



Eddy-Current Fren Sisteminin Türkiye’deki Yüksek Hızlı Demiryolu Hatları ile Uyumunun Analizi

Berkay IŞIK^{*1}, Alper CEBECİ²

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

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

*berkayisik@gmail.com

(Alınış/Received: 23.12.2019, Kabul/Accepted: 23.01.2020, Yayımlama/Published: 31.01.2020)

Özet: Eddy-Current freni (ECB), demiryolu hatlarında trenlerin acil durum ya da servis freni olarak kullanılabilen yeni teknoloji fren sistemidir. Bu sistemde frenlemeye esas kuvvet, tekerlek ve ray arasındaki adezyondan bağımsız olarak mıknatıs düzeneği ve ray arasındaki elektromanyetik etkileşim ile ortaya çıkmaktadır. Böylece trenin frenleme performansı artmaktadır. Bu sistem, kapasite, emniyet ve bakım maliyetlerinde sağladığı iyileştirmeler göz önüne alındığında yüksek hızlı trenler için en iyi seçenek olarak önerilmektedir. Ancak, bu sistemin, konvansiyonel demiryolu hattı ile uyumunun kontrol edilerek belirli koşullar altında kullanıma sunulması gerekmektedir. Bu makalede, Türkiye’deki mevcut yüksek hızlı demiryolu hatları ve bileşenlerinin Eddy-Current fren sistemine olan uyumu ile bu sistemin trafik kapasitesine, bakım maliyetine olan katkıları teorik hesaplamalarla değerlendirilmiş, uygulama çözümlerine ilişkin öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Yüksek Hızlı Tren, Eddy-Current fren sistemleri, Betonarme yol

The Compliance Analysis of Eddy Current Braking System with Turkish High-Speed Railway Lines

Abstract: The Eddy current brake (ECB) is a new technology brake system that can be used as an emergency or service brake for trains on railway lines. In this system, the main force for braking is caused by the electromagnetic interaction between the magnet assembly and the rail, independent of the adhesion between the wheel and the rail. This increases the braking performance of the train. This system is recommended as the best option for high speed trains, given the improvements in capacity, safety and maintenance costs. However, it is necessary to check the compatibility of this system with the conventional railway line and make it available under certain conditions. In this article, the compatibility between the current high-speed railway lines and its components with the Eddy-Current brake system in Turkey was evaluated with the help of theoretical calculations considering their contributions to the traffic capacity and maintenance cost of this system and proposals have been made on the implementation of the solution.

Keywords: Railway, High Speed Train, Eddy Current brake systems, Slab track

1. Giriş

Demiryolu teknolojisi, demiryolu işletmeciliği başladığından beri sürekli gelişmiştir. Demiryolu taşımacılığı ilk başladığında trenler çoğunlukla madenler için kullanılmaktaydı. Daha sonra trenin amacı genişletilmiş ve her türlü ürün ve yolcu trenle taşınmaya başlanmıştır. Değişikliklerle birlikte demiryolu teknolojisinde gelişmeler de son bulmamıştır. Eş zamanlı olarak araç tasarımları, cer sistemleri ve frenleme sistemleri mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Demiryolu taşımacılığının bir sonraki amacı, diğer taşıma türleri olan havayolu ve karayolu

Atıf için/Cite as: Işık, B., Cebeci, A., “Eddy-Current fren sisteminin Türkiye’deki yüksek hızlı demiryolu hatları ile uyumunun analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 86-97, Jan. 2020.

Demiryolu Mühendisliği

taşımacılığı ile rekabet etmek olmuştur. Bunu yapabilmek için demiryolu taşımacılığının hızı artmıştır. Günümüzde maksimum hız rekoru konvansiyonel tipteki yüksek hızlı demiryolu hattında 574,8 km/saat ile Alstom (Fransa) üretimi TGV (Train à Grande Vitesse) serisi ticari işletmedeki yüksek hızlı tren (YHT) setine aittir [1].

Demiryolu taşımacılığında güvenilirlik, kullanılabilirlik, bakım yapılabilirlik ve emniyet sağlanması gereken ana unsurlardır. Bu noktada, fren sisteminin önemi gündeme gelmektedir, çünkü yüksek hızlarda işletilen ağır bir treni durdurmak, mükemmel bir frenleme sistemini gerektirmektedir. Bir güzergâhta sadece bir tren işletildiğinde frenleme performansı hesaba katılmayabilir, ancak yoğun trafikli güzergâhlarda frenleme performansı, güzergâhın trafik yönetimini etkilemektedir. Bununla birlikte, gelişmiş bir fren performansı trenlerin fren mesafesini azaltmaya ve emniyeti artırmaya yardımcı olmaktadır.

Konvansiyonel fren sistemi türleri, genellikle tekerlek ve ray arasındaki adezyona dayanmaktadır. Bir trende yer alan ana fren sistemleri, pnömatik fren, elektrikli fren (dinamik fren ve rejeneratif fren) ve susta park frendir. Pnömatik ve elektrikli frenler servis esnasında uygulanan fren tipleri olup, susta park freni trenin hareketsiz halde iken sabit kalmasını sağlayan frendir. Pnömatik fren, ana hava deposundaki havanın boşaltılması ile fren balatalarının diski sıkıştırması neticesinde oluşan sürtünmeli fren çeşididir. Elektrodinamik fren uygulandığında, treni çeken elektrik motorlarının jeneratör vazifesi görmesi sonucu ortaya çıkan elektrik enerjisi araçta bulunan rezistörler tarafından ısıya dönüştürülür. Rejeneratif fren uygulandığında, frenleme sırasında ortaya çıkan elektrik enerjisi, havai hat vasıtasıyla trafo merkezine geri iletilir. Rejeneratif fren sistemi ile YHT setinin üzerinde çalıştığı hattı besleyen transformatör merkezinin YHT setine olan mesafesine ve şebeke yükleme şartlarına bağlı olmadan anlık rejeneratif frenleme gücünden tam olarak faydalanılması amaçlanmaktadır. Ancak, geri beslemenin sağlıklı gerçekleşebilmesi için, trafo merkezlerinin bu koşula uygun olması ve EN 50388 Havai temas hattından çekilen maksimum güç ve akım standardı gereği güç faktörünün (akım $\cos \theta$ değerinin) 0,95-1 arasında olması gerekmektedir. Aksi takdirde, geri besleme yapılan enerji şebekedeki akım harmoniklerinde bozulmalara sebep olur.

Yukarıda anılan fren sistemi türlerinde adezyon kuvveti, tren hızındaki artışla birlikte azalmakta; bunun sonucunda frenleme kuvveti düşmekte ve uzun fren mesafeleri ortaya çıkarak güzergah kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır. İlave çevresel koşulların eklenmesi (Ray mantarı üzerindeki kar, yaprak, buz vb.) ile birlikte adezyon kuvvetinde azalma görülmekte, bu durum trenlerin fren performansını olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte, trenin fren performansı, bu tür frenlerde ray mantarındaki deformasyonlardan etkilenmekte olup bu durum, kırmızı sinyal geçişine (SPAD), muhtemel tren kazalarına ve demiryolu trafik yönetiminin aksamasına zemin hazırlamaktadır. Bu kapsamda, demiryolu araçları/fren sistemi üretici firmaları farklı tipte fren sistemleri üzerine çalışmalarına başlamış ve Eddy-Current sistemi hayata geçirilmiştir. Aşağıdaki bölümde ECB sisteminin kısa tarihçesi ve çalışma prensibi açıklanmıştır.

2. Eddy-Current Fren Sisteminin Kısa Tarihçesi

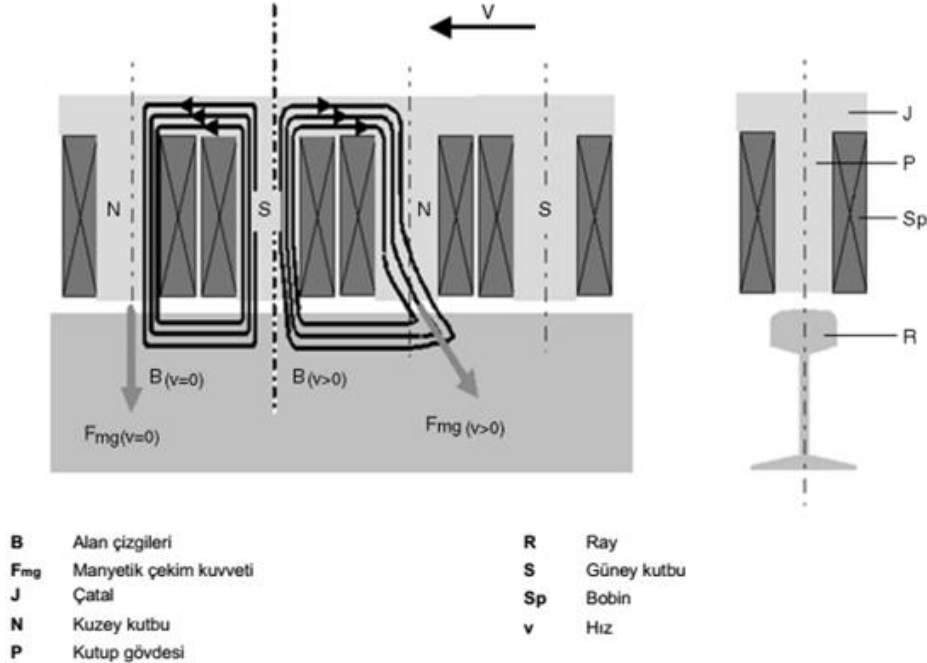
Trenlerde frenleme performansının artırılabilmesi için yapılan çalışmalar neticesinde, lineer ECB sistemi kavramı ilk olarak Fransız fizikçi Jean Bernard Leon Foucault tarafından 19.yüzyılda tariflenmiştir [2]. Yüksek hızlı tren uygulamalarında ise lineer ECB sistemi Alman Knorr-Bremse firması tarafından geliştirmiş ve ilk kez Alman Demiryolları (DB) Siemens üretimi ICE3 trenlerinde 2003 yılı itibarıyla yolculu işletmede kullanılmaya başlamıştır [3]. Sanyo Shinkansen'in açılışından önce, Japon Ulusal Demiryolları Tokaido Shinkansen hattında ECB sistemini test etmiştir [4]. Mitsubishi ve Toshiba ortak üretimi Shinkansen Alfa-X prototip treninde ECB sisteminin testleri halen devam etmektedir [5]. Buna ek olarak, Hyundai-Rotem firması Güney Kore'de ECB sistemi ile yüksek hızlı trenlerde deneme yapmaktadır [6]. Son olarak, 700 Serisi Shinkansen teknolojisine haiz Tayvan Yüksek Hızlı 700T serisi trenler, 300

km/saatlik çalışmalara izin vermek için her römorkta (motorsuz) sağlanan daha güçlü motorlara ve iki ECB ekipman setine sahiptir [7].

3. Eddy-Current Fren Sisteminin Çalışma Prensibi

Eddy-Current Freninin (ECB) çalışma prensibi, konvansiyonel fren sistemlerinden farklıdır. Frenleme kuvveti, boji altına monte edilen Eddy-Current ekipmanı ile ray arasında temas olmadan elektromanyetik alan (girdap akımları) oluşturması neticesinde çekim etkisi ile sağlanmaktadır. Eddy-Current freninin art arda sıralanmış olan uyarı bobinleri elektrikle uyarıldıklarında kuzey ve güney kutuplarının dönüşümlü olarak birbirini izlediği bir manyetik alan oluşturmaktadır (bkz. Şekil-1). Oluşturulan manyetik alanın şiddeti uyarı akımına bağlı olduğundan, Eddy-Current freni kontrol edilebilmektedir.

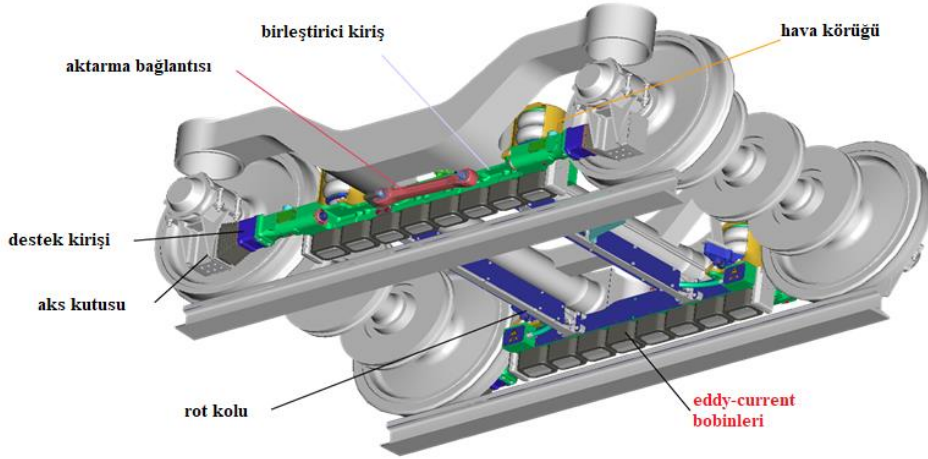
2 farklı tipte ECB sistemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi dairesel ECB, diğeri ise lineer ECB sistemidir. Dairesel ECB sistemi, roller coaster uygulamalarında yaygındır. Ancak, manyetik kaldırma uygulamaları ve yüksek hızlı trenler için, mekanik disk freninin aşınmasını önleyen lineer ECB sistemleri kullanılır [8].



Şekil 1. Eddy-Current Frenin ray üzerinde çalışma prensibi [9]

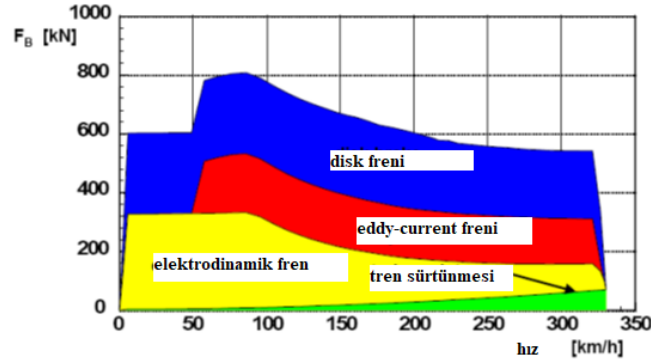
ECB sisteminde fren performansı, konvansiyonel fren sistemlerinde olduğu gibi tekerlek ve ray arasındaki sürtünmeye veya dinamik frenlemeye bağlı değildir. İşletme hızının artması ile birlikte Adezyon katsayısı azaldığından konvansiyonel fren sistemleri ile yüksek hızlarda düşük frenleme performansı elde edilmektedir. Ancak, ECB sistemi sürtünmesiz çalışma sistemi sayesinde devamlı ve yüksek frenleme oranları sağlamaktadır. Almanya'da ECB sistemi ile donatılmış ICE3 yüksek hızlı trenleri, 300 km/saat hızda 1.0-1.2 m/s² yavaşlama ivmelenmesi ile işletilmektedir [9]. Bununla birlikte, ECB sistemi, hattın eğiminin fazla olduğu konumlarda (binde 40 eğitimi gibi) mükemmel bir frenleme kuvveti sağlamakta ve frenleme kuvveti, ray mantarındaki deformasyonlardan etkilenmemektedir. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü (TCDD) tarafından 2013 yılında Siemens AG firmasından temin ettiği Velaro-D Serisi HT 80001 numaralı YHT setinde bulunan ECB sisteminin treyler boji üzerindeki genel görünümü Şekil-2'de gösterilmiştir.

Demiryolu Mühendisliği



Şekil 2. ECB sisteminin HT 80001 numaralı YHT setinde treyler bojsi üzerinde genel görünümü [9]

ICE 3 tipi yüksek hızlı trende bulunan fren sistemlerinin dağılımı [10], Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. ICE3 trenlerinde fren yönetimi [10]

İlk olarak enerjiyi yeniden üretmek için bir elektrodinamik fren kullanılır, ardından trenin fren performansını artırmak için ECB kullanılır, 50 km/h hızın altında bir disk fren ECB'nin yerine geçer. Fren gücünün iki veya üç fren çeşidi arasında dağıtılması da ECB kullanımındaki sıcaklık artışını azaltmaya ve fren balatalarının aşınmasını azaltmaya yardımcı olur. Saf ECB sisteminin kullanımı, güvenilir ve etkili bir işlem için iyi bir seçenek değildir, bu nedenle ECB'ye başka bir fren tipinin desteklenmesi gerekir. Rotanın özelliklerine göre uygun fren tipinin seçimi, yüksek performans elde etmek ve farklı fren tiplerinin çeşitli kullanımını azaltıcı etkisini azaltmak için önemli bir karardır [11].

4. ECB sistemi Kullanımının Avantajları ve Kısıtlamaları ile Bu Kısıtlamalara Yönelik Olası Çözümler

ECB sisteminin yüksek hızlı işletmede kullanılması, diğer fren türlerine kıyasla emniyet, kapasite, bakım ve maliyet açısından kar sağlar. Ancak, ECB sistemi üstyapıdaki bazı bileşenleri doğrudan etkilemektedir. Bu sistemin etkili şekilde kullanılması için demiryolu altyapı/üstyapı bileşenleri üzerindeki etkilerinin dikkate alınması gereklidir. Bunlar temel olarak, ray ısınması, bağlantı elemanlarına ve altyapı elemanlarına etkiyen gerilimler ve yol boyu sinyalizasyon ekipmanları ile manyetik uyumluluktur. Bu husus alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

4.1. Emniyet avantajı

Daha önce de belirtildiği gibi, geleneksel fren sistemleri, tekerlek ve ray arasındaki sürtünme kuvvetine bağlıdır. Tren hızlarının artırılması, hem acil durum hem de servis frenleri için gelişmiş fren gücü gerektirir. ECB sistemi, dinamik frenleme gibi diğer yöntemlerle elde edilmesi zor olan

ilave fren gücü sunar [12]. Bu da, düşük adezyona haiz yol koşullarında frenleme performansında bir kayıp sağlamaz. Böylece, acil fren veya servis freni esnasında istenen duruş mesafesi her koşulda sağlanır. Ayrıca, ECB sistemi uygulama tepki süresi geleneksel fren sistemlerinden daha kısadır [9]. Böylece ECB sistemine haiz trenlerde düşük ekipman gecikme süresi elde edilir. Bu husus, istenen duruş mesafesini sağlamaktadır.

4.2. Kapasite avantajı

Fren performansı, hat kapasitesi anlamında en büyük etkiye sahiptir. İki tren arası mesafenin hesaplanma şekli, kullanılan sinyal sistemine ve tipine bağlı olarak değişir. Aynı yönde işletilen ve birbirini takip eden trenler arasındaki mesafe, belirli bir süre içerisinde maksimum tren sayısı ile güvenli zaman çizelgesi işletilecek şekilde optimum olarak belirlenmektedir. Trenler arası mesafe, en az güvenli bir çalışma için takip eden trenin maksimum durma mesafesi kadar uzun olmalıdır. ECB sistemine haiz trenlerin kullanımı ile duruş mesafesi sürekli istenen düzeyde olacağından, bu durum hat kapasitenin artmasına ve trenlerin daha sık çalıştırılmasına katkı sağlayacaktır.

4.3. Bakım ve faydalı ömrü boyunca maliyet avantajı

ECB sistemi, temassız ve aşınmayan maruz kalmayan bileşenlerden oluşan bir fren sistemidir. Ray ve mıknatıs dizisi arasında belirli bir hava boşluğu olduğundan, sürtünmesiz çalışma sayesinde aşınma olmaz, bu da bakım maliyetinde azalma anlamına gelir. Knorr-Bremse, ECB sistemi olmadan çalışan A treni ve ECB sistemi ile çalışan B trenlerinin faydalı ömür maliyetini (LCC) karşılaştırmıştır [13]. Aşağıda Tablo 1'de görüldüğü gibi bojilerin % 50'si ECB sistemi ile donatılmış olan B treninin LCC'si, A trenininkinden % 45 daha düşüktür.

Tablo 1. Tren A ile Tren B'nin faydalı ömür maliyeti (LCC) karşılaştırması [13]

	Tren A (ECB olmayan)	Tren B (ECB'ye haiz)
E-c frenli boji oranı (%)	0	50
Disk/aks sayısı (ünite)	3	2
Boji fren ekipman maliyeti (%)	23	43
Bakım&yedek malzeme maliyeti (%)	77	12
Özet LCC (%)	100	55

Köln-Frankfurt yüksek hızlı demiryolu hattının ticari işletmeye açılmasından sonra, Alman Demiryolları (DB) ECB sistemi kullanımına ilişkin maliyet ve faydalarını araştırmıştır. 3 ay boyunca ICE3 trenleri ile 230 km/saat maksimum hızda treyler bojide bulunan fren balatalarında aşınma değerleri incelenmiş, ECB sistemi kullanımı ile balata tüketiminde %90'a yakın azalma tespit edilmiştir [9]. ECB sisteminin kullanılması halinde, bakım giderlerinde önemli miktarda tasarruf sağlanacağı görülmektedir.

4.4. Eddy-Current freniyle ray sıcaklığı problemi ve olası çözümler

ECB prensibinde, aracın kinetik enerjisi, ray üzerinde termal enerjiye dönüşmekte ve rayın sıcaklığı artmaktadır. Nötr sıcaklıktaki değişiklikler, basma gerilimi ya da çekme gerilimine sebep olmaktadır. Çekme gerilimi, hava sıcaklığı rayın nötr sıcaklığından daha az olduğunda (genellikle kış mevsiminde); basma gerilimi ise daha fazla olduğunda (genellikle yaz mevsiminde) meydana gelmektedir. Basma geriliminin belli değeri aşması halinde, bu durum yolun bükülmesine sebep olmaktadır.

UIC 720 numaralı standart [14] ve TCDD hat bakım el kitabında [15], sürekli kaynaklanmış raylarda (CWR) kritik ray sıcaklık limitleri tarif edilmiştir. TCDD hat bakım el kitabına göre nötr ray sıcaklığı 27 °C, kritik ray sıcaklığı ise oturmuş hat (Balast yatağı bozulmamış ve stabil olmuş

Demiryolu Mühendisliği

hat) için 59°C 'dir. Bu sıcaklığın $+5^{\circ}\text{C}$ fazla olması halinde hatta 100 km/h hız kısıtlaması uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, ECB sistemi, Lokomotif ve Yolcu Araçları için Karşılıklı İşletilebilirlik Teknik Şartnamesinde 50 km/h hızın altında düşük fren kuvveti ve yüksek çekim kuvveti oluşturduğundan kullanılması tavsiye edilmemektedir [16].

Ray sıcaklığı 40°C 'den fazla olursa, rayların ECB veya dış kuvvetlere maruz kaldığını gösterir ve raylarda bükülmeye sebep olabilir. Bu sebeple, ECB sistemine haiz trenlerin kullanıldığı demiryollarında frenin daha yaygın olarak yapıldığı istasyon girişleri, yüksek eğimler, hemzemin geçitler ve sinyal ışıkları öncesi gibi kritik noktalardaki kritik ray sıcaklıkları, ray sıcaklığını ölçen ekipmanlarla takip edilmelidir.

TCDD demiryollarında kullanılan üstyapı elemanları ve hat bakım el kitabında yer alan koşullar dikkate alınarak Knorr-Bremse firması tarafından yapılan değerlendirme sonrasında [9], Şekil-4'te yer alan üstyapı elemanlarına değerleri ile ECB sisteminin çalışmasının uygun olduğu tespit edilmiştir.

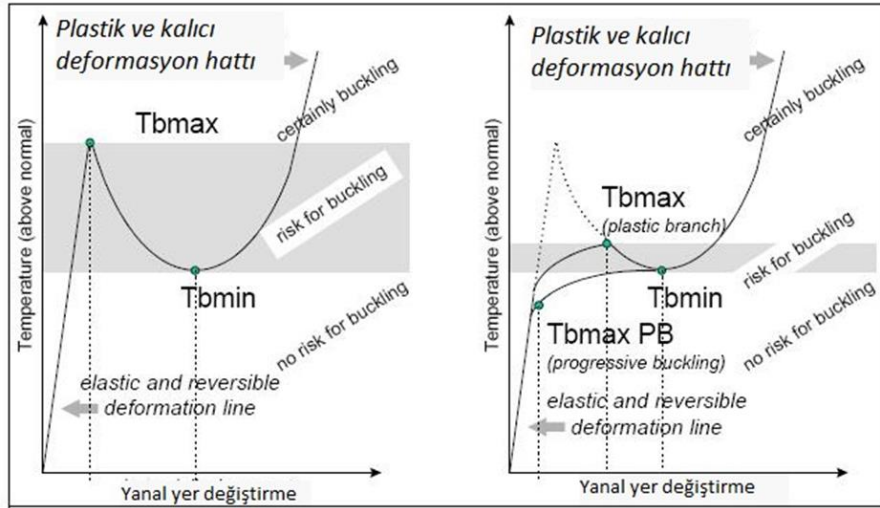
Kısaltması	Başlık	Ayırma	Minimum	Maksimum	Uygunluk
q	Yanal aks hareketi	ECB	-8	+8	✓
TPTR	Ray rotundan ray tepesine	ECB	110	193	✓
TPL	Ray rotu uzunluğu	ECB	1394	1394	✓
DM	Magnetlerin mesafesi	ECB	766	766	✓
MW	Magnet genişliği	ECB	130	130	✓
GG	Ray açıklığı	IS	1435	1465	TCDD ✓
HCR	Kontrol rayı yüksekliği	IS	kontrol rayı yok		TCDD ✓
α	Ray eğimi	IS		1/40	TCDD ✓
	Ray ölçümü	IS		22,5 t	TCDD ✓
d	Enlemesine aks hareketi	Boji	1416	1435	✓
	Yanal aks hareketi	Boji	-5	+5	✓

Şekil 4. ECB sisteminin TCDD demiryolu üstyapı parametreleri ile olan uyum değerlendirmesi [9]

ECB ile oluşan ray üzerindeki çekme kuvveti sonrası oluşan aks yükü artışının 2,8 ton olduğu [9], YHT setlerinin aks yükünün TSI 250 km/saat hız üzerinde 17 ton olduğu [16] dikkate alındığında hattın aks yükünün izin verilen limitler dahilinde kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ECB tarafından uygulanan 105 kN'luk servis fren kuvveti uygulaması durumunda, rayların ortalama sıcaklığının $+1,7^{\circ}\text{C}$; 180 kN'luk acil fren uygulaması halinde rayların ortalama sıcaklığının $+3^{\circ}\text{C}$ artacağı tespit edilmiştir [9]. Bu değer, TCDD hat bakım el kitabına göre izin verilen kritik ray sıcaklığı altında kaldığından, ECB sistemine haiz trenin kritik ray sıcaklığına etkisi göz ardı edilebilir.

Ray sıcaklığı ve ray gerilmesi, olumsuz sonuçlara engel olmak için kritik durumları ve yerleri belirlemek üzere düzenli olarak takip edilmelidir. Sıcaklık artışı problemi çözmek için uzmanlar, altyapıda iyileştirmeler yapılmasını ve farklı fren sistem türleri arasında frenleme kuvvetinin dağıtılmasını önermişlerdir.

Öncelikle, yolun direncini artırmak üzere iyileştirmeler yapılmalıdır. Balastlı yolun yanal rijitliği betonarme yolunkinden daha az olduğu için, bu durum balastlı yolun bükülme riskini artırmaktadır. Daha yüksek ray sıcaklıklarına izin verebilmek için Betonarme yolların kullanılması önerilmektedir [17]. Balastlı yol kullanıldığında emniyetli işletmecilik sağlamak için işletimle ilgili kısıtların kontrol edilmesi gerekmektedir. Yüksek hızlı demiryollarında ECB sistemine haiz trenlerin kullanabilmek için bazı iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu iyileştirmeler, travers başlarının önündeki balastın genişletilmesi ve B90 tipi traversler gibi daha yüksek ve ağır traverslerin monte edilmesini içerebilir. Ayrıca, balast kalitesi de bükülme riskini etkilemektedir. Balast kalitesi kötü ise düşük yanal dirençten ötürü bükülme riski artar [18].



Şekil 5. (a) iyi balast ve (b) kötü balastta yanal yer değiştirme ve sıcaklık grafiği [18]

Örneğin, Hint demiryollarında rayın sıcaklığı sık sık nötr sıcaklığın üzerine çıkmaktadır. Bunun sonucunda rayın serbest genişlemesi ve büzülmesini sınırlandırmak üzere elastik bağlantı elemanları olan ön gerilmeli beton traversler üzerinde sürekli kaynaklı raylar (CWR) kullanılmaktadır. Ray bükülme eğiliminde olsa bile balast, traversler ve ray arasındaki direnç, bükülmeye yönelik hareket etmez ve yol istikrarlıdır. Benzer uygulama Türkiye'deki hızlı tren hatlarımızda da kullanılmaktadır.

Ancak, betonarme yol, ECB sistemine kısıtlama olmadan kullanımına izin vermektedir [19]. Rijit betonarme yol, çok daha yüksek miktarda ekstra kuvvetleri sönmüleyebilmektedir [20]. Örneğin, Köln-Frankfurt ve Nürnberg-Ingolstadt yüksek hızlı demiryolu hatlarında frenleme kuvvetleriyle raylardaki gerilme ısısına direnmek üzere betonarme yollar kullanılmıştır. Diğer taraftan, betonarme yola kıyasla, üstyapısı balastlı yol kullanmanın avantajı düşük yapım maliyetidir. Betonarme yol ya da balastlı yolun üstyapısında ECB kullanma olasılığı bulunsa da kabul edilebilir ray sıcaklığı artışı ve ray gerilmesi doğru şekilde belirlenmelidir.

4.5. Hat boyu sinyalizasyon ekipmanları problemleri ve olası çözümler

ECB sistemini bir demiryolu hattında kullanmak için, sinyalizasyon sistemleri ve bileşenleri ile olan uyumunun kontrol edilmesi gerekir. Aksi takdirde elektromanyetik etkileşimler sonucu sinyal sisteminin yönetiminde karışıklık ve bozulmalar olabilir. ECB sisteminin bilinen avantajlarından sonra, hat boyu sinyalizasyon ekipman üretici şirketleri ECB kullanımına uygun ekipmanları üretmeye başlamışlardır. ECB ile uyumlu ve manyetik alan problemlerinin üstesinden gelebilecek yeni tasarım ürünleri, istenmeyen sonuçları önlemek için kullanılmalıdır.

Knorr-Bremse ile yapılan çalışmalar sonrasında [9], TCDD demiryolu hatlarında yer alan FTGS-917 tipi ray devreleri ile ETCS Seviye 1 sisteminde bulunan ALTRAC 6413 balizleri ile ECB sisteminin uyumlu olarak çalışabileceği tespit edilmiştir.

5. Metot

Bu makalede, HT 80001 numaralı YHT setinin ECB sistemi kapalı ve açık iken 300 km/saat işletme hızında kullanılması halinde elde edilecek trafik kapasitesine etkisi teorik hesaplamalarla gösterilmiştir. Devamında, ECB sistemine haiz YHT setinin 300 km/saat hızda kullanım sıklığına göre ray üzerinde oluşturacağı sıcaklık artışı ve ray uzaması teorik olarak hesaplanmıştır.

6. Bulgular

6.1. ECB fren sisteminin hat kapasitesine olan etkisinin hesaplanması

Bu bölümde Ankara – Konya YHT hattında teorik kapasite hesabı karşılaştırması yapılacaktır. İlk olarak, asgari trenler arası mesafe ile saatte çalışan azami tren sayısı geleneksel fren sistemine göre hesaplanmıştır. Devamında, ECB kullanılması durumunda hat kapasitesi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki tabloda yer alan HT 80001 numaralı YHT setinin özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 2. HT 80001 numaralı Siemens YHT setinin genel özellikleri [25]

Üretici	Siemens AG
Tren uzunluğu (m)	200,7
Vagon sayısı (adet)	8
Dolu ağırlık (ton)	495
Teker çapı (aşınmamış) (mm)	920
Yavaşlama ivmelenmesi (servis freni) (300-0 km/h) (m/s ²)	0.65
Yavaşlama ivmelenmesi (servis freni) (210-0 km/h) (m/s ²)	0.7
Yavaşlama ivmelenmesi (servis freni) (160-0 km/h) (m/s ²)	1.1
Yolcu sayısı (kişi)	444

Geleneksel fren sistemlerinde, yavaşlama ivmelenmesi her hızda sabit değildir, çünkü yüksek hızlarda adezyon katsayısı düşüktür. Bu nedenle, hız azaldıkça yavaşlama ivmelenmesi artar. TSI gereklerine göre tam servis frenlemesi (180 kN) halinde, farklı hız aralıklarında HT 80001 numaralı YHT setinin ivmelenme oranları Tablo-2'de verilmiştir. Bu değerlere göre, HT 80001 numaralı YHT setinin tam servis frenlemesi ile sadece Pnömatik ve elektrodinamik fren sistemi kullanılması halinde fren mesafesi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$FM = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \times a} \quad (1)$$

Burada FM fren mesafesi; V hız; a yavaşlama ivmelenmesidir.

$$300 \text{ km/h} = 83,33 \text{ m/s}; 210 \text{ km/h} = 58,33 \text{ m/s}; 160 \text{ km/h} = 44,44 \text{ m/s}$$

$$FM1 = \frac{83,33^2 - 58,33^2}{2 \times 0,65} = 2617 \text{ m} \quad (2)$$

$$FM2 = \frac{58,33^2 - 44,44^2}{2 \times 0,7} = 1410,7 \text{ m} \quad (3)$$

$$FM3 = \frac{44,44^2}{2 \times 1,1} = 897,7 \text{ m} \quad (4)$$

$$FM = FM1 + FM2 + FM3 = 4925,38 \text{ m} \quad (5)$$

Trenin seri fren uygulanması halinde, fren mesafesi 4925,38 m olarak hesaplanmıştır.

Gerçekte, ECB sistemi 50 km/saat hıza kadar trenin frenleme kuvvetine katkı sağlar. 50 km/saat hızın altında ECB yerine pnömatik fren sisteminin devreye girdiği bilinmektedir. Ancak, yavaşlama ivmelenmesinin düşük hızlarda maksimum düzeyde olacağı düşünülerek, hesaplamada, YHT setinin yavaşlama ivmelenmesi 300-0 km/saat arasında sürekli olarak ortalama 0,8 m/s² olarak alınmıştır [9]. Bu kabullere istinaden trenin seri fren mesafesi aşağıdaki gibidir:

Demiryolu Mühendisliği

$$FM = \frac{v^2}{2 \times b} = \frac{83,33^2}{2 \times 0,8} = 4340 \text{ m} \quad (6)$$

ECB sistemine haiz trenin seri fren uygulanması halinde, fren mesafesi 4340 m olarak hesaplanmıştır.

ETCS Seviye 1/2 sisteminin kullanıldığı Ankara – Konya yüksek hızlı demiryolu hattının TCDD Şebeke Bildirimi Ek 3.3 Şebeke Teknik Özelliklerine göre Ankara-Konya arası çift hatta tek yönde tren kapasitesi 81 tren/gün, 4,5 tren/saattir. [24]. Yüksek hızda trenler arası güvenli bir takip mesafesi sağlayabilmek için, modern sinyalizasyon sistemlerinde yaklaşık 10,000 m tam servis fren mesafesi (sabit blok mesafesi) kullanılmaktadır [22]. Sanal blok uygulamasının dikkate alındığı ETCS Seviye 3 sisteminin ilgili hat kesiminde kullanılması halinde, iki tren arası takip mesafesi olarak fren mesafesi+tren uzunluğu+ilave marjin dikkate alındığında yukarıda yapılan hesaplama gereği ECB fren sistemine haiz YHT setinin kullanımı ile ilgili hat kesiminde yaklaşık %12 oranında kapasite artışı sağlanabilir (kapasiteyi kısıtlayacak hususlar göz ardı edilmiştir). Dolayısıyla, TCDD Şebeke Teknik Özelliklerine göre Ankara-Konya arası çift hatta tek yönde tren kapasitesi 90 tren/gün, 5 tren/saat olarak kullanılabilir (ETCS Seviye 3 sisteminin kullanımı halinde hat kapasitesinin mevcut kapasite ile sınırlandırılacağı varsayılmıştır).

6.2. ECB sisteminin bakım maliyetine olan etkisinin hesaplanması

YHT setlerinde genelde sinterli fren balataları kullanılmaktadır. Bu balataların genel ömrü, kullanıldığı rota, makinist davranışları, motorlu/treyler boji, iklim koşulları vb. koşullara göre değişkenlik göstermek ile birlikte genel olarak 100.000 km civarındadır. Yüksek hızlı trenlerde kullanılan bir balata fiyatının ortalama 1800 Euro olduğu, bu setin yıllık ortalama 300.000 km yaptığı, HT 80001 numaralı YHT setinde treyler bojilerde ECB sistemi olduğu varsayılarak motorlu bojilerde bulunan 64 adet balata tüketimi halinde Demiryolu Tren işletmecisinin yıllık balata için ödediği bedel 345.600 EURO olacaktır. Alman Demiryolları (DB) tarafından 3 ay boyunca ICE3 trenleri ile yapılan test sonucunda ECB sistemine haiz tren ile balata tüketiminde %90 oranında aşınmada azalma olduğu dikkate alındığında [9], yıllık balata sarfiyatı için ödenecek bedel 34.560 EURO olacak, tren işletmecisinin her sene sadece balata malzeme bedelinden 311.040 EURO kar elde edeceği öngörülmektedir.

6.3. ECB sisteminin ray sıcaklık artışına ve ray uzamasına olan etkisinin hesaplanması

Ray sıcaklığı hava sıcaklığı, güneş ışığı, diğer yapılarla etkileşim ve kullanımı halinde ECB ile artar. Özellikle hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında güneş ışığı ile birlikte ray sıcaklığı yaklaşık 30 °C - 40 °C arasında olur. TCDD hat bakım el kitabına göre izin verilen ray sıcaklığı 59 °C olduğu belirtilmiştir [15].

Teorik ray sıcaklık artışı hesabı şu şekilde yapılmıştır:

Trenin kinetik enerjisi;

$$Ek = \frac{1}{2} \times 495 \times 83,33^2 = 1.717.375,25 \text{ joule} \quad (21)$$

Isıl enerji dağıtımının, raya uygulanan frenin her bölümünde eşit olduğu varsayılmaktadır. 300 km/h hızda ECB sistemine haiz trenin fren mesafesi önceki bölümlerde 4340 m olarak hesaplanmıştır.

Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu hattında kullanılan ray ağırlığı 60,21 kg / m'dir. Raya uygulanan ECB frenin toplam ağırlığı:

Demiryolu Mühendisliği

$$Raya uygulanan ağırlık = \frac{60.21 \text{ kg}}{m} \times 4340 \text{ m} = 261.311,4 \text{ kg} \quad (22)$$

Termodinamik 1.yasasına göre trenin kinetik enerjisi termal enerjiye eşit kabul edilir. Ancak, [8] numaralı makalede belirtildiği üzere ECB freni diğer frenler ile beraber kullanıldığı için ortalama yavaşlama ivmelenmesi değerine %25 oranında katkı sağladığı varsayılarak, ray üzerine aktarılan termal enerji değeri aşağıda hesaplanmıştır. (Termal konveksiyonu etkileyen rüzgar, sıcaklık vb. değerler göz ardı edilmiştir.)

$$Et = 429.343,8 \text{ joule} \quad (23)$$

Çeliğin spesifik ısısı olarak kabul edilen rayın özgül ısısı $500 \text{ j / kg } ^\circ \text{C}$ 'dir ve termal enerji formülü aşağıdaki gibidir:

$$Et = m \times c \times \Delta T \quad (24)$$

$$429.343,8 = 261.311,4 \text{ kg} \times 500 \text{ j/kg}^\circ \text{C} \times \Delta T \quad (25)$$

$$\Delta T = 3,3^\circ \text{C} \quad (26)$$

ECB fren sisteminin seri frende kullanılması halinde anlık ray üzerindeki sıcaklık artışının $3,3^\circ \text{C}$ olduğu hesaplanmıştır. Bu değer, Knorr-Bremse tarafından 180 kN fren kuvveti uygulanarak anlık $+3^\circ \text{C}$ sıcaklık artışı hesabına [9] yakın olduğu görülebilir.

Yukarıda öngörülen hattın %12 oranında kapasite artışı ile tek yönde saatte ilave yaklaşık 1 adet YHT seti kullanılabilir. Bu setlerin ECB sistemi kullanarak fren yapması halinde ilgili hat kesiminde ortalama 5°C ilave sıcaklık artışı olacağı hesaplanmıştır [23].

Rayın uzama miktarı aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$\text{Uzama } e(\text{mm}) = \text{uzunluk (mm)} \times \text{sıcaklık artışı}(\text{}^\circ \text{C}) \times \text{uzama katsayısı} \quad (27)$$

Ray çeliği için termal uzama katsayısı $0,000011 \text{ mm/}^\circ \text{C}$ 'dir.

TCDD yüksek hızlı demiryolunda tek yönde saatte 1 adet ECB sistemine haiz yüksek hızlı trenin seri freni uygulaması halinde (180 kN), seri fren yaptığı yol boyunca kritik ray sıcaklığının $4,9^\circ \text{C}$ artacağı bilgisinden yola çıkarak servis freni uygulayan ECB sistemine haiz trenin duruş mesafesi olan 4340 m rayda genleşme miktarına etkisi şu şekilde bulunur:

$$e = 4340 \times 1000 \times 4,9 \times 0,000011 = 233,9 \text{ mm} \quad (28)$$

Toplam raydaki uzama miktarı $233,9 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır. 2 yönde uzama miktarı $116,93 \text{ mm}$ 'dir.

Tek yönde ECB sistemine haiz saatte ilave 1 adet YHT setinin seri fren uygulaması halinde raydaki uzama miktarı:

$$e = 4340 \times 1000 \times 10 \times 0,000011 = 477,4 \text{ mm} \quad (29)$$

olarak hesaplanır.

7. Sonuç ve Yorum

ECB sistemine haiz trenleri bir güzergahta uygulamadan önce, demiryolu hattının elektromanyetik ve mekanik parametreleri analiz edilmeli ve uygulanabilirliği ayrıntılı olarak incelenmelidir. Teorik hesaplamalar sonucunda ECB sistemi olan trenler ile ETCS Seviye 3

sistemi ile işletmecilik yapıldığında tek yönde saatte hat kapasitesinde yaklaşık %12 oranında artış sağlanmaktadır. Bununla birlikte, ECB sisteminin aktif olarak kullanılması sayesinde sadece balata sarfiyatında ortalama %90 oranında azalma ve yıllık 1 tren setinde yaklaşık 311.040 EURO tasarruf etmek mümkündür. ECB kullanımı ile yaşanacak ray sıcaklığında ısınmayı hattın karakteristiklerinde bozulma sağlamadan koruyabilmek için frenin daha yaygın olarak yapıldığı istasyon girişleri, yüksek eğimler, hemzemin geçitler ve sinyal ışıkları öncesi gibi konumlarda kritik ray sıcaklıkları, ray sıcaklığını ölçen ekipmanlarla takip edilmelidir. Ankara – Konya YHT hattı için HT 80001 no.lu setin ECB dahil fren uygulaması halinde, duruş mesafesindeki rayda anlık 4,9 °C sıcaklık artışı ve 477,4 mm ray uzaması olacağı hesaplanmış olup, bu değer TCDD hat bakım el kitabında belirtilen limitler içerisinde kaldığından göz ardı edilebilir. İlgili hat kesiminde kritik ray sıcaklığına ulaşıldıysa, bu veri anlık olarak o konumdan geçecek sonraki trenlere aktarılarak frenlemenin ECB kapalı şeklinde diğer fren tiplerine dağıtılması, sefer aralarında sadece konvansiyonel tipte fren sistemine haiz trenlerin kullanılması, demiryolu hattında daha iyi rijitlik ve termal performans sağlamak için betonarme yol kullanımı bu problemi bertaraf edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın oluşturulmasında katkı sağlayan Knorr-Bremse, Siemens firmaları ile TCDD ve TCDD Taşımacılık A.Ş.'nin ilgili birimlerine teşekkür ederiz.

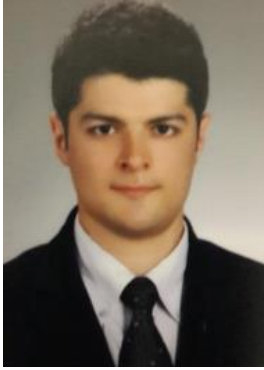
Kaynakça

- [1] Ray Haber. (2012, Mayıs). (Online) Available <https://rayhaber.com/2012/05/tgv-hiz-rekoru-574-km/> (20 Aralık, 2019 tarihinde erişildi)
- [2] Wikipedia. (2019, Aralık). (Online). Available. https://en.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Foucault (20 Aralık 2019 tarihinde erişildi)
- [3] Knorr Bremse. (Şubat, 2011). (Online) https://www.knorr-bremsecvs.com/ro/_meta/pressreleases/press_detail_2560.jsp (20 Aralık, 2019 tarihinde erişildi)
- [4] Sakamoto, Y. (2009). 'Development of an Eddy Current Rail Brake Derived from Linear Motor Technology'. Railway Technology Avalanche. vol. 29. December. p. 172.
- [5] Railway Gazette. (Ekim,2018). (Online) Available <https://www.railwaygazette.com/asia/400-km/h-alfa-x-experimental-train-to-roll-in-2019/47307.article> (20 Aralık, 2019 tarihinde erişildi)
- [6] Railway Gazette. (2008, Haziran). (Online) Available <https://www.railwaygazette.com/in-depth/eddy-current-braking-a-long-road-to-success/32992.article> (20 Aralık, 2019 tarihinde erişildi)
- [7] Enacademic. (2011) (Online) Available. <https://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/295147> (20 Aralık 2019 tarihinde erişildi)
- [8] Jang, S.-M., Jeong, S.-S. and Cha, S.-D. (2001). 'The Application of Linear Halbach Array to Eddy Current Rail Brake System'. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. vol. 37. no. 4. July. pp. 2627-2629
- [9] 21 Kasım 2013 tarihinde Knorr-Bremse tarafından Cer Dairesi Başkanlığına yapılan sunum
- [10] Schopf, D.M. (2008). 'Eddy Current Brake - An innovative wear-free braking system independent from wheel-rail adhesion'. Amsterdam 2008 Highspeed 6th World Congress on High Speed Rail. Amsterdam. 1-10.
- [11] Kim, S., Jang, K., Lee, J. and Lee, H. (2010). 'A study on the optimal brake force distribution of a high-speed railroad'. International Federation of Automotive Engineering Societies. FISITA World Automotive Congress 2010 Budapest, Hungary 30 May – 4 June 2010, Volume 1 of 5.
- [12] EIM (2009). 'EIM Position Paper on The Use of Eddy Current Track Brakes'.
- [13] Schofield, K. (2002). 'Overview of Magnetic Brakes'. Rail Safety & Standards Board Research Programme. no. ITLR/T11315/001.
- [14] UIC 720 (2005, Mayıs). "Laying and Maintenance of CWR Track" 2. Sürüm
- [15] TCDD, (2013). TCDD Hat Bakımı El Kitabı, TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, Ankara
- [16] TSI LOC&PAS 2014 (2014), Commission Regulation (EU) No 1302/2014 of 18 November 2014 concerning a technical specification for interoperability relating to the 'rolling stock — locomotives and passenger rolling stock' subsystem of the rail system in the European Union Text with EEA relevance OJ L 356, 12.12.2014, p. 228–393

Demiryolu Mühendisliği

- [17] Emery, D. (2009). Reducing the headway on high-speed lines. 9th Swiss Transport Research Conference. Monte Verita / Ascona.
- [18] Esveld, C. (1991). Improved Knowledge of CWR Track. Ağustos, 2011. [Online], Available: http://www.esveld.com/Download/TUD/D202_Paris_98.PDF (20 Aralık, 2019 tarihinde erişildi)
- [19] Halcrow, S. C. (2009, June). Rail Operations and Technology- Part 2- Technology- Final Report. Brazil TAV Project, 4(TAV-HA-OPE-REP-40034-01).
- [20] WP300. (2006, December 19). Feasibility Study Concerning High-Speed Railway Lines in Norway. (V. V. GmbH, Dü.) 200 602 481.
- [21] TCDD Indra trafik yönetim sisteminde yer alan Siemens Velaro D teknik özellikleri
- [22] Connors, P. High Speed Railway Capacity. (Aralık, 2014). (Online), <http://www.railway-technical.com/books-papers--articles/high-speed-railway-capacity.pdf> (20 Aralık 2019 tarihinde erişildi)
- [23] ECUC, Eddy Current brake Compatibility Project, 31 Ağustos 2015, DELIVERABLE D.6.4 Engineering Guidelines for Tracks, FP7 TRANSPORT
- [24] TCDD Şebeke Bildirimi 2021, Şebekenin Teknik Özellikleri, [Online], Available <http://www.tcdd.gov.tr/files/sebekebildirimi/2021//33.pdf> (20 Aralık 2019 tarihinde erişildi)
- [25] MVA/Systra (2011), HS2 Final Report, Appendix B. <https://www.whatdotheyknow.com/request/305883/response/797442/attach/4/2011%2010%2020%20Capacity%20Technical%20Note%20Final%201.1%20Private.pdf> (October, 2011), Available. (Online) (20 Aralık 2019 tarihinde erişildi)

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 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.