



Yüksek Hızlı Trenlerde Aerodinamik Tasarımın Önemi ve Uluslararası Standartlarda Yapılan Yenilikler

Berkay IŞIK^{*1}, Alper CEBECİ²

¹TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürlüğü, Araç Bakım Dairesi Başkanlığı 06330, Ankara, Türkiye

²Ortadoğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

*berkayisik@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1086-1958

(Alınış/Received: 09.07.2019, Kabul/Accepted: 23.07.2019, Yayımlama/Published: 31.07.2019)

" 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumunda (ISERSE'13) (9-11 Ekim 2013) bildiri olarak sunulmuştur."

Özet: Bu makale, Yüksek Hızlı Trenlerin artan işletmecilik hızlarına istinaden dikkate alınması gereken aerodinamik araç tasarımı ve buna bağlı olarak değişen faktörleri incelemiştir. Ayrıca, son dönemde karşılıklı işletilebilirlik (TSI) ve CEN standartlarında belirtilen gereklilikler için yapılan iyileştirmeler ve test prosedürlerindeki gelişmeler belirtilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek Hızlı Tren, Aerodinamik, TSI, CEN

The Importance of the Aerodynamic Design in High Speed Trains and the Changes Conducted in the International Standards

Abstract: This paper reviews the aerodynamic vehicle design of High Speed Train and changing factors related with an increase of the operation speed. In addition, latest improvements on TSI and CEN requirements and test procedures are defined.

Key words: High Speed Train, Aerodynamic, TSI, CEN

1. Giriş

20. yüzyılın ikinci yarısında Japonya'da Yüksek Hızlı Tren ile ticari yolcu taşımacılığının başlamasıyla birlikte işletme hızları 200 km/h üzerine çıkmıştır. Günümüzde ise, 300 km/h ve üzeri hızla ticari işletmecilik yapan trenler yüksek aerodinamik kuvvetlere ve momentlere maruz kalmaktadır. Üretici firmalar ve yüksek hızlı tren işletmecileri, işletmecilik hızının artmasıyla birlikte artan aerodinamik ve aeroakustik sorunların üstesinden gelebilmek için tasarım aşamasından itibaren yoğun mesai ve harcama yapmaktadır. Uluslararası standartlar, artan işletme hızlarıyla birlikte değişen şartları ve gereklilikleri tekrar gözden geçirmektedir. Yakın zamanda biten AeroTrain projesinin sonuçları simülasyon verilerinin 1:1 ölçekli testlerle uyum içinde olduğunu göstermektedir.

2. Demiryolu Araçları Aerodinamiği

1940 yılından itibaren yolcu trenlerinin ticari işletmecilik hızlarının artırılmasına gidilmesi ile birlikte birçok ülkenin demiryolu işletmecileri trenlere etkiyen aerodinamik kuvvetleri azaltmak için (Fransa'da TGV, Japonya'da Shinkansen, Almanya'da ICE gibi) aerodinamik açıdan düzenleme ve optimize yoluna gitmişlerdir. Tren aerodinamik tasarımında yapılacak iyileştirmelerin enerji tüketimini azaltacağını ön gören araştırmacılar, ayrıca sürüş konforu ve güvenli işletmecilik için

Atıf için/Cite as: B. Işık, A. Cebeci, "Yüksek hızlı trenlerde aerodinamik tasarımın önemi ve uluslararası standartlarda yapılan yenilikler," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 10, pp. 75-83, July 2019.

Demiryolu Mühendisliği

de çok önemli etkileri olduğunu tespit etmişlerdir. Tren aerodinamiğini etkileyen kuvvetleri tespit etmek için Davies formülünden yola çıkmıştır [1]:

$$F = A + (B_1 + B_2)V + CV^2 \quad (1)$$

Denklem 1’de F, harekete karşı konulan toplam kuvvet, V ise açık havada tren hızını temsil etmektedir. A, dairesel mekanik sürtünme katsayısı, B₁ ve B₂ diğer mekanik sürtünme katsayıları ve C araca etkiyen aerodinamik katsayıdır.

$$C = \frac{1}{2}\rho AC_{L,D,S} \quad (2)$$

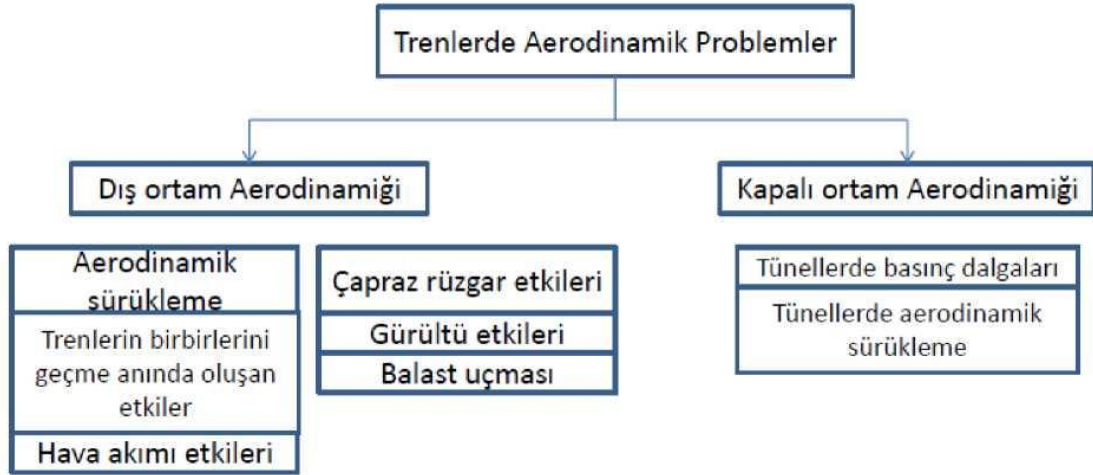
Denklem 2’de görüleceği üzere, hızın artmasıyla oluşan aerodinamik direnç kuvveti (F); hızın karesi, tren ön kesit alanı (A) ve denklem 2’de yer alan sürüklenme katsayısı (C_D), kaldırma katsayısı (C_L) ve yanal katsayı olan (C_S) ile orantılı olarak değişmektedir.

$$M = q.A.l.C \quad (3)$$

Trene etkiyen moment (M) ise, araca etkiyen dinamik basınç (q), referans uzunluğu (l) ve ön kesit alanı (A) ile değişiklik göstermektedir. Tüm bu koşullar trenin açık havada ve rüzgarsız ortamda hareket ettiği düşünülerek dikkate alınmıştır. Gerçek koşulların daha karmaşık olduğundan yola çıkarak, araştırmacılar trenlerin aerodinamiğiyle alakalı konuları daha detaylı incelemişlerdir.

2.1. Yüksek hızlı trenlerde aerodinamik problemler

Yüksek hızlı trenlerde gözlenen aerodinamik etkileşimleri iç ve dış iki farklı ortamda incelemek daha sağlıklı çözüm bulunmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 1. Trenlerde oluşan aerodinamik sorunlar

Şekil 1’de görüldüğü üzere, dış ortamda aerodinamik sürüklenme, trenlerin geçişleriyle oluşan akış etkileşimleri, çapraz rüzgâr etkileri, hava akımı etkileri, gürültü etkileri ve balast uçması görülürken, kapalı ortamda tünel içindeki basınç dalgaları ve tünellerde aerodinamik sürüklenme gibi etkiler olduğu bulunmuştur [2].

2.1.1 Dış ortam aerodinamiği

2.1.1.1 Aerodinamik sürükleme

Yüksek hızlı tren üreticilerinin araç tasarımında dikkate aldığı en büyük sorunlardan biri olan aerodinamik sürükleme katsayısı, hızın karesiyle doğru orantılı olarak değişen birimsiz bir değerdir. Formül (2.1)'de görüldüğü üzere, hızın artması aerodinamik sürükleme direncinin mekanik dirence göre daha fazla artmasına sebebiyet vermektedir. 250-300 km/h hızda ilerleyen bir araca etkiyen toplam direncin %75-80'inin aerodinamik sürüklemeye kaynaklandığı bulunmuştur [3]. Dolayısıyla, yüksek hızlı tren üreticileri, enerji tüketimini hızın karesiyle doğru orantılı olarak artıran bu katsayı için daha fazla önem göstermektedir. Öyle ki, işletme hızının 280'den 350 km/h'ye çıkmasının işletme maliyetlerini %60 arttırdığı tespit edilmiştir [4].

Yüksek hızlı trenlerde dış ortamda araca etkiyen aerodinamik sürükleme aracın burun ve kuyruk kısmı, araçlar arası geçişlerdeki körük boşlukları, pantograf ve boji alt ekipmanları ile ilişkili olarak değişiklik göstermektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, aracın alt ve pantograf bölgelerinde gövdeye monte deflektörler ile yüzey iyileştirmeleri yapılarak türbülansın ve dolayısıyla aerodinamik sürükleme direncinin yaklaşık %7-15 arasında azaldığını göstermiştir [5, 6]. 1/25 ölçekli ETR 500 yüksek hızlı treninde yapılan ölçümlerde, trenin burun kısmında yapılacak uzatmanın basınç değişimlerini büyük ölçüde azalttığı tespit edilmiştir [7].

2.1.1.2 Trenlerin birbirini geçme anında oluşan etkiler

Yüksek hızlı tren üreticileri ve işleten firmaların tasarım aşamasında dikkate alınmasını önerdiği bir diğer konu trenlerin birbirini geçme anında oluşturdukları basınç darbeleridir. Trenler birbirlerini açık alanda geçebilecekleri gibi tünelde de karşılaşabilirler. Geçiş anında oluşan karmaşık aerodinamik yükler tren üzerindeki cam, kapı vb. ekipmanlara zarar verebileceği gibi ve hat kenarındaki yapılarda deformasyon yaratabilir.

Alman ve Fransız araştırmacılar tarafından gerçek zamanlı yapılan testlerde iki trenin karşılıklı aynı hızda birbirini geçerken oluşturduğu basınç akımlarının %30-40 civarında değiştiğini göstermektedir [3]. Siemens AG firması, aerodinamik açıdan trenlerin birbirine olan etkilerini minimize etmek için yüksek hızlı tren hatlarında iki hat merkezi arası mesafenin 4m ile 5m'den az olmamasını tavsiye etmektedir [8].

Tablo 1. TSI Altyapı hız ile hat arası mesafe arasındaki ilişki [9]

TSI Yüksek hızlı demiryolu araçları için izin verilen maksimum hız sınırı (km/h)	İki demiryolu hattı merkezi arası minimum mesafe (m)
$V \leq 230$	4
$230 \leq V \leq 250$	4
$250 \leq V \leq 300$	4.20
$300 \geq V$	4.50

TSI Altyapı (2008) regülasyonunda hat merkezleri arası mesafenin yukarıda yer alan tablodaki şartları sağlaması gerektiği belirtilmiştir.

2.1.1.3 Çapraz rüzgâr etkileri

Yüksek hızlı tren hatlarında bazı bölgeler yüksek rüzgâr hızına maruz kalmaktadır. 200 km/h ve üzeri hızda giden trenler yanal rüzgâra maruz kaldığında kaldırma, sürükleme, yanal kuvvetler ve dönme momenti etkileri artmaktadır [10].

Demiryolu Mühendisliği

Demiryolu araçları üzerine etkiyen çapraz rüzgar etkilerine olan önem araçların ağırlıklarının azaltılması ve hızlı trenlerin kullanılmaya başlaması ile artmıştır. Aerodinamik tasarımcıları bu konuda çalışmalarını arttırarak güçlü yanal rüzgarların tren dengesine olan etkisini incelemelerini yoğunlaştırmıştır. Yolcu kapasitesinin artması için dağıtılmış güç sistemine haiz, çoklu üniteli trenlerin kullanımı yaygınlaşmasına rağmen, her bir başta yer alan vagonların ağırlıklarının azaltılması sert yanal rüzgarlara maruz kalan trenlerde deray koşullarına yol açabileceği tespit edilmiştir. Bu risk, dar ekartmanlı hatlarda, köprü ve bent bölgelerinde artmaktadır [11].

Fransa'da hızlı tren işletmecisi olan SNCF, yanal rüzgarlara karşı geliştirdiği risk analizinde hat kenarına ses duvarı olarak da kullanılan sabit rüzgar perdeleri ve belli aralıklarla anemometre (rüzgar hızını ölçer) koyarak rüzgar hızının 30m/s'yi geçtiği durumlarda rüzgar alarm sistemini devreye alarak işletme hızını kademeli olarak 320 km/h'dan 80 km/h'e düşürmektedir. Alman Demiryolları DB ise yanal rüzgarlara bağlı olmaksızın, %10 tolerans dahilinde ray üzerine basan teker yükünü daimi şekilde ölçmekte ve bu marjinde yaşanan ani değişikliklerde işletme hızını düşürmektedir [10].

2.1.1.4 Gürültü ve balast uçması

Yolcu konforu açısından dikkate alınan dış gürültü de yüksek hızlı trenlerin aerodinamik yapısıyla doğrudan alakalıdır. TSI Gürültü standardında yer alan kurala göre, 250 km/h hızla giden YHT'nin hat merkezinden 25 m öteye yaydığı gürültünün en fazla 88±1 dB(A) olacağı belirtilmiştir [12].

Gürültü tespiti için 1:1 ölçekli gerçekleştirilen testlerde [13] pantografin sürükleme ve kaldırma katsayılarını arttıran ve buna bağlı gürültüye yol açan en önemli bileşen olduğu tespit edilmiştir.

Japonya'da işletilen 700 serisi Shinkansen trenlerinde yapılan dış aerodinamik iyileştirmeler [14] ile gürültü seviyesinde önemli degerde azalmalar sağlanmıştır.

Balastlı demiryolu üzerinde işletilen hızlı trenleri tehdit eden bir diğer konu ise balast uçmasıdır. Balast uçması olarak tabir edilen yüksek hız ve aerodinamik etki ile havalanan balastların araçların alt aksamalarına (aks, tekerlek, boji ekipmanları, antenler vs.) zarar verdiği tespit edilmiştir. Alman Demiryolları DB'nin yayımladığı tamimde [15] ve UIC'nin Yüksek Hızlı Demiryolu Hatlarının Bakımı raporunda [16], işletmecilik hızının 140 km/h'ten fazla olduğu durumda hızlı tren hattındaki balast seviyesinin transversin üst kotundan 40-60 mm aşağıda olmasını tavsiye etmiştir.

2.1.2. Kapalı (İç) ortam aerodinamiği

2.1.2.1. Tünellerde basınç dalgaları

Tünel içerisinden geçen bir hızlı trene etkiyen basınç dalgaları dış ortamda seyahat eden bir trene göre çok daha karmaşık aerodinamik etkilere maruz kalmaktadır. Fransa Demiryolları işletmecisi SNCF'e göre tünellerde oluşan basınç dalgaları, tren baş tarafının tünele girmesiyle ortaya çıkan sıkıştırma dalgası, trenin tamamının tünele girmesiyle gelişen büyüme dalgası ve portallardaki dalga yansımalarından oluşmaktadır [9].

Hızlı trenler tünele girdiğinde oluşturduğu basınç dalgası, yolcular üzerinde ciddi etkiler bırakabilir. Bu yüzden, tünel tasarımı konusunda yakın zamanda birçok yenilik uygulanmıştır. Özellikle Japonya'da YHT hatlarının yaklaşık %60'nının tünelden oluştuğunu dikkate alırsak, bu hususta yer alan yenilik ve gelişmelerin Japonya'dan çıkmış olması tesadüf sayılmaz. Tünellere giriş ve çıkışlarda oluşan ani basınç değişimlerini dengelemek için YHT hatlarında dizayn edilen tüneller sönümleyicilere sahiptir. Böylece, sonik patlama diye tabir edilen gürültü ve ani basınç

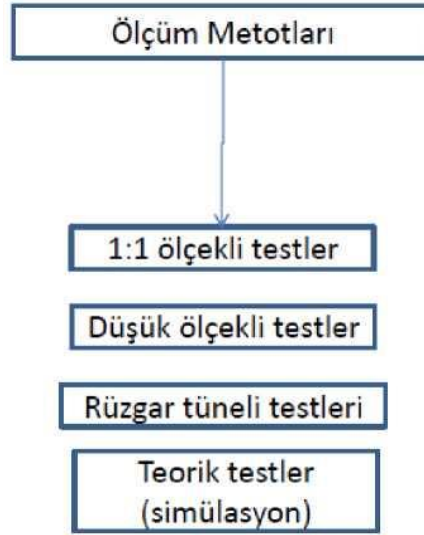
değişiklikleri dengelenmektedir. Ayrıca tren setlerinin iyi bir şekilde sızdırmazlığının sağlanmış olması ve tünel giriş çıkışlarında iç ve dış ortamdan hava akışını durduracak sistemler kullanılması ile yolcu konforu optimum hale gelmektedir. Tünel kesit alanı yüzeyinin büyütülmesinin düşük blokaj oranı ve dolayısıyla düşük genlikte basınç değişimleri sağladığı bilinmektedir.

2.1.2.2. Tünellerde aerodinamik sürükleme

Tünel içerisinde hızlı trenlerin geçişiyle oluşan hava akımları, trenlerin tünele girişi ve çıkışı boyunca değişiklik gösterir. Hızlı tren çevresinde tetiklenmiş hızlı hava akımları, hem araçlara hem de tünel ekipmanlarına (kapılar, kalo destekleri, sinyalizasyon malzemeleri vs.) etki eder. Bu etkiyi azaltmak için hızlı tren aerodinamik tasarımcıları tren baş kabinlerinin bulunduğu araçların burun kısmını uzatmanın, keskin basınç akımlarını tünel giriş ve çıkış anlarında azalttığını tespit etmişlerdir.

2.2. Aerodinamik kuvvetleri ölçüm metotları

Araç aerodinamiğini tespit etmek için birçok teknik geliştirilmiştir. Şekil 2’de görüleceği üzere bu ölçüm metotları 1:1 ölçekli testler, düşük ölçekli testler, rüzgar tüneli testleri ve simülasyonlardan oluşmaktadır.



Şekil 2. Ölçüm Metotları

Bu yöntemler ile tren aerodinamiğini geliştirmek ve iyileştirmek adına karşılaştırmalı testler yapılarak optimum çözüme ulaşmak hedeflenmektedir.

2.2.1. Gerçek boyutlu (1:1 ölçekli) testler

Gerçek boyutta yapılan testler bu yöntemler içerisinde en uzun ve maliyeti en yüksek olan test çeşididir. Test koşullarını oluşturmak uzun zaman alabileceği gibi, sonuçlar beklendiği şekilde doğru ve ayrıntılı elde edilemeyebilir. Uluslararası normlardan TSI Hızlı Trenlerde karşılıklı işletilebilirlik standardında gerçek zamanlı testler yapılırken, ölçümü alınacak verinin doğruluğunu sağlamak için aynı koşullarda alınmış 20 adet veri ve bunların en az %50'sinin maksimum hızın $\pm 5\%$ sapmada, %100'ünün de $\pm 10\%$ sapmada ölçülmüş olmasını şart koşmuştur [17].

2.2.2. Düşük ölçekli testler

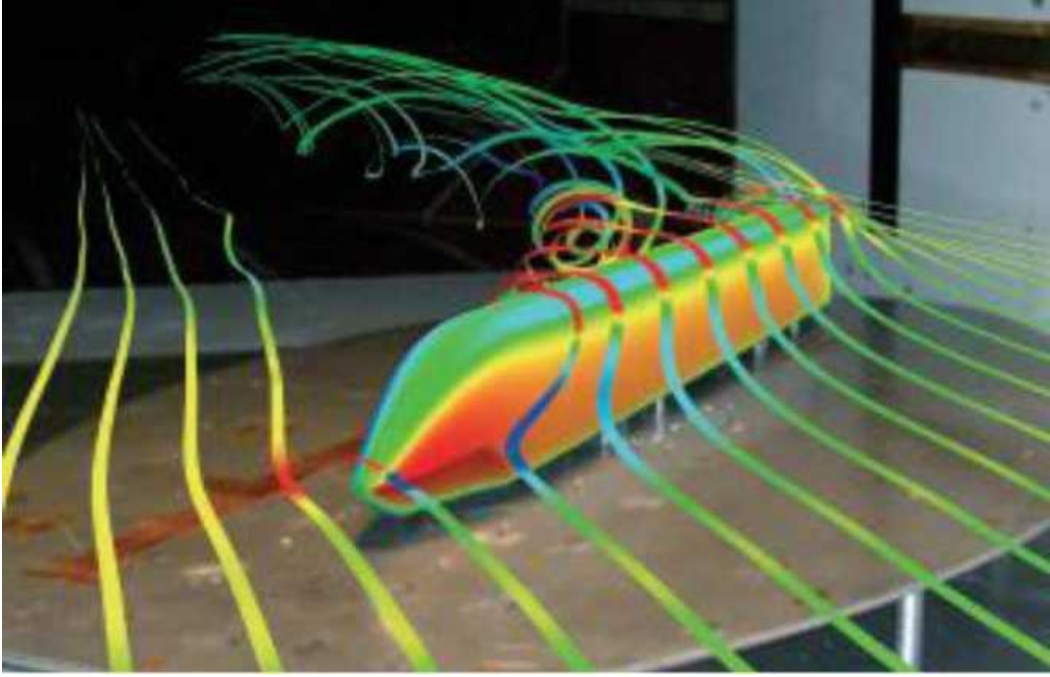
Son zamanlarda kullanılan yöntemlerden biri olan bu test, ölçeklenmiş rüzgâr tüneli olarak düşünülebilir. Test hattı oluşturulan ve değişik ölçeklerde küçültülen tren setleri, tüneller ve platformlar ile araç ve dış ortamın aerodinamik olarak etkileşimleri ve araca etkiyen aerodinamik kuvvetleri tespit etmek kolaylaşmaktadır. Araştırmacılar, Birmingham Üniversitesi tarafından oluşturulan Hareketli test teçhizatı [Şekil 3, sol] ile ETR 500 tipi 1:25 ölçekli yüksek hızlı tren ile 277 km/h hıza kadar açık alanda, tünelde, platform ve karşılıklı tren geçişlerinde testler yapılmıştır [7]. Bu sonuçlar, gerçek zamanlı yapılan testlerle ve teorik testlerle karşılaştırmış ve uyum içinde olduğu tespit etmiştir.



Şekil 3. Birmingham Üniversitesi'nin oluşturduğu 1:25 ölçekli hareketli test teçhizatı (solda), Alman Uzay Merkezi (DLR) 1:25 ölçekli yeni nesil tren (sağda)

Alman Uzay Merkezi (DLR) tarafından oluşturulan katapult sisteminde ise 360 km/h'e ulaşan ICE 3 modeli 1:25 ölçekli hızlı trenin [Şekil 3, sağ] 60 m uzunluğunda olan test hattında aerodinamik davranışlarını incelemek için kurulmuştur. Yeni nesil tren (NGT) adı verilen çift katlı yüksek hızlı trenin farklı koşullarda aerodinamik davranışları ölçülerek optimize edilmektedir [18].

Aerodinamik kuvvetleri bulmak için kullanılan bir diğer metot olan rüzgâr tüneli testlerinde, gerçek zamanlı testlerde sağlanan dış/iç ortam koşulları hazırlanarak yük veya yolcu trenleri bu tünellerde test edilir. Rüzgâr tüneli testinin çalışma prensibi, hareketsiz halde duran bir nesneye büyük fanlar aracılığıyla hava akımı gönderilmesinden oluşmaktadır. Bu hava akımı ile sabit konumda olan gözlemci, araca etkiyen aerodinamik kuvvetleri ölçebilmektedir. İlk olarak otomobillerde kullanılan bu yöntem daha sonra uçak ve demiryolu araçları için yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntem ile dış ortamda trene etkiyen aerodinamik kuvvetler, çapraz rüzgâr akımları ve hava akımı etkileri incelenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. 1:25 ölçekli Yeni Nesil Trenin çapraz rüzgâr koşullarında akım çizgileri ve basınç dağılımı [18]

2.2.4. Teorik testler

Bilgisayar teknolojisinin çok hızlı bir şekilde gelişmesi bugün bize sanal ortamda, gerçek zamanlı test şartlarında elde edemeyeceğimiz koşulları yaratmamızı sağlamaktadır. CFD yöntemi olarak da bilinen, bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği yöntemini kullanarak trenlere etkileyen sürüklenme ve çapraz rüzgar kuvvetleri, hava akımı etkileri ve basınç değişimleri tespit edilmektedir [18].

Araştırmacılar, farklı nümerik metotları kullanarak günümüz gelişmiş süper bilgisayarları ile bu akım alanlarını yüksek hızda ve klasik test koşullarında oluşturamayacağımız hareketli çevre koşullarını 3 boyutlu olarak simule etmektedir. Simule edilen koşullar gerçek zamanlı ve küçük ölçekli test enstrümantasyonlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulukları incelenmiş ve uluslararası standartlarda yerlerini almıştır. RANS (Ortalama Reynolds Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simülasyonu), DES (Birleşik Eddy Simülasyonu) bu metotlardan en sık kullanılanlarıdır.

Her ne kadar CFD teknolojisinde gelişmeler tren aerodinamiğine ilişkin detaylı bilgiler verse de tren üzerindeki kararsız aerodinamik yükler, tren arkasında ve boji bölgesinde oluşan kararsız hava akımlarını hesaplamada yetersiz kalmaktadır [19]. Ancak, CFD simülasyonunda kullanılan DES, LES vb. modelleme metotları ile yüksek Reynolds Sayısında 1:1 ölçekli testlere benzer sonuçların bulunacağı ve fiziksel modellerin yerini alacağı öngörülmektedir.

3. Bulgular

3.1. Uluslararası standartlarda yapılan değişiklikler

Avrupa Birliği'nin oluşturduğu 7. Çerçeve programında yer alan demiryolları karşılıklı işletilebilirlik şartlarını sağlamak için 2009 yılında çalışmaları başlatılan ve TrioTRAIN kapsamında yer alan AeroTRAIN projesi ile Avrupa Birliği ülkeleri arası geçerli demiryolu araçları sertifikasyonunu kolaylaştırmak, TSI'da açık kalan maddeleri tamamlamak ve zaman-maliyet arttırıcı kabul sürecini test ve simülasyon metodunu kullanarak azaltmak amaçlanmıştır.

Demiryolu Mühendisliği

Bu şekilde, zamandan %25 oranda, kabul görmüş yeni bir trenin tekrardan kabul testlerini gerçekleştirilerek harcanan efordan %80 oranda ve 20€ ile 50€ arası yıllık maliyette azalma sağlanması hedeflenmiştir.

Nitekim, amaçlanan hususlar çerçevesinde aşağıdaki hususlarda gelişmeler sağlanmıştır [20]:

- TSI'da yer alan 3 aerodinamik gereklilik ve 1:1 ölçekli test prosedürleri yeniden tanımlanarak sadeleştirilmiştir.
- AeroTRAIN projesinden elde edilen bazı öneriler TSI-Konvansiyonel Demiryolları Alt birimi ve EN 14067-4 standartlarına dahil edilmiştir.
- TSI'da yer alan açık alanda oluşan basınç dalgalarının, 1:1 ölçekte veya düşük ölçekli testlerin yanı sıra bilgisayar simülasyonunun geçerli, güvenli bir alternatif test metodu olduğu belirtilmiştir.
- Çapraz rüzgarların demiryolu araçlarının aerodinamik karakteristiklerine etkisini tespit etmek için faydalanılan rüzgar tüneli testlerine alternatif olarak bilgisayar simülasyonlarının kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Bu metot, CEN standartlarına önerilmiştir.
- Balast uçuşması için test deneyimleri kullanarak gerekli test prosedürleri hazırlanmış ve Avrupa Demiryolları için CEN standartlarında önümüzdeki süreçte kullanılmak üzere limit değerler belirlenmiştir.
- Hava akımı etkilerinin tespiti için sadece 1:1 ölçekli hat üzerinde ölçümler yapılması TSI ve CEN 14067-4 standartlarına önerilmiştir.
- Kapalı ortamdaki aerodinamik ölçümler için trenler üzerindeki basınç dalgalarının etkilerini ölçmek için öneriler getirilmiş ve CEN standardına sunulmuştur.

4. Öneriler

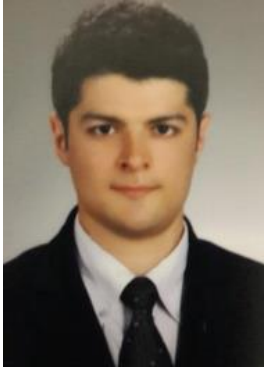
Araştırma sonucunda elde edilen sonuçlardan bazıları draft versiyonlu TSI Konvansiyonel Alt birimi ve EN 14067-4'de yer almıştır. Diğer öneriler değerlendirilerek gelecekte revize edilecek EN ve TSI standartlarında yer alması düşünülmektedir. Böylece, 1:1 ölçekli testler ve alternatif ölçüm metodlarından biri olan bilgisayarlı simülasyon sonuçları ile yapılan sadeleştirmeler sayesinde demiryolu araçları üreticileri için aerodinamik gereklilikleri daha hızlı ve daha az maliyetle sağlamak mümkün olacaktır.

Kaynakça

- [1] J. Schetz, "Aerodynamics of High Speed Trains". Annual Review Fluid Mechanics. no. 33, pp 371-414, (2001).
- [2] R. Raghunathan, H. Kim and T. Setaguchi, "Aerodynamics of High Speed Trains'. Progress in Aerodynamic Sciences" pp 469-514, (2002).
- [3] G. Gawthorpe, "Aerodynamics in railway engineering, 1. Aerodynamics of trains in the open air", Proc. World Congr. Inst. Mech. Eng. Railw. Eng. Int. pp 7-12, (1978).
- [4] B. Shulte-Werning, "Research of European Railway Operators to Reduce Environmental Impact of High Speed Trains", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, pp 249-257, (2003).
- [5] T. Hong-qi, "Formation mechanism of aerodynamic drag of high-speed train and some reduction measures" 16th edition. China: J. Central South University Technology, (2009).
- [6] A. Miyako and Y. Yamamoto, "Investigation of running resistance of high speed trains", Proceedings of the World Congress on Railway Research. Florence, pp 577-579. (1997)
- [7] T. Johnson and S. Dalley, "1/25 Scale Moving Model Tests for TRANSAERO Project", third edition. Derby: RAPIDE/TRANSAERO Project, (2002).
- [8] J. Xue and F. Banko, "Pioneering the Application of High Speed Rail Express Trainsets in the United States. Parsons Brinckerhoff Group Inc., p 95, (2012).
- [9] Trans-Avrupa Yüksek Hızlı Demiryolu Sisteminin Karşılıklı İşletilebilirliği, "Altyapı" Alt Sistemi, (2008).

- [10] D.K.L.N. Wu and P.a.P.C.W. Waterson, “Research Project T871: Guidance for Computational Fluid Dynamics Modelling of the Forces and Moments Acting on Trains in Crosswinds”, First Issue edition, RSSB, (2009).
- [11] B. Diedrichs, “Unsteady aerodynamic crosswind stability of a high-speed train subjected to gusts of various rates”, Vehicle Aerodynamics. vol. 509, (2009).
- [12] Trans-Avrupa Yüksek Hızlı Demiryolu Sisteminin Karşılıklı İşletilebilirliği, “Gürültü” Alt Sistemi, (2008).
- [13] M. Ikeda, “Passive lift suppression mechanism for low noise pantograph”, Quarterly Report of RTRI, vol. 41 no. 4, pp 177-181, (2000).
- [14] A. Torii and J. Ito, “Development of the series 700 Shinkansen train-set (improvement of noise level)”, In Proc. World Congr. Railw. Res. Tokyo, (1999).
- [15] DB Netz AG 820.2010A08, Altyapı tamimi
- [16] H. Goossens, “Maintenance of High Speed Lines UIC Report 2010”, 1st phase, p 30, (2010).
- [17] Trans-Avrupa Yüksek Hızlı Demiryolu Sisteminin Karşılıklı İşletilebilirliği, “Hızlı Trenler” Alt Sistemi, (2008).
- [18] Tünel Simulasyon Tesisi (2013), URL: <http://scart.dlr.de/site/test-facilities/tsg/index.htm#c73> (Erişim zamanı : Temmuz 23, 2019)
- [19] C. Baker, T. Johnson and others, Train Aerodynamics: Fundamentals and Applications, Butterworth-Heinemann, 2019
- [20] RSSB T848 Research, “AeroTRAIN-Aerodynamics: Total Regulatory for Interoperability”, (2013).

Özgeçmiş



Berkay IŞIK

1987 tarihinde Ankara’da doğmuştur. Lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliğinde, Yüksek lisansını ise İngiltere University of Birmingham Raylı Sistemler Mühendisliğinde tamamlamıştır. 2011-2017 yılları arasında TCDD Genel Müdürlüğü Cer Dairesinde Hızlı Tren Şubesinde, yeniden yapılanma sonrasında ise TCDD Taşımacılık A.Ş. Araç Bakım Dairesinde Hızlı Tren Şubesinde Yüksek Mühendis olarak çalışmaktadır.



Alper CEBECİ

1987 tarihinde Ankara’da doğmuştur. Lisans eğitimini Eskişehir Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliğinde, Yüksek lisansını ise İngiltere University of Birmingham Raylı Sistemler Mühendisliğinde tamamlamıştır. 2011-2016 yılları arasında TCDD Genel Müdürlüğü Yüksek Mühendis olarak çalışmıştır. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü bünyesinde doktora çalışmalarına devam etmektedir.