



Yatar Gövdeli Tren Setlerinin Bilecik - Bozüyük Arasında Uygulamasının Yolcu Konforu ve Seyahat Süresi Üzerine Etkisinin Matematiksel Olarak İspatı

Beytullah BAŞEĞMEZ

Ataşehir Adıgüzel Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, İstanbul, Türkiye

beytullahbasegmez@adiguzel.edu.tr

(Alınış/Received: 22.03.2024, Kabul/Accepted: 20.05.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Demiryolu yolcu taşımacılığında seyahat süresinin kısaltılması önemli bir hedeftir. Yatar gövdeli tren, pasif veya aktif eğilme mekanizmalarını kullanarak hattaki kurpları konvansiyonel trenler için belirlenen sınırlardan daha yüksek hızlarda geçebilen trenleri ifade eder. Aktif eğilmeli teknolojide araç gövdesinin eğilmesi, sensörleri vd. çeşitli elektronik ekipmanı da içerir ve genellikle hidrolik veya elektrikli bir aktüatörün kontrolüne dayanır. Bu çalışmada dünya üzerinde pek çok ülkede uygulaması bulunan yatar gövdeli tren teknolojisinin Türkiye’de de uygulamasına yönelik mevcut demiryolu hattının Bilecik il sınırları içerisindeki kesimine ait veriler kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, seçilen hattaki kurp ve dever değerlerine göre; hatta konvansiyonel tren seti ve yatar gövdeli tren seti kullanılması durumunda müsavi işletme hızlarında yanıl kuvvet ve konfor katsayısı değerleri bulunmuş ve yatar gövdeli tren kullanılması durumunda gerçekleşecek iyileşme hesaplanmıştır. Hattın belirli kesimlerinde işletme hızının %5 ila %10 oranında artırılabilmesi sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, seçilen hat özelinde olup, farklı bir hatta yanıl kuvvetlerde daha yüksek oranlarda düşüş gözlenebileceği ve maksimum müsaade edilebilir hız değerlerinde daha yüksek yüzdelerde artış gerçekleştirilebileceği kanaati hasıl olmuştur. Yatar gövdeli tren teknolojisinin Türkiye’de uygulanması durumunda çalışma süresinin kısaltılması nedeniyle daha sık tren kalkışları, daha yüksek hizmet kalitesi ve daha iyi bir imaj sayesinde demiryolu yolculuğunun daha rekabetçi hale gelebileceği, böylece TCDD hedeflerine katkıda bulunulabileceği ve ulusal ekonomiye fayda yaratılabileceği tahmin edilmektedir. Son olarak, bu çalışmanın tesiriyle; Bilecik başta olmak üzere mevcut demiryolu hattındaki yolcu taşımacılığı hizmetinin yatar gövdeli trenlerle gerçekleştirilmeye başlatılmasına yol açacağı umut edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Kurp, Yatar gövdeli tren, Hız, Konfor

Mathematical Proof of the Effect of the Application of Tilting Train Sets Between Bilecik and Bozüyük on Passenger Comfort and Travel Time

Abstract: Reducing travel time in railway passenger transportation is an important goal. Tilting train refers to trains that can pass curves on the line at speeds higher than the limits set for conventional trains by using passive or active tilting mechanisms. In active tilting technology, the tilting of the vehicle body involves sensors, various electronic equipment and is usually based on the control of a hydraulic or electric actuator. Calculations were made using the data of the section of the existing railway line within the borders of Bilecik province for the application of the tilting body train technology, which is applied in many countries around the world, in Türkiye. In the study carried out within the scope of this article; according to the curve and cant values on the selected line; in fact, in case of using a conventional train set and a tilting body train set, lateral force and comfort coefficient values were found at equal operating speeds, and the improvement that would occur in case of using a tilting body train was presented as a result, it was concluded that the operating speed can be increased by 5% to 10% in certain sections of the line. These results are specific to the selected line, and it has been concluded that a higher rate of decrease in lateral forces can be observed on a different line and a higher percentage increase in maximum allowable speed values can be achieved. It is estimated that if tilting train technology is implemented in Türkiye, it can make railway travel more competitive thanks to higher service quality and a better image, more frequent train departures due to shorter working hours; thus contributing to TCDD's targets and creating benefits for the national economy. Finally, with the influence of this study; It is hoped that the passenger transportation service on the existing railway line, especially in Bilecik, will be started to be carried out by tilting trains.

Atıf için/Cite as: B. Başegmez, “Yatar gövdeli tren setlerinin Bilecik - Bozüyük arasında uygulamasının yolcu konforu ve seyahat süresi üzerine etkisinin matematiksel olarak ispatı,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 41-53, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1457013

Keywords: Railway, Curve, Tilting Train, Speed, Comfort

1. Giriş

Seyahat süresinin kısaltılması taşımacılık sektöründe her zaman önemli bir hedef olmuştur. Aliymanlardaki (düz hat) taşıt hızı, güvenlik nedenleriyle veya yakıt tüketimi verimliliği nedeniyle maksimuma çıkarılmış ve/veya sınırlandırılmıştır. Ancak hattaki yatay ve düşey kurplar zorluk teşkil etmekte ve taşıt hızı, seyahat süresi üzerinde negatif etki oluşturmaktadır [1]. Kurpları başarıyla geçmek için trenlerin genellikle kabul edilebilir bir hıza yavaşlaması gerekir. Yatar gövdeli tren, pasif veya aktif eğilme mekanizmalarını kullanarak kurpları konvansiyonel trenler için belirlenen sınırlardan daha yüksek hızlarda geçebilen trenleri ifade eder [2].

Yatar gövdeli demiryolu taşıt teknolojisi, demiryolu taşıt hızını artırmanın efektif yolları içerisinde öne çıkar [3]. Mevcut yapı üzerinde kısmi değişikliklerle işletilebilen yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının kullanılmasıyla hızın artırılması; hattın hızlı ve/ya yüksek hızlı demiryolu standartlarına uygun olacak şekilde, daha az kurpla ve kurpların mümkün merteye büyük yarıçaplı/developmanlı olacak şekilde altyapı ve üstyapısının yeniden inşa edilerek işletim hızının artırılması yoluna göre oldukça düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır [3-5].

Yatar gövdeli trenler, sahip olduğu eğilme teknolojisi sayesinde yatay kurplarda 8°'ye kadar eğilebilmesiyle seyahat süresini kısaltmaktadır [3]. Örnek olarak, İsveç ana hattında yer alan Stockholm-Gothenburg demiryolu hattında gerçekleştirilen çalışma süresi simülasyonları neticesinde, her ikisi de 275 km/h azami hıza sahip olan, yatar gövdeli yüksek hızlı yolcu treninin standart konvansiyonel gövdeli bir yüksek hızlı yolcu trenine göre çalışma süresi avantajının yaklaşık olarak %10 olduğu tespit edilmiştir [6].

Bu çalışma; Türkiye'de demiryolunun yolcu taşımacılığı içerisindeki payının artırılması ve TCDD tarafından konvansiyonel hatlardaki hizmetlerin geliştirilmesi hedeflerine binaen dünya üzerinde birçok hatta on yıllardır uygulama imkânı bulmuş yatar gövdeli demiryolu taşıt teknolojisinin Türkiye'de de uygulanabilirliğini ispat etmeyi amaçlamaktadır. Yatar gövdeli tren teknolojisi Türkiye'de konvansiyonel hatlara düşük yatırım maliyetleriyle kısa sürede uygulanabilir. Yapılan hesaplamalara göre sistemin Türkiye'de de uygulanması durumunda demiryolunun yolcu taşımacılığındaki hedeflerine katkıda bulunabileceği ve ulusal ekonomiye fayda yaratabileceği öngörülmüştür [3,7].

TCDD tarafından işletilmekte olan mevcut demiryolu hatlarının yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının kullanımına uygun demiryolu hatlarına dönüştürmek için bazı hususların dikkate alınması gereklidir. Mevcut hatta daha hızlı hizmet verileceği için hat bileşenlerinin durumu oldukça önemlidir [8]. Dikkate alınması gereken konular şu şekilde sıralanabilir:

- Pantograf-katener etkileşimi: Yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının pantografına konvansiyonel taşıtların elan kullanmakta olduğu katener hattı üzerinden enerji beslenir fakat yatar gövdeli tren setinin pantografındaki yatay yer değiştirme konvansiyonel hattakine göre çok daha fazladır, taşıt gövdesi eğildiğinde, pantograf kafası, pantografin normal çalışma aralığını oldukça aşan büyük bir yanıl yer değiştirme gerçekleştirir. Yatar gövdeli demiryolu taşıtı pantografında daha fazla dinamik kuvvet oluşacağı hususu göz önünde bulundurularak yatay yer değiştirmenin pantograf mukavemeti ve aşınması; ayrıca katener telleri bağlamında belirli sınırlar dahilinde tutulması elzemdir [9].
- Yatay karp: Demiryolu taşıtına etkiyen merkezkaç vd. kuvvetlerin taşıt, altyapı elemanları ve yolcu üzerindeki etkisi, kısa developmanlı yatay kurplardaki geniş yatay kurplara göre fazladır. Bu yüzden dar karp noktalarına dikkat edilmelidir [8]. Demiryolu hattının gerekli noktalarında yatay kurpların tasarımında farklılaşmaya gidilebilir.

- Geçiş Eğrisi: Aliymandan kurba geçişteki merkezkaç etkisini azaltmak için geçiş eğrisi kullanılmalıdır. Demiryolu hattı elemanlarına etkisi ve yolcu konforu açısından uzun geçiş eğrileri uygulanmalıdır. Geçiş eğrileri olmadan yapılan yatay kurplar yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının avantajını azaltmaktadır [10]. Geçiş eğrileri için genelde önerilen değer 30 m'dir [11].
- Yolcu konforu: Yol tutması yatar gövdeli demiryolu taşıtını kullanan yolcular için önemli problemlerden biridir. Yatay eğim açısı ve hız arttıkça yolcuların konfor seviyesi düşmektedir. Mevcut hatta daha yüksek hızlı demiryolu işletimi yolcuların konfor seviyesini düşürebileceğinden hat boyunca yatay eğim açılarının asgari düzeyde tutulacak şekilde demiryolu hattında iyileştirmelere gidilmesi yarar sağlayacaktır [12].
- Ayrıca hat üzerinde özel düzenlemeler gerektirmese de balast, ray ve ray bağlantılarına gerekli ihtimam, konvansiyonel hatlara nazaran daha fazla gösterilmelidir [10].
- Titreşim: Demiryolu araçlarından kaynaklı titreşimin, yolcu konforu, hat ve taşıt aksamının ömrü hususları çerçevesinde olumsuz etkisini önlemek için titreşim belirli sınırlar içinde tutulmalıdır [3].

Yatar gövdeli tren teknolojisinin kullanımı, Deutsche Bahn'ın 1972 yılında, 624 serisinin 634 serisi olarak adlandırılan versiyonunun, ticari hizmette (aktif) yatar gövdeli ilk tren olarak Köln-Saarbrücken hattında hizmete sunulmasıyla başlamıştır. Yine 70'li yıllarda İtalya'da Pendolino hızlı tren setleri geliştirilmiş ve kullanıma başlamıştır. 1980'lerin başlarında, Birleşik Krallık'ta da yatar gövdeli tren geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuşsa da yaygınlık kazanamamıştır. Aktif olarak eğilmeli trenler için çığır açan gelişme, İtalya'da ETR450 ve İsveç'te X2000 gibi büyük seri ticari trenlerin piyasaya sürülmesiyle 1990 civarında gerçekleşti. Japonya'da 2007 yılında Shinkansen Serisi N700, hizmete giren ilk çok yüksek hızlı yatar gövdeli tren olmuştur [6]. Alstom, çeşitli iyileştirmeler yaptıktan sonra 2006 yılında geliştirilmiş aksamı ile önceki versiyonlara göre daha güvenilir yeni nesil Pendolino tren setlerini özellikle İsviçre Federal Demiryollarında (SBB) kullanılmak üzere geliştirip piyasaya sürdü [13]. Tablo 1.'de Dünya'nın çeşitli yerlerinde geliştirilen ve işleme alınan yatar gövdeli trenlerin adları yer almaktadır.

Tablo 1. Çeşitli ülkelerde kullanıma sunulan yatar gövdeli tren setlerinin adları [14]

Yalnızca atalet kuvvetleri tarafından eğilen trenler, (pasif) doğal devrilme özelliğine sahip trenler			
Yatar gövdeli tren seti adı	Kullanıldığı Ülke		
Talgo XXI	İspanya		
UAC TurboTrain	ABD, Kanada		
JNR 381 Serisi	Japonya		
Atalet kuvvetleri tarafından başlatılan ancak bilgisayar tarafından düzenlenen devrilme özelliğine sahip trenler		Bilgisayar tarafından kontrol edilen devrilme özelliğine sahip trenler	
Yatar gövdeli tren seti adı	Kullanıldığı Ülke	Yatar gövdeli tren seti adı	Kullanıldığı Ülke
JR Shikoku 2000 Serisi	Japonya	Acela	ABD
JR Hokkaido KiHa 281 Serisi	Japonya	Advanced Passenger Train	Bir. Krallık
JR Shikoku 8000 Serisi	Japonya	British Rail Class 390 - Pendolino	Bir. Krallık
JR East E351 Serisi	Japonya	Alfa Pendular	Portekiz
Chizu Express HOT7000 Serisi	Japonya	ElettroTreno	İtalya
JR Central 383 Serisi	Japonya	ICT	Almanya
JR Kyushu 883 Serisi	Japonya	JetTrain	Kuzey Amerika
JR Hokkaido KiHa 283 Serisi	Japonya	NSB Class 73 ve 93	Norveç
JR West 283 Serisi	Japonya	Regio Swinger	Almanya ve Hırvatistan
JR Kyushu 885 Serisi	Japonya	Pendolino	İtalya, Finlandiya, Birleşik Krallık, Çekya
JR Shikoku 2700 Serisi	Japonya	Super Voyager	Birleşik Krallık
TRA TEMU1000 Serisi	Japonya	Meitetsu 2000	Japonya
		E5 ve E6 Seri Shinkansen	Japonya

H5 Serisi Shinkansen	Japonya
8600 Serisi	Japonya
E353 Serisi	Japonya
2600 Serisi	Japonya

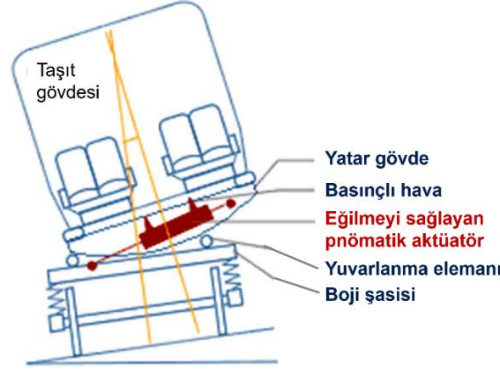
Tren seti yatay kurplardan geçerken tren ve içerisindeki yolcular yanal kuvvetlere maruz kalır [6] ve yolcu konforu ciddi şekilde etkilenir. Taşıtın kurptan geçişi sırasında insan vücudu koltuğa, kol dayanağına veya arabanın yan tarafına doğru zorlanacaktır. Ayrıca taşıt tutmasına yakalanan yolcular olabilir. Bagajlar yolcu baş üstü bölmelerden düşebileceğinden ve yaralanmaya neden olma potansiyeline sahip olacağından güvenlik de etkilenir. Gelecek istasyonda inmeye hazırlanan ayaktaki yolcular dengesini kaybedip düşebilir ve kendilerini ve/ya diğer yolcuları yaralayabilir [1]. Araç gövdesinin içe doğru yatması, yolcuların hissettiği yanal ivmeyi azaltır ve trenin kurpları daha yüksek bir hızda ve sürüş konforunu koruyarak geçmesine olanak tanır [6]. Fakat trenlerin yana yatması nedeniyle oluşan yol tutması, yolcuların bir kısmı için büyük bir sorun oluşturur. Seyahat sırası ve/ya sonrasında; yorgunluk, uyuşukluk, beniz solgunluğu uykululuk, baş dönmesi, tükürük miktarında değişme, mide bulantısı gibi sağlık sorunları gözlenebilir. Binaenaleyh, yolcular üzerinde minimum sağlık sorunu yaratacak şekilde demiryolu hattı tasarımı ve yatar gövde teknolojisi optimize edilmelidir [4].

Boji, birden fazla tekerlek takımı ile irtibatlandırılmış boji şasisi ve bolsterden müteşekkildir. Bolster, üzerinde boji göbeğini barındıran ve boji şasisi ile amortisör ve/ya süspansiyon elemanları ile bağlanmış ikinci temel aksamdır. Bojinin demiryolu taşıtı şasisi ile bağlantısı ise şasi göbeğinin boji göbeği içerisine geçirilmesi ve bağlantı elemanlarıyla ayrılmaya karşı emniyete alınması şeklinde gerçekleştirilir [15].

Yatar gövdeli trenler, doğal eğilmeli trenler ve aktif eğilmeli trenler olarak ikiye ayrılabilir. Doğal (pasif) eğilmeli teknoloji, yatar gövdeli taşıt gövdesinin ağırlık merkezinin yukarısında bulunan bir eğim merkezi ile fizik yasalarına dayanır. Bir yatay kurpta, merkezkaç kuvveti ile yanal ivmenin etkisi altında, araç gövdesinin alt kısmı dışarı doğru kayar. Bu durumun güvenlik üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu hususuna dikkat edilmelidir. Aktif eğilmeli teknolojide araç gövdesinin eğilmesi, sensörleri vd. çeşitli elektronik ekipmanı da içeren ve genellikle hidrolik veya elektrikli bir aktüatörün kontrolüne dayanan teknolojiye sahiptir; sistemde tahrik olmadan önemli bir yatma hareketi olmaz [6]. Sensörler, gövde yatış açısı ve (gövdeye monte edilen ivmeölçerle) yanal ivmesi bilgisi hakkında sürekli veri toplar; kontrolörler eğilme talebine göre gerekli eğilme büyüklüğü ve oranını düzenler [16].

Bu sistemde devrilme momenti, kurp yarıçapına bağlı olarak daha yüksek kuvvetlerin etkisinde artmaktadır ancak ağırlık merkezine göre trenin konumu değişmediğinden trenin güvenliği üzerinde negatif tesir yaratmaz, yalnızca çok yüksek yanal rüzgarlarda kabul edilebilir sınırları aşan momentler oluşabilir [6]. Aktif eğilme sistemi altında bugüne kadar Avrupa ve Japon tekniği olmak üzere iki teknik geliştirilmiştir [17].

Avrupa tekniğinde kullanılan sistem güvenli ve güvenilirdir ve diğer yatırma sistemlerine göre biraz daha karmaşık olmasına rağmen yolcu konforu ve yol tutması açısından daha yüksek olumlu geri bildirim sahiptir [2]. Japon tekniğinde ise eğilme, hem hat üzerine hem de taşıta yerleştirilen ekipmanlarla sağlanmaktadır. Bu teknikte, yolcuların konforu daha yüksek olmakla birlikte maliyet de daha yüksektir ve eğilme açısı daha düşüktür [17]. Bu sistemde pnömatik fren sistemiyle (aynı kompresör tarafından beslenen) aynı hattı kullanan, pnömatik aktüatörle gövdenin eğilmesi temin edilir [2]. Şekil 1.'de Japon tekniğinin kullanıldığı yatar gövde mekanizmasına dair şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 1. Japon yatar gövde mekanizmasının şematik gösterimi [2]

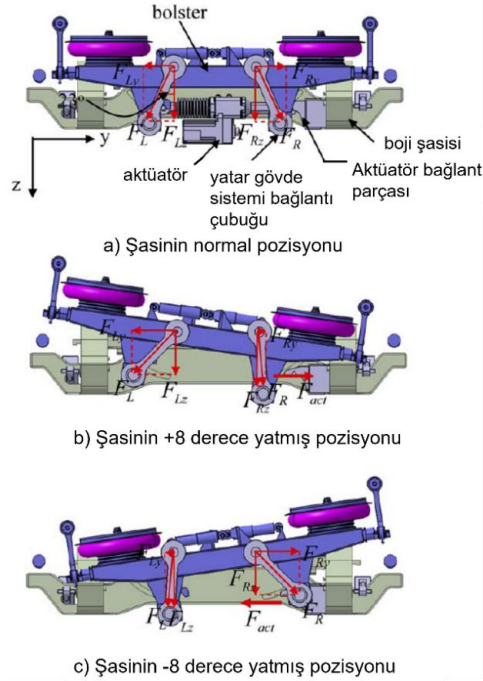
Yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının eğilebilmesini sağlayan sistemde; boji şasisi ile bolster arasındaki bağlantılar gövdenin eğilebilmesine olanak taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Demiryolu taşıtı gövdesi, hava yayıyla beşik travers üzerine oturur. Bağlantıları kurplarda uygun vaziyete sokabilmek görevini yerine getiren bir aktüatör bulunur. Ek olarak sistemde kullanılan pantograf mekanizması da özeldir. Şekil 2.'de bu teknolojiye kullanılan aktüatör gösterilmiştir.



Şekil 2. Yatar gövdeli tren teknolojisinde kullanılan elektromekanik aktüatör [6]

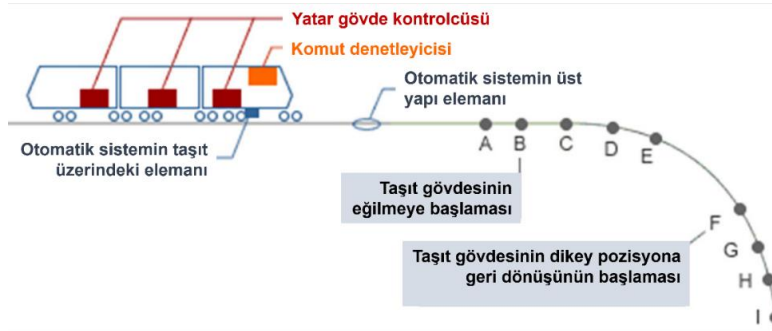
Servo motor tarafından tahrik edilen elektro-mekanik aktüatör, yüksek enerji verimliliğinin yanı sıra hızlı yanıt verme özelliğine de sahiptir. Hidrolik, pnömatik ve elektro-hidrolik tipte aktüatörler de yatar gövdeli sistemde kullanılmaktadır. Hidrolik tip hızlı tepki verir ve diğer tiplerden daha güvenlidir ancak hidrolik borular vb. gibi bakım gerektiren birçok bileşeni vardır ve çalışma yağının kirlenmeden korunması gerekir [18]. Ek olarak hidrolik pompanın ömrü sorun teşkil eder ve çalışma gürültü seviyesi yüksekse kabin içi sessizliği bozarak yolcuları rahatsız edebilir [1].

Eğilme sistemleri, yatay kurplarda dönüş yönüne doğru maksimum 8 derece eğilebilecek şekilde tasarlanmaktadır [9]. Şekil 3.'de bu aksamın normal ve en yüksek eğimle yatmış pozisyonlarına ait görseller; taşıt gövdesi kütlesi kaynaklı ve aktüatörün yarattığı, aksama etkiyen kuvvetlerle birlikte verilmiştir.



Şekil 3. Yatar gövdeli taşıt şasisinin normal ve her iki yönde en yüksek derecede yatmış pozisyonları ve bağlantı elemanındaki kuvvetler [19]

Elektronik kontrollü sistemde; demiryolu taşıtının baş kısmına yerleştirilen bir jiroskop, dış rayın yükseldiği kesimleri algılar ve dever miktarına göre vagon eğilme açısını belirler. Aynı zamanda ön bojiye yerleştirilen bir ivmeölçer, yatay kurplardaki yanıl ivmeyi ölçer ve taşıt gövdesi eğilme açısının aşamalı olarak uygulanmasını sağlar (Şekil 4.). Bu sensörler tarafından sağlanan veriler, gerekli komutları üretebilen işlemci ile etkileşime girer. İşlemci tarafından üretilen komutlar aktüatöre iletilerek gövdenin yatırılması vuku bulur [17].



Şekil 4. Kontrollü eğilme sistemi [2]

2. Metot

Demiryolu hattındaki yol eksenlerinde doğrultunun değiştirildiği eğri parçalarına kurp denir. İki basit kurptan oluşan bileşik kurplar, aynı yönde ya da ters yönde birbirini izleyen yatay kurplar olmak üzere oldukça çok sayıda kurp ile bir güzergâhtaki demiryolu hattı tamamlanır. Yatay kurpların uygun olarak projelendirilmesi, hattın emniyeti ve konforuna doğrudan etki eder. Kurulun uygunsuzluğu halinde demiryolunun kapasitesi ve proje hızı düşecek, kaza ihtimali (örn. derayman) de artacaktır. Yatay kurplarda konfordan taviz verilmeden elde edilebilecek maksimum hız, temel olarak kurp yarıçapına (R) ve devere bağlıdır. Kurplar yarıçapları (R) ile ifade edilmekle birlikte yay (developman) ya da eğrilik derecesi ile de belirtilebilir [20].

Bir taşıta yatay kurpta etki eden merkezkaç kuvveti aşağıdaki denklemle hesaplanır.

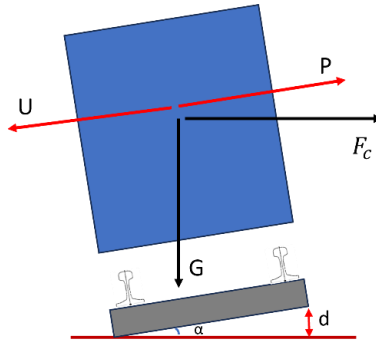
$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad (1)$$

Burada F_c merkezkaç kuvveti, m kütle, v m/s cinsinden taşıt hızı ve R kurp yarıçapıdır (m). Denklem 1'i diğer bir şekilde ifade edersek Denklem 2'ye ulaşılabilir,

$$F_c = \frac{G}{g} \frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{R} \quad (2)$$

Burada G ağırlık ve V km/h cinsinden taşıt hızıdır.

Demiryolu hattındaki kurplarda meydana gelen merkezkaç kuvvetinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla, hat, dış rayın yüksekliği artırılarak dış raydan iç raya doğru eğimli düzlem haline getirilir. Kurban dış rayı ile iç rayı arasındaki yükseklik farkı dever olarak tanımlanır. Dever, merkezkaç kuvvetinin negatif tesirini asgari düzeye indirerek [21] derayman riskini azaltır. Şekil 5.'de dever d ile ifade edilmiştir ve devere göre oluşan kuvvetler de şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5. Dever uygulamasının bulunduğu hatta demiryolu taşıtına etkiyen kuvvetler

$P = U$ hali denge durumudur.

$$F_c \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (3)$$

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} = G \cdot \frac{d}{e} \quad (4)$$

Denklem 4'teki e , ekartmandır (ray açıklığı).

$$\frac{V^2}{3,6^2 \cdot 9,81 \cdot R} = \frac{d}{1435} \quad (5)$$

Denklem 5.'den deveri (d) çekersek;

$$d = 11,3 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (6)$$

Denklem 6.'da dever mm cinsinden, kurp yarıçapı metre cinsinden ve hız km/h cinsindedir. TCDD tarafından kabul edilen maksimum dever değeri 130 mm'dir [12, 22].

$P > U$ hali için,

$K = P - U$ (K: Yanal Kuvvet)

$$K = \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} - G \cdot \frac{d}{e} \quad (7)$$

Konfor katsayısı:

$$\gamma = \frac{K}{G} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{V_{max}^2}{127 \cdot R} - \frac{d}{1435} \quad (9)$$

Konfor katsayısının (γ) hiçbir şartta %6,5'tan büyük olması istenmez [23].

$P < U$ hali için,

$K = U - P$

Konfor katsayısı:

$$\gamma = \frac{d}{1435} - \frac{V_{min}^2}{127 \cdot R} \quad (10)$$

Dünya üzerinde pek çok ülkede uygulaması bulunan yatar gövdeli tren teknolojisinin Türkiye'de de uygulamasına yönelik mevcut demiryolu hattı verileri kullanılarak gerçekleştirilecek matematiksel hesaplama için yukarıdaki denklemlerden yararlanılmıştır. Hesaplamalar için MS Excel programı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hat kesimi olarak Bilecik il sınırları içerisinde yer alan Bozüyük – Demirköy hattı esas alınmıştır. Hatta ait uydu görseli Şekil 6.'da verilmiştir. Tablo 2.'de ise hat boyunca (Bozüyük'ten başlamak üzere) yer alan yatay kurpların sırasıyla yarıçap değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Bozüyük'ten Demirköy'e uzanan hatta yatay kurp değerleri

Kurp No	Yarıçap Uzunluğu (m)
Kurp 1	500
Kurp 2	500
Kurp 3	400
Kurp 4	400
Kurp 5	500
Kurp 6	400
Kurp 7	300
Kurp 8	400
Kurp 9	400
Kurp 10	300
Kurp 11	250
Kurp 12	300
Kurp 13	300
Kurp 14	250
Kurp 15	700
Kurp 16	400
Kurp 17	400
Kurp 18	300



Şekil 6. Bozüyük - Demirköy konvansiyonel tren hattının uydu görüntüsü

Bilecik il sınırları dahilindeki Bozüyük-Demirköy hattında işletilen demiryolu yolcu vagonu TÜRASAŞ'ta imal edilen TVS 2000 olup, ray açıklığı 1435 mm olan standart hatta uygun monoblok tekerlek takımına sahip, vagon genişliği 2825 mm, vagon yüksekliği 4050 mm, tampondan tampona vagon boyu 26400 mm ve ön arka bojilerin göbek eksenleri arası mesafe 19000 mm'dir. Müsaade edilebilir minimum kurp yarıçapı 125 m olan bojiler, uzun yıllardır pek çok ülkede yolcu vagonu bojisi olarak kullanılan Y32 tipi olup görseli Şekil 7.'de verilmiştir. Bu bojide maksimum müsaade edilebilir dingil yükü 15 ton olduğundan yola çıkılarak hesaplamalarda vagonun tam dolu halde kütesinin 60 ton olduğu varsayılmıştır.



Şekil 7. TVS2000 yolcu vagonlarında kullanılan Y32 tipi boji [24]

3. Bulgular

Proje hızı 110 km/h seçilerek, denklem 6'ya göre yapılan hesaplamalar neticesinde dever değerleri 250 m kurp için 547mm, 300 m kurp için 456 mm, 400 m kurp için 342mm, 500 m kurp için 274mm ve 700 m kurp için 195 mm olması gerektiği bulunmuştur. Demiryolu üstyapı standartları gereği 130mm'den daha yüksek devere müsaade edilmediğinden bu hatta 110 km/h proje hızının uygulanamayacağı açıktır. Proje hızını 60 km/h kabul ederek Tablo 3.'deki veriler elde edilmiştir.

Tablo 3. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp değerlerine göre dever, yanal kuvvet, konfor katsayısı hesaplamaları tablosu

$V_p=60\text{km/h}$	Kurp (m)	Dever	Yanal Kuvvet	Konfor
No	Yarıçapı	(mm)	(N)	Katsayısı
1	250	162,7	797256,45	1,354
2	300	135,6	664380,38	1,129
3	400	101,7	498285,28	0,847
4	500	81,4	398628,23	0,677
5	700	58,1	284734,45	0,484

Tablo 3.'den görülebileceği üzere 60km/h hızda yanal kuvvetler ve dolayısıyla konfor katsayısı beklenenden çok yüksek değerlerde ortaya çıkmıştır. Bu sebeple bu demiryolu hattında çok daha düşük hızlarda işletim yapılabilir. En keskin kurp olan 250 metrelik kurpta 21 km/h olarak hesaplanan maksimum hız, kurp yarıçapındaki artışla birlikte sırasıyla 23 ve 24 km/h ve 700 metrelik kurpta 27 km/h maksimum hıza ulaşılabilen hesaplanmıştır. Hattın büyük kısmı Karasu Deresi vadisinde yer aldığından oldukça fazla sayıda ve küçük yarıçaplı (keskin) kurp bulunmaktadır. Müsaade edilebilir maksimum hız değerlerinin oldukça düşük çıkması üzerindeki en büyük etken budur. Tabloyu 250 ile 300 metrelik kurplarda maksimum 20km/h; 400 metrelik kurpta maksimum 23km/h ve 500 ile 700 metrelik kurplarda maksimum 25km/h hıza göre güncelleyerek Tablo 4.'e ulaşılabilir.

Tablo 4. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp ve hesaplama sonucu seçilen dever değerlerine göre; yanal kuvvet, konfor katsayısı ve maksimum hız hesaplamaları sonuç tablosu

No	Kurp (m)	Dever	Yanal Kuvvet	Konfor	Hattın deverden	Maksimum
	Yarıçapı	(mm)	(N)	Katsayısı	dolayı eğim açısı	Hız (km/h)
1	250	130	42677,35	0,073	5,2°	20
2	300	130	26677,35	0,045	5,2°	20
3	400	100	38332,58	0,065	4°	23
4	500	80	42186,06	0,072	3,2°	25
5	700	60	28960,98	0,049	2,4°	25

Bozüyük-Demirköy demiryolu hattında yatar gövdeli tren işletilmesi ve sistemin izin verdiği maksimum yatış derecesi olan 8 derece ile gövdenin yatması durumunda konfor katsayısı düşecek yani yolcular daha düşük yanal kuvvet hissederek daha konforlu seyahat etmiş olacaklar ve tren seti için aynı yatay kurplarda maksimum hız artırılmış olacaktır. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler Tablo 5.'de verildi.

Tablo 5.'den görüldüğü üzere yanal kuvvetlerde azalma yaşanmış ve konfor katsayısı göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalar neticesinde bir miktar yanal kuvvet artışına da izin verilerek maksimum hızda bazı kurplarda 2 km/h ilave hız elde edilebilmiştir. Bu hız artışı üstyapının güvenli limitleri içerisinde. Hız artışı olmaksızın aynı hız değerleri ile seyahatte yanal kuvvetlerde %3 ila %8 arasındaki oranlarda ve konfor katsayısında %2,5 ila %7,5 arasındaki oranlarda azalma yaşanacağı hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 6.'da verilmiştir.

Tablo 5. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp ve hesaplama sonucu seçilen dever değerlerine göre; hatta yatar gövdeli tren seti kullanılması durumunda yanıl kuvvet, konfor katsayısı ve maksimum hız hesaplamaları sonuç tablosu

No	Kurp (m) Yarıçapı	Dever (mm)	Yanal Kuvvet (N)	Konfor Katsayısı	Maksimum Hız (km/h)
1	250	130,0	40142,95	0,068	20
2	300	130,0	40921,83	0,070	22
3	400	100,0	36598,78	0,062	23
4	500	80,0	40761,06	0,069	25
5	700	60,0	36848,62	0,063	27

Tablo 6. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp ve hesaplama sonucu seçilen dever değerlerine göre; hatta konvansiyonel tren seti ve yatar gövdeli tren seti kullanılması durumunda müsavi işletme hızlarında yanıl kuvvet ve konfor katsayısı değerleri ile bunlardaki yüzde azalma değerleri tablosu

N o	Kurp (m) Yarıçapı	Dever (mm)	Konvansiyonel tren seti		Yatar gövdeli tren seti		Yüzde azalma	
			Yanal Kuvvet (N)	Konfor Katsayısı	Yanal Kuvvet (N)	Konfor Katsayısı	Yanal Kuvvet	Konfor Katsayı
1	250	130	42677,35	0,073	40142,95	0,068	%5,9	%6,6
2	300	130	26677,35	0,045	24565,35	0,042	%7,9	%7,3
3	400	100	38332,58	0,065	36598,78	0,062	%4,5	%4,3
4	500	80	42186,06	0,072	40761,06	0,069	%3,4	%3,8
5	700	60	28960,98	0,049	28080,80	0,048	%3,0	%2,6

4. Sonuç

Yatar gövdeli trenlerin kullanımıyla; daha hızlı ulaşım sağlanması nedeniyle daha sık tren kalkışları, daha yüksek hizmet kalitesi ve daha iyi bir imaj ile demiryolu yolculuğunu daha rekabetçi hale getireceği tahmin edilmektedir. İşletme hızının artması, zaman tasarrufunun ekonomik değerinin yanında, hat üzerinde çalışan demiryolu aracı setlerinin daha fazla sefer yapmasına imkân verecek ve sefer sayısının artmasıyla kapasite artırılabilir. Kapasite artırımı mevzusunun gündemde olduğu güzergâhlarda yeni demiryolu taşıtı seti alınması gerek kalmayabileceğinden araç yatırımına gidecek olan maliyetten tasarruf sağlanabilir. Öte yandan tren setinin işletimi sırasında kurplardan önce daha az fren yapılacağı ve kurptan alımana geçişte konvansiyonel demiryolu taşıtının ivmelenmek için harcayacağı enerji kayıpları yatar gövdeli trenlerde oldukça azalacağından verim artırılmış olacaktır [3].

Bu makale kapsamında gerçekleştirilen çalışma neticesinde, hattın belirli kesimlerinde işletme hızının %5 ila %10 oranında artırılacağı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan konfor katsayısındaki %7'ye varan düşüş, kabin içerisindeki yolcuların konforunun artacağı anlamını taşır. Bu sonuçlar, Bozüyük-Demirköy hattı özelinde olup, farklı bir hatta yanıl kuvvetlerde daha yüksek oranlarda düşüş gözlenebileceği; maksimum müsaade edilebilir hız değerlerinde ve yolcu konforunda daha yüksek yüzdelerde artış gerçekleştirilebileceği kanaati hâsıl olmuştur.

Türkiye'de demiryolu taşıtları ve aksamı üretimi gerçekleştiren yerli firmalar, kısa sürede yatar gövdeli demiryolu taşıtı üretebilme potansiyeline sahiptir. Demiryolu hatlarında yapılabilecek iyileştirmelerle ve sisteme yatar gövdeli taşıtların dahil edilmesiyle kısa sürede Türkiye'nin pek çok bölgesinde daha hızlı ve konforlu demiryolu yolcu taşımacılığı hizmeti verilebilir. Coğrafyasının önemli bölümü engebeli olan Türkiye'de yüksek hızlı trenlere uygun demiryolu hattı projelendirmesi bilhassa yatay kurp kısıtlamalarından dolayı zor ve maliyetli olacaktır. Büyük şehirler arasında işletilmekte olan ve projesi devam eden YHT hatlarını tamamlayıcı olarak, diğer hatlardaki yolcu taşımacılığının konvansiyonel trenler yerine yatar gövdeli trenlerle gerçekleştirilmesi daha hızlı, ekonomik ve başarılı sonuçlar verebilecektir. Son olarak, bu çalışmanın; başta Bilecik demiryolu hattındaki mevcut yolcu taşımacılığı hizmeti olmak üzere pek çok konvansi-

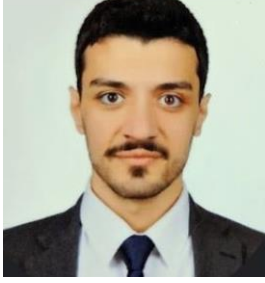
yonel hatta işletimin yatar gövdeli trenlerle gerçekleştirilmeye başlatılmasına yol açacağı umut edilmektedir.

Kaynakça

- [1] M., Mezzina, A., Piccolini, “Hydraulic systems for tilting trains,” Eaton, Cleveland, ABD, 2016.
- [2] A.O., Darlton, M., Marinov, “Suitability of tilting technology to the tyne and wear metro system,” *Urban Rail Transit*, vol. 1, no. 1, pp. 47–68, 2015, <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0007-8>.
- [3] F., Yıldızhan, “Yatar gövdeli demiryolu araç teknolojisi ve Türkiye,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 12, ss. 73-82, 2020, <https://doi.org/10.47072/demiryolu.734731>.
- [4] J., Förstberg, E., Andersson, T., Ledin, “Influence of different conditions for tilt compensation on symptoms of motion sickness in tilting trains,” *Brain Research Bulletin*, vol. 47, no. 5, pp. 525–535, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00097-5).
- [5] V.A., Profillidis, *Railway management and engineering*, Ashgate Publishing Company, Burlington, ABD, ISBN:9781472407788, 2014.
- [6] Persson, R., Goodall, R.M., Sasaki, K., “Carbody tilting – technologies and benefits,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 47, no. 8, pp. 949–981, 2009, <https://doi.org/10.1080/004231110903082234>.
- [7] S.H., Han, H.L., Rho, S.G., Lee, “Estimation on the enhancement of permissible speeds around curves for the tilting train on the gyeongbu line of the korean rail network,” *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 127, pp. 379-388, 2012, <https://doi.org/10.2495/CR120321>.
- [8] J., Choi, “Prediction of displacement induced by tilting trains running on ballasted tracks through measurement of track impact factors,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 31, pp. 360-374, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.004>.
- [9] R. Luo, J. Zeng, W. Zhang, “Pantograph dynamics and control of tilting train,” *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, 2008, pp. 8293-8298.
- [10] B., Kufver, R., Persson, “Tracks for Tilting Trains - A Study within the Fast and Comfortable Trains Project,” 2013, [Online]. Available: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/ps.2.9.pdf>, [Accessed: 12-March-2024].
- [11] A., Çoşkun, “Demiryollarında geçiş eğrileri ve dever uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 5, ss. 57-59, 2017.
- [12] J. Förstberg, E. Andersson ve T. Ledin, “Influence of different conditions of tilt compensation on motion and motion-related discomfort in high speed trains” *Vehicle System Dynamics*, no. 29, pp. 729-734, 2007.
- [13] Pendolino Tilting Train, [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/projects/pendolino-tran/?cf-view>. [Accessed: 11-March-2024].
- [14] Tilting Train, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tilting_train, [Accessed: 11-March-2024].
- [15] İ., Kalımbacak, Lokomotif tanıtma ders notu, Eskişehir Eğitim Merkezi Müdürlüğü, 2009.
- [16] F.T., Pearson, R.M., Goodall, I., Pratt, Control system studies of an active anti-roll bar tilt system for railway vehicles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 212 no. F, 1998, <https://doi.org/10.1243/0954409981530670>.
- [17] C.N., Pyrgidis, *Railway transportation systems design, construction and operation*, CRC Press, Boca Raton, 461, ISBN: 978-1-4822-6216-2, 2016.
- [18] M., Enomoto, S., Kamoshita, M., Kamiyama, K., Sasaki, T., Hamada, A., Kazato, “Development of tilt control system using electro-hydraulic actuators,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 46, no. 4, 2005.
- [19] J.S., Kim, Fatigue assessment of tilting bogie frame for korean tilting train: analysis and static tests, *Engineering Failure Analysis*, vol. 8, no. 13, pp. 1326-1337, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.10.007>, 2006.
- [20] N., Haktan, *Yatay kurplar ders notu*, 2017.
- [21] K.A., Gümüş, “Demiryollarında ray geometrisinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği, 2016.
- [22] C. Urlu, *Demiryolu araçlarının ileri dinamiği*, Ankara, TCDD Yayınları, 1999.
- [23] Kozak, M., “Demiryolunda dever uygulaması ve güvenliğe etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, sayı. 12, 4(1), ss. 41-48, 2016, e-ISSN: 1308-6693.

[24]Demiryolu Yük Arabası için Tekerlek Seti Bogie Vagonu, [Online]. Available: <https://turkish.railwayspare-parts.com/quality-11667873-railroad-coach-bogie-y32-bogie-160-km-h-railway-bogie-wheel-set-bogie-wagon-for-railroad-freight-car>, [Accessed: 19-March-2024].

Özgeçmiş



Beytullah BAŞEĞMEZ

Eskişehir, 1994 doğumludur. Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği 2016 mezunudur. 2018’de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi’nden Raylı Sistemler Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. Otomotiv alanıyla alakalı Güç Aktarma Organları ve Elektrikli Taşıtlar kitapları yayınlanmıştır. 2019 - 2022 yılları arasında Uşak Üniversitesi’nde ve 2023 yılından beri Atşehir Adıgüzel MYO’da akademisyenlik görevini sürdürmektedir. Takım tezgâhları, traktör kabini-tarım makinaları, demiryolu taşıtları ve aksamı, dişli kutuları üretimlerinin gerçekleştirildiği işletmelerin Ar-Ge departmanlarında görev aldı.

E-Posta: beytullahbasegmez@adiguzel.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.