerden oluşan unsurları temsil eden etkin kütle katsayısıdır.

$$M_e = m_g + n_b \cdot m_b + n_t \cdot p \cdot m_t \quad (22)$$

Demiryolu aracının hareket halinde ve durağan haldeki kütlelerinin oranı “ P ” ile Denklem 23’te ifade edilmiştir.

$$P = \frac{M_e}{M} = \frac{m_g + n_b \cdot m_b + n_t \cdot p \cdot m_t}{m_g + n_b \cdot m_b + n_t \cdot m_t} = \frac{m_g + n_b \cdot m_b + n_t \cdot (1+p-1) \cdot m_t}{m_g + n_b \cdot m_b + n_t \cdot m_t} = 1 + \frac{n_t \cdot (p-1) \cdot m_t}{m_g + n_b \cdot m_b + n_t \cdot m_t} \quad (23)$$

Kaynaklarda P değeri için çoğunlukla % 4 mertebesine yakın bir kabul yapılmaktadır ve bu değer hesaplanması için açık bir yöntem de gösterilmemektedir [2, 7, 9, 10, 11]. Ancak bu değer sabit bir değer olmayıp araç kütesinin niteliğine göre değişim gösterebilmektedir. Sıradaki bölüm bu değişkenliği gösterecektir.

4. Bir Demiryolu Aracının Etkin Kütesinin Değerlendirilmesi için Örnek Çözümleme

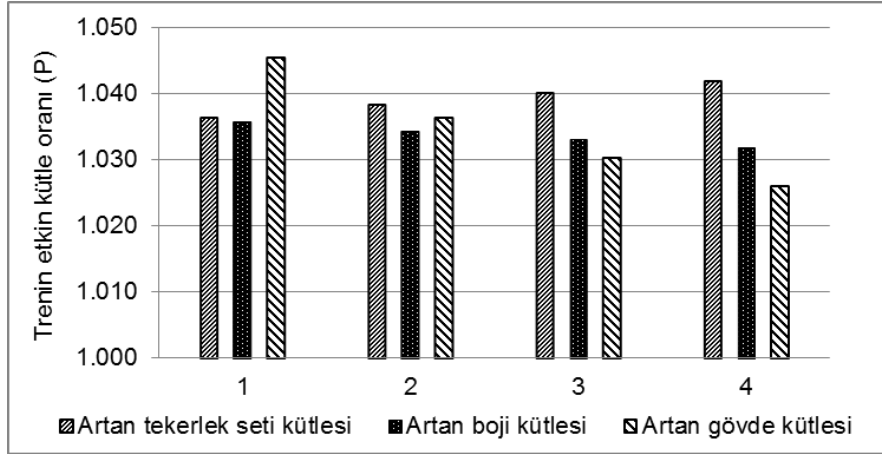
Bu bölümde bir demiryolu aracını oluşturan bileşenlerin kütlelerine bağlı olarak aracın etkin kütle değerinin değişimini vurgulamak amacıyla bir çözümleme yapılacaktır. Örnek olarak ele alınacak olan araç "Alfa Pendular" tipi bir yolcu trenidir ve bu trenin vagonu ele alınmaktadır [6]. Burada sunulan çözümlemede, araca ait vagonun kütesi $m_g=37000$ kg, boji kütesi $m_b=5000$ kg ve tekerlek seti kütesi ise $m_t=1800$ kg olarak kullanılmıştır. Her vagona iki boji ve her bojide iki dingil ve tekerlek seti yer almaktadır.

Tablo 1’de sunulan değerlendirmede teorik olarak etkin vagon kütesi (P) üzerine etkisi bulunan üç durum ele alınmıştır. Birinci durum, sabit gövde ve tekerlek set kütesi durumunda artan boji kütesinin etkisini incelemektedir. İkinci durum içerisinde, sabit gövde ve boji kütleleri durumunda artan tekerlek seti kütesinin etkisi incelemektedir. Üçüncü durumda ise sabit boji ve tekerlek seti kütleleri durumunda artan gövde kütesinin etkisi incelemektedir. Her durum içerisinde değişkene dair dört farklı değer etkisi irdelenmiştir. Tekerleğin etkin kütle sayısı $p=1.5$ olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Etkin Vagon Kütesi Üzerinde Etkisi İncelenen Durumlar ($p=1.5$ için).

1. Durum: Artan boji kütesi	2. Durum: Artan tekerlek seti	3. Durum: Artan gövde kütesi
n_b (adet) = 2	n_b (adet) = 2	n_b (adet) = 2
n_t (adet) = 2	n_t (adet) = 2	n_t (adet) = 2
m_g (kg) = 37000 37000 37000 37000	m_g (kg) = 37000 37000 37000 37000	m_g (kg) = 27000 37000 47000 57000
m_b (kg) = 5000 6000 7000 8000	m_b (kg) = 4500 4500 4500 4500	m_b (kg) = 4500 4500 4500 4500
m_t (kg) = 1800 1800 1800 1800	m_t (kg) = 1800 1900 2000 2100	m_t (kg) = 1800 1800 1800 1800
$p = 1.5$	$p = 1.5$	$p = 1.5$
M_e (kg) = 52400 54400 56400 58400	M_e (kg) = 51400 51700 52000 52300	M_e (kg) = 41400 51400 61400 71400
M (kg) = 50600 52600 54600 56600	M (kg) = 49600 49800 50000 50200	M (kg) = 39600 49600 59600 69600
P= 1.036 1.034 1.033 1.032	P= 1.036 1.038 1.040 1.042	P= 1.045 1.036 1.030 1.026

Şekil 4’te ise bu üç durum içerisinde incelenen değişimlere göre vagonun etkin kütle oranının değişimi gösterilmektedir. Etkin kütle oranı, demiryolu aracını oluşturan unsurların göreceli kütle oranlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Artan tekerlek kütesinin oranı, beklendiği gibi aracın etkin kütle oranını artırırken, artan gövde ve boji kütle değerleri, aracın etkin kütle oranını azaltmaktadır.



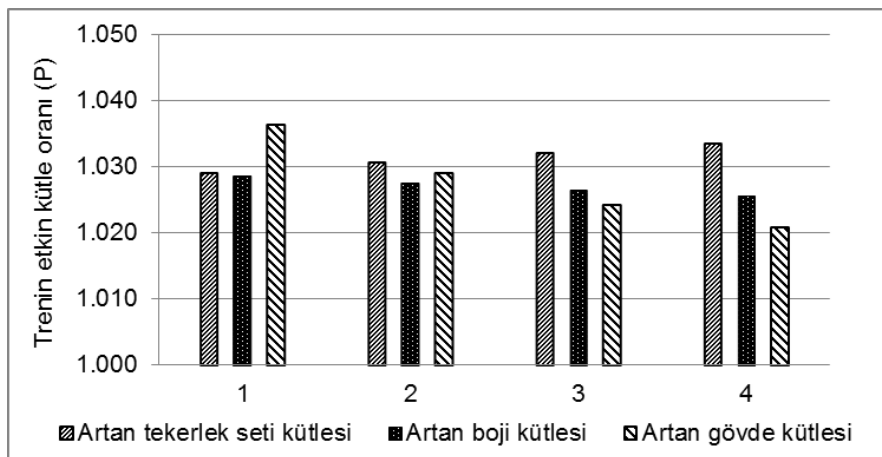
Şekil 4. Tekerlek etkin kütle değerinin $p=1.5$ olduğu bir demiryolu araç vagonun etkin kütle oranının, aracı oluşturan unsurların ağırlıklarının artışına bağlı olarak değişimi.

Benzer bir irdeleme farklı bir tekerlek tasarımına sahip olan bir demiryolu aracı için $p=1.4$ değeri kullanılarak yapılırsa, Tablo 2’de yer alan sonuçları elde edilir.

Tablo 2. Etkin Vagon Kütle Üzerinde Ekisi İncelenen Durumlar ($p=1.4$ için).

1. Durum: Artan boji kütlesi	2. Durum: Artan tekerlek seti kütlesi	3. Durum: Artan gövde kütlesi
n_b (adet) = 2	n_b (adet) = 2	n_b (adet) = 2
n_t (adet) = 2	n_t (adet) = 2	n_t (adet) = 2
m_g (kg) = 37000 37000 37000 37000	m_g (kg) = 37000 37000 37000 37000	m_g (kg) = 27000 37000 47000 57000
m_b (kg) = 5000 6000 7000 8000	m_b (kg) = 4500 4500 4500 4500	m_b (kg) = 4500 4500 4500 4500
m_t (kg) = 1800 1800 1800 1800	m_t (kg) = 1800 1900 2000 2100	m_t (kg) = 1800 1800 1800 1800
$p = 1.4$	$p = 1.4$	$p = 1.4$
M_e (kg) = 52040 54040 56040 58040	M_e (kg) = 51040 51320 51600 51880	M_e (kg) = 41040 51040 61040 71040
M (kg) = 50600 52600 54600 56600	M (kg) = 49600 49800 50000 50200	M (kg) = 39600 49600 59600 69600
$P = 1.028 1.027 1.026 1.025$	$P = 1.029 1.031 1.032 1.033$	$P = 1.036 1.029 1.024 1.021$

Şekil 4’te $p=1.5$ için sunulan değerlendirme aynı ölçekte Şekil 5’te $p=1.4$ için sunulursa, tekerleğin kütle dağılımı yapısının, aracın etkin kütlesi üzerine etkisi daha net anlaşılır.



Şekil 5. Tekerlek etkin kütle değerinin $p=1.4$ olduğu bir demiryolu araç vagonun etkin kütle oranının, aracı oluşturan unsurların ağırlıklarının artışına bağlı olarak değişimi.

6. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada, demiryolu mühendisliğinin önemli bir konusu olan demiryolu araçlarının etkin kütlesi konusu incelenmiştir. Kaynaklarda sıklıkla bir katsayı aralığında ifade edilen bu değer, ele alınan aracın niteliklerine göre değişebilmektedir. Demiryolu aracının tekerlek setleri, yüksek kütlelere sahiptirler. Hareket eden bir trenin tekerlekleri ve fren diski gibi aksamaları tren hareketine geçtiğinde, yatay olarak hareketlerine ek olarak dönmektedirler. Bu iki farklı hareket türü, iki farklı ataletin yenilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle yuvarlanmakta olan bir kütle için etkin değeri, bu kütle için durağan halinden daha fazla olmaktadır ve dönen kütle için etkin değeri, bu kütle için durağan halinden iki katı büyüklükte bir değere ulaşabilmektedir. Bununla birlikte, dönen parçaların tüm araç kütlesine oranına bağlı olarak etkin araç kütlesi çok daha düşük bir değerde olmaktadır. Burada sunulan çalışmada, $p=1.5$ durumunda, artan gövde kütlesi ile araç etkin kütle değerinin $P=1.026$ değerine düştüğü gözlenirken, göreceli olarak hafif bir gövde altında yer alan tekerleklerin kütleleri arttıkça etkin kütle değerinin $P=1.045$ değerine kadar yükseldiği de tespit edilmiştir. Treni ivmelendirmek için gereken kuvvetin kütle ile orantılı olduğu düşünülürse, uygulanması gereken kuvvetin de doğrudan P katsayısı ile orantılı olarak artacağı görülebilir. Aynı koşullar altında fakat $p=1.4$ durumunda ise etkin kütle değerinin artan araç gövde kütlesi ile $P=1.021$ değerine düştüğü ve azalan araç gövde kütlesi ile $P=1.036$ 'ya yükseldiği görülmektedir.

Etkin kütle değerinin ihmal veya yanlış değerlendirilmesi, demiryolu araçlarının seyir dinamiği eğrilerinde ve hız-zaman eğrilerinde hatalara yol açacaktır. Bununla birlikte, tekerlek kesitinde yapılacak tasarım çalışmaları ile dingil eksenine yaklaşan nitelikte bir tekerlek ağırlık dağılımının da etkin kütle değerini düşürdüğü görülmüştür.

Ancak bu çalışma ile vurgulanmak istenen önemli bir husus, etkin kütle değerinin ezber ile karşılanabilecek bir değer olmadığı ve gerek tekerlek tasarımında gerekse demiryollarında hareket için gereken enerjinin değerlendirilmesinde rol alan ve dikkatle hesaplanmayı hak eden bir değer olduğudur.

Kaynakça

- [1] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fundamentals of Physics. 4th Edition, John Wiley and Sons, 1994.
- [2] Lichtberger, L. Track Compendium. Eurail Press. 2011.
- [3] www.tuvasas.com.tr. 12 Haziran 2018.
- [4] www.tudemsas.com.tr. 12 Haziran 2018.
- [5] Lee, J., Han, S. Knowledge-based configuration design of a train bogie. Journal of Mechanical Science and Technology 24 (12) (2010) 2503~2510
- [6] Paixao, A., Fortunato, E., Calçada, R. The effect of differential settlements on the dynamic response of the train-track system: A numerical study. Engineering Structures, 88, s.216-224. 2015.
- [7] Esveld, C. Modern Railway Track. MRT-Productions.2001.
- [8] Bracciali, A. Railway Wheelsets: History, Research and Developments. International Journal of Railway Technology Volume 5, Issue 1, Pages 23-52, 2016.
- [9] Bosquet, R., Vandanjon P.O., Coiret, A., Lorino, T. Model of High Speed Train Energy Consumption. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Energy and Power Engineering, Vol:7, No:6, 2013.
- [10] Seçkin, İ. Toprak İşler ve Demiryolu. Çağlayan Kitabevi. 1. Baskı. 2003.
- [11] Evren, G., Dünder, S. Demiryolu. Birsen Yayınevi. 3. Baskı. 2016.

Özgeçmiş



Doç. Dr. Niyazi Özgür BEZGİN

Dr. Niyazi Özgür Bezin 16 Nisan 1977 yılında Ankara’da doğmuştur. 1994 senesinde Ankara Atatürk Anadolu Lisesi’nden mezuniyetinin ardından Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği’nde başladığı mühendislik eğitimine, 1999 senesinde New York’ta bulunan Polytechnic University, Brooklyn İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde devam ederek 2001 yılında şeref derecesiyle mezun olmuştur. Yapı ve zemin mekaniği konularında, Rutgers, the State University of New Jersey inşaat Mühendisliği Bölümü’nde 2002’de ve 2005’de tamamladığı Yüksek Lisans ve Doktora çalışmalarının ardından 2005-2007 yılları arasında New York’ta bulunan Langan Engineering and Environmental Services isimli firmada Tasarım Mühendisi olarak çalışarak 2007 senesinde Türkiye’ye dönmüştür. 2007 yılında Araştırma ve Geliştirme Sorumlusu olarak çalıştığı Yapı Merkezi Prefabrikasyon AŞ’den 2012 yılının sonunda ayrılarak 2013 senesinde İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde ulaştırma yapıları üzerine araştırmalar yapmak üzere Öğretim Üyesi olarak akademik çalışmalarına başlamıştır ve 2017 senesinde Doçent unvanını kazanmıştır. Dr. Bezin, ayrıca 2010 senesinden beri Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Bahar dönemlerinde “CE 48D: Prefabrication in Structural Engineering” isimli seçmeli dersini sunmaktadır.