



Raylı Sistem Araçlarında Yüksek Hızlı Yük Taşımacılığı İçin Düz Yol ve Kurp Şartları İçin Araç Tekerlek Bileşeninin Gerilme Analizi

Yasin SARIKAVAK^{ib}

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

ysarikavak@ybu.edu.tr

(Alınış/Received: 01.05.2023, Kabul/Accepted: 12.06.2023, Yayımlama/Published: 31.07.2023)

Öz: Yüksek hızlı tren işletmeciliği için yolcu taşımacılığı son yıllarda ülkemizde hızla yaygınlaşmaktadır. Dünyada yüksek hızlı tren işletmeciliği yapılan bazı ülkeler bu hatlarda yüksek tonajlı kargo yüklerini yüksek hız ile taşımaktadır. Artırılmış aks ve tekerlek yükleri, yüke, frenleme koşullarına ve hıza bağlı oluşan diğer dinamik etkiler demiryolu araç tekerleklerinin tasarımında zorlukluklar oluşturmaktadır. Buna göre yüksek hız ve artırılmış kargo yükleri altında tekerlek bileşeninin gerilme ve yerdeğiştirme durumlarının analizi güvenli işletmecilik açısından önemlidir. Bu kapsamda bu çalışmada dinamik yüklerin yanısıra, yüksek hızlı yük taşımacılığı koşulları altında oluşan dinamik yük, hız ve frenleme parametreleri altında demiryolu tekerleklerinin gerilme analizi düz yol ve dar kurplu işletme şartları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan analizler sonucu tekerleklerde oluşan gerilme değerlerinin malzemenin akma sınırının üzerinde olduğu ve olası yük taşımacılığında, yeni sistemlerde mukavemeti yüksek alternatif malzemelerin kullanılması gerekliliği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Monoblok tekerlek, Yüksek hız, Yük taşımacılığı, Sonlu elemanlar analizi, Gerilme analizi

Stress Analysis of Vehicle Wheel Component of Rail System Vehicles for Plain and Curved Rail Cases in High-Speed Freight Transport

Abstract: In recent years high-speed train operation in passenger transportation has become widespread in Türkiye. Some countries that operate high-speed trains in the world transport high-tonnage cargo loads with higher speeds on these lines. Increased speeds, axle and wheel loads results with extra load, harsh braking conditions and other dynamic effects that creates difficulties in the design of railway vehicle wheels. Accordingly, the analysis of the stress and displacement conditions of the wheel component under high speed and increased freight loads is important for safe operation. In this context, in this study, stress analysis of railway wheels was simulated using the finite element method under load, speed and braking parameters specifically for high speed freight transport conditions for plain and narrow curved road conditions as well as other dynamic loads. As a result it was concluded that the stress values formed in the wheels are above the yield limit of the material and it is necessary to use alternative materials with high strength for next generation systems impossible high-speed freight transportation.

Keywords: Monoblock wheel, High speed, Freight transport, Finite element analysis, Stress analysis

1. Giriş

Demiryolları hatları son yıllarda ülkemizde önemli ölçüde artmıştır. Buna bağlı olarak şehirler arası işletilen trenler ve bu tren dizilerinin işletme frekanslarında önemli artışlar meydana gelmiştir. Demiryolu araçlarında altyapı ile etkileşim halinde olan kritik parçalar yer almaktadır ve bu bileşenlerin güvenlik, dayanıklılık ve işletilebilirlik açısından teknik analizi güvenli ulaştırma açısından son derece kritiktir. Bu bağlamda demiryolu araç tekerlekleri yük ve yolcu taşımacılığında, konvansiyonel ve hızlı tren işletmeciliği için önemli bir demiryolu bileşenidir.

Atıf için/Cite as: Y. Sarıkavak, "Raylı sistem araçlarında yüksek hızlı yük taşımacılığı için düz yol ve kurp şartları için araç tekerlek bileşeninin gerilme analizi" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, pp. 109-120, July. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1290599

Demiryolu araçlarında doğrudan farklı kuvvetlerin etkisine maruz kalan tekerlekler araçtaki en kritik parçalardan biridir. Demiryolu araç tekerlekleri işletme şartlarında hasara ve kırılmalara sebep olan farklı yüklere ve ısıl etkilere maruz kalmaktadır. Tekerlekteki hasarlar genel olarak üç tip yük altında oluşabilmektedir. Bunlar, yuvarlanma yüzeyindeki temas, frenleme etkisi ile oluşan ısıl yorulma ve mekanik etkilerdir [1]. Yüksek hızlı tren işletmeciliği yapan bazı ülkeler hatlarında yolcunun yanında yüksek hızlı yük taşımacılığı da yapmaktadır. Artırılmış kargo yükleri altyapı ve araç bileşenlerini zorlamakta ve güvenli işletmecilik açısından oluşan dinamik, frenleme ve temas yüklerinin dikkate alındığı çalışmalar güvenli işletmecilik için önem arz etmektedir. Buna göre literatürde tekerlek bileşeninin teknik analizi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Ramadan vd. [1] sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturduğu modelde bir demiryolu tekerleğinin farklı yükler altında ve farklı yüklemeye pozisyonlarında gerilim analizini yapmıştır. Yükleme şartları için literatürde yer alan farklı modeller simüle edilmiş ve tekerleğe temas eden yüklerin akstan aktarılan yükler olduğu sonucuna varılmıştır. Kabo ve Ekberg [2] tekerlek flanşında yer alan bir kusurun etrafında oluşan gerilme dağılımını elasto-plastik bir sonlu elemanlar modeli ile analiz etmiştir. Yapılan çalışmada kusurun boyutu ve şeklinin daha detaylı olarak araştırılması gereken parametreler olduğu değerlendirilmiştir. Kralçık vd. [3] tam ölçekli tekerlek ray testi ve çift diskli aşınma testi ile oluşan gerilme ve gerinim değerlerini incelemiştir. İki boyutlu sonlu eleman modeliyle simülasyonlar yapılmış ve deneysel veriler arasındaki ölçek faktörü değerleri incelenmiştir. El-Sayed vd. [4] dikey ve yanal tekerlek yüklerine maruz kalan demiryolu traverslerinin ve bağlantı elemanlarının sonlu elemanlar yöntemini kullanarak üç boyutlu analizini yapmıştır. Yanal yüklerdeki artış ray oturma yüzeyinde ve ray bağlantı elemanlarında bozulmalara neden olmakta, bu da güvenlik ve bakım maliyetleri açısından olumsuzluklar ortaya çıkarmaktadır. Çalışma yatay tekerlek yüklerinin etkilerini incelemekte ve daha düzenli sistemlerin tasarlanabilmesi için veri sunmaktadır. Nejad vd. [5] kalıntı gerilmelerin demiryolu tekerleklerinde yorulma çatlakları ilerlemesine etkisini incelemiştir. Yuvarlanma temas yorulma çatlakları ilerlemesi bir sonlu elemanlar modeli ile analiz edilmiştir. Model tekerlekte ısıl işlem ve mekanik yüklemeler sonucu oluşan gerilme parametrelerini ve çatlak ilerlemesini tahmin etmektedir. Elasto-plastik sonlu elemanlar modelinde farklı ısıl yükler altında tekerleğin yorulma ömrü araştırılmıştır. İşletme şartlarında mekanik etkiye bağlı von-Mises gerilme değerinin 604 MPa olduğu ve kritik çatlak uzunluğunun 37 mm olduğu ancak geometrik olarak bu değere pratik şartlarda ulaşmadan tekerleğin kırılacağı değerlendirilmiştir. Seo vd. [6] çalışmada üretim esnasında ve işletme şartlarında frenleme şartlarında oluşan kalıntı gerilmeleri incelemiştir. Çevrimsel yük sonlu elemanlar analizi yöntemi ile simüle edilmiştir. En yüksek kalıntı gerilmenin 320 MPa olduğu ve işletme şartlarında frenleme ile bu değerde sırasıyla üst ve alt noktada 60 MPa ve 40 MPa'lık artış olduğu görülmüştür. Arslan ve Kayabaşı [7] sonlu elemanlar analizi yönteminde demiryollarında en temel problemlerden olan temasının daha gerçekçi modellenmesi için gerekli adımları analiz etmiştir. Modelde yük akstan tekerleğe ve oradan raya aktarılmaktadır. Çalışma sonucu gerilim ve gerinim değerlerinin elde edildiği üç boyutlu tekerlek ve ray modeli, iki boyutlu simetrik eksenel modele göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Yongming vd. [8] tekerlekler için çok eksenli bir yorulma modeli geliştirmiştir. Üç boyutlu elasto plastik sonlu elemanlar modelinde gerilme analizi yapılmıştır. Yorulma çatlakları oluşumunda ve kullanılan modelde tekerlek çapı, dikey yükler, malzeme sertliği, malzemenin yorulma özellikleri dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda modellerin doğrulanması için daha fazla genişletilmiş deneysel veriye ihtiyaç olduğu değerlendirilmiştir. Hem sertlik değerinin hem de dikey yüklemenin tekerlek üzerindeki değişime etkisinin aynı anda değerlendirildiği ve lineer olmayan daha pek çok farklı değişkenin etkisinin araştırıldığı daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Masoudi Nejad [9] demiryolu tekerleklerinde kalıntı gerilmeleri analiz eden bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Çalışmada monoblok tekerleklerde ısıl işleme bağlı oluşan gerilme değerleri analiz edilmiştir. Tekerlek üretiminde su verme ve tavlama işlemleri simüle edilmiştir. Çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları saha verileriyle doğrulanmıştır. Demiryolu tekerleklerinde kalıntı gerilmelerin yorulma ömrü için önemli bir parametre olduğu ve bu değer

553 MPa'a eriştiği görülmüştür. Toumi vd. [10] sürtünme altındaki tekerlek ray yuvarlanma temasını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Liangliang vd. [11] yüksek hızlı trenlerde tekerleklerde oluşan apletinin oluşturduğu kuvvetler ve gerinim oranını sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırmıştır. Çalışmada işletme şartlarında oluşan tekerlek yükü statik aks yüküne göre tekerlekte apleti olsun veya olmasın en az iki kat büyüklükte olduğu analiz edilmiştir. Xiongfei vd. [12] düz rayda tekerlek ray tepkisinin dinamik modellemesini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Çalışmada en yüksek temas kuvvetinin ve Von Mises gerilmelerinin işletme hızının artmasıyla arttığı görülmüştür. Bunun yanında en yüksek temas basıncının ve yanal gerilmelerin hızın artmasıyla azaldığı görülmüştür. Tekerlek ray temasında Hertz temas teorisinin elastik temas şartları için hala etkin sonuçlar verdiği fakat elastik ve plastik temas koşulları için sonlu elemanlar analizi yönteminin daha doğru sonuçlar elde edebilmek için ilk seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Zulkifli vd. [13] demiryolu tekerleklerinin farklı yüklenme şartlarında sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmıştır. Xin vd. [14] tekerlek takımının demiryolu ayırımı noktalarında dinamik analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmiştir. Yüksek hızlı yük taşımacılığı gibi artırılmış yüklenme şartlarında demiryolu tekerlek ve ray malzemeleri için gelişmiş mekanik özellikler gösteren beynitik mikroyapıdaki çeliklerin uygulanabilirliği halen yoğun olarak araştırılmaktadır [15-18]. Boehm vd. [19] Avrupa ölçeğinde, yük taşımacılığının karayolu tırlarından, yüksek hızlı demiryolu hatlarına değişimi durumunu analiz etmiştir. Buna göre karayolu taşımacılığıyla kıyaslandığında, yüksek hızlı demiryolu yük taşımacılığında maliyetlerin %70 oranında arttığı ancak CO₂ emisyonlarının %80 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla çevre dostu işletmecilik açısından yük taşımacılığında da yüksek hızlı demiryolu dikkate değer bir alternatif olarak gözükmektedir.

Bu çalışmada yüksek hızlı tren işletmeciliğinde kullanılan 0,85 m çapındaki monoblok tekerleklerin farklı işletme şartları altındaki gerilme analizi yapılmıştır. Farklı dinamik ve statik yüklenme koşullarında, işletme şartlarında demiryolu araç tekerleğinin temas koşulları ve diğer etkiler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Geliştirilen üç boyutlu model hem tekerleğe yuvarlanma yüzeyinden etkileyen yükleri hem de temas alanının geometrik özelliklerini dikkate almaktadır. Bunun yanı sıra yüksek hızlı yük işletmeciliği yapılan ülkelerde elde edilen yüklenme koşulları ve sınır şartları dikkate alınarak, mekanik etkiler sonucu oluşan gerilme durumu düz yol ve kurpta işletmecilik koşulları için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu çalışmada özellikle dünyada farklı ülkelerde uygulama alanı bulan raylı sistemlerde yüksek hız ile yük taşımacılığı düz yol ve dar kurplu şartlar için incelenmiştir.

2. Metot

2.1. Kullanılan malzemeler ve metot

Dünyada farklı uygulamalar olmakla birlikte Avrupa genelinde demiryolu araç dinamiğine ve altyapı şartlarına bağlı olarak tekerlek çapları farklı işletmeciler için 0,85 m to 1,10 m aralığında değişmektedir [20]. Buna göre, bu çalışmada ülkemizde yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan 0,85 m çapındaki monoblok tekerleklerin katı modeli oluşturulup sonlu elemanlar analiz yazılımına aktarılmıştır. Tekerlek çeliği 900 MPa çekme mukavemetine, 580 MPa akma gerilmesine sahiptir [21]. Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu sırasıyla 210 000 MPa, 0,3 ve 7850 kg/m³'dür [20-23]. Tekerlek ile etkileşim halinde olan ray malzemesi yüksek mukavemet gerektiren ve işletme frekansı yüksek olan hatlarda kullanılan UIC 60 profil ray çeliğinden oluşmaktadır [24, 25]. Buna göre tekerlek ve ray malzemesinin temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

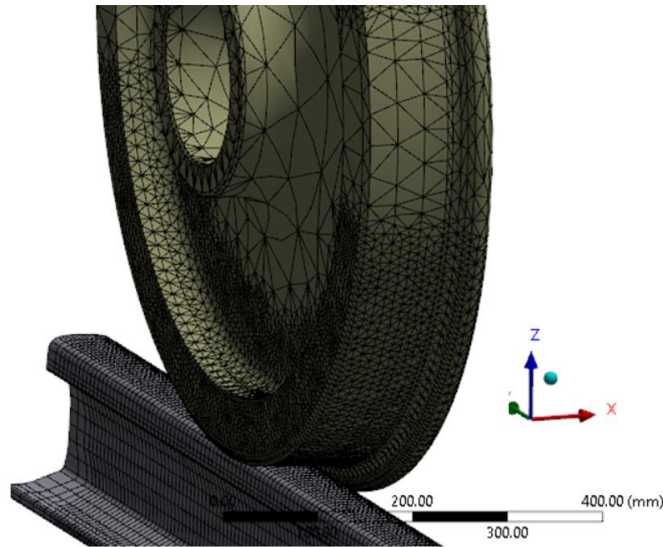
Tablo 1. Tekerlek ve ray malzemelerinin temel mekanik özellikleri [20-25]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Young Modülü (E) (GPa)	Poisson's Oranı (ν) (-)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Tekerlek	7850	210	0,3	900
Ray	7860	210	0,3	880

Yüksek hızlı yük taşımacılığının uygulandığı farklı ülkeler bulunmaktadır. Bunlar arasında Fransa'da işletilen TGV trenleri, Almanya'da işletilen ICE ve ayrıca Japonya ve İspanya'da da farklı hatlarda yüksek hızlı yük taşımacılığı yapılmaktadır [26].

2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme

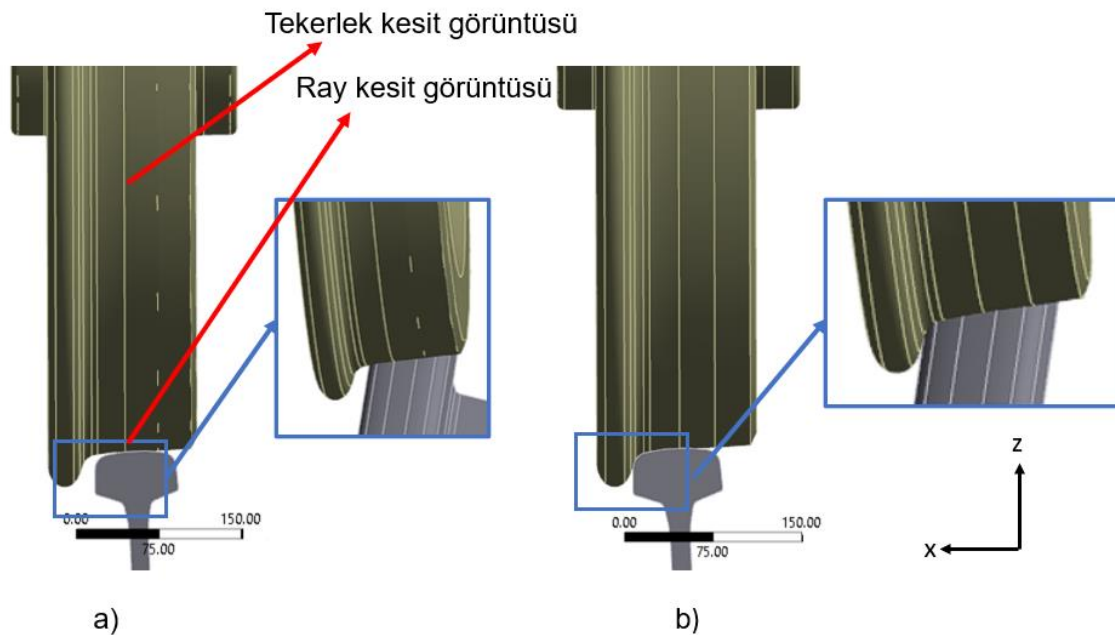
Tekerleğin temas koşulları sonlu elemanlar modelinde elastik plastik şartlarda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ile analiz (SEA) yöntemi gerçek durumda meydana gelen yüklemeler ve çevresel koşulları içeren mevcut sınır koşullarının gerçekçi simülasyonu için etkin bir yöntemdir. İşletme şartlarındaki trenlerde her boji iki akstan oluşmaktadır ve akstan aktarılan statik yük değeri tren seti üzerindeki yolcu veya ekipman yüküne, bileşenlerdeki süreksizliklere bağlı olarak değişmekle birlikte 70,49 kN'dur, traversler arası açıklık ise standartlar gereği 60 cm'dir [18]. Genellikle altyapı ve üstyapı bileşenleri için tasarım yüklemeleri yüksek tutulmaktadır. Ancak işletmecilik koşullarında işletme maliyetlerini ve bakım periyotlarını düşürmek için gerçek yüklemeleri daha düşük kalmaktadır. Geliştirilen modelde balast altı bileşenlerin bulunduğu yüzeyler, ray tabanı sabit bağlantı olarak tanımlanmış, tekerlek ve rayın -z ekseninde hareketi serbest bırakılmıştır. Tekerlek ve ray temas noktalarında analiz hassasiyeti için atanan ağ sayısı fazladır. Böylece temas olmayan noktalarda daha kaba eleman atanmışken, tekerlek ray temas noktasının olduğu bölgelerde analiz hassasiyeti için daha ince ağ atanmıştır. Buna göre modeldeki nokta sayısı 128564, eleman sayısı ise 52754'dür. Ağlara bölünmüş model Şekil 1'de yer almaktadır. Modelde ray taban yüzeyi seçilerek ray malzemesi sabitlenmiştir. Statik ve dinamik etkiler sonucu oluşan yatay ve dikey yükler tekerlek bileşenine tanımlanmıştır. Buna göre tekerlek aksının monte edildiği yüzeye dikey yük değeri, tekerlek flanşının iç yüzeyinden de yatay yük değeri tanımlanmıştır. Analizde yatay ve dikey tanımlanmış statik ve dinamik yük değerleri kademeli olarak (ramped effects) tekerleğe iletilmiştir.



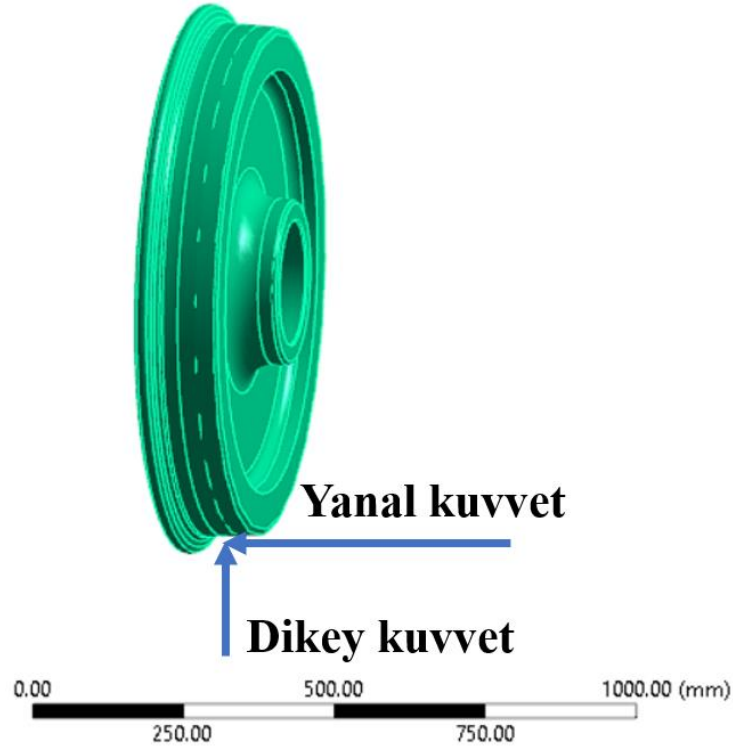
Şekil 1. Tekerlek-ray temas noktasında ince ağlara bölünmüş tekerlek modeli

Yüksek hızlı yük taşımacılığının yapıldığı Fransa’da yer alan veriler dikkate alındığında TGV trenleri için yük taşımacılığında oluşan kuvvetlerin yolcu taşımacılığında oluşanlara göre oldukça fazla olduğu analiz edilmiştir. Buna göre boş bir TGV vagonu tamamen yolcu ile yüklendiğinde ağırlığı ortalama %15 oranında artmaktadır. Ancak boş bir yük vagonu tam kapasite yüklendiğinde ağırlığının iki katına çıktığı anlaşılmaktadır. Bu fazladan yükler tasarım, imalat ve işletmecilik anlamında farklı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Referans alınan TGV trenleri 31 ton boş vagon yüküne sahiptir ve dinamik etkiler, frenleme, mekanik etkiler ve temas sonucu tekerleğe etkiyen yükün iki katına çıktığı belirtilmektedir [26, 27]. Hız ve farklı dinamik koşullara bağlı sınır şartları altında tekerlek bileşenine etkiyen yüklerin arttığı ve güvenli işletmecilik için tasarım ve işletme için belirli yük değerlerinin üzerine çıkılmaması gerektiği mevcut yüksek hızlı yük taşımacılığı yapan ülkelerin tecrübelerinden anlaşılmaktadır. Buna göre hızlı yük taşımacılığı için 30 ton aks yükü değerinin üzerinde güvenli taşımacılık şartlarından uzaklaşıldığı sonucuna varılmıştır [26]. Çalışmada yüksek hızlı yük taşımacılığı için 20 ton aks yükü altında 100 km/h hızda oluşan dinamik etkilerin 17 ton aks yükü ile 270 km/h hızda aynı etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [26]. Farklı çalışmalarda dinamik yükler altında tekerlek bileşenine gelen yük değerinin %40 oranında arttığı ifade edilmektedir [1]. Buna göre bu çalışmada geliştirilen tekerlek modeli doğrulandıktan sonra %40 artırılmış yük altında ve yüksek hızlı yük işletmeciliği dikkate alınarak yuvarlanma yüzeyinde oluşan temasa bağlı yüklemenin yanında, yüksek tonajda frenleme ve diğer mekanik etkilerle oluşan 149,45 kN yük altında oluşan gerilme değerleri düz yol ve dar karp şartları için analiz edilmiştir.

Şekil 2’de eğimli ray profili ve tekerlek malzemesinin kesit görüntüsü yer almaktadır. Oluşturulan bu katı modeller sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Tekerlek ile ray teması arasında sürtünme katsayısı modelde 0,35 olarak tanımlanmıştır [28]. Tren setindeki vagon yükü akslara aktarılmakta akstan da tekerleklere iletilmektedir. Buna göre yükler -z ekseninde tanımlanmış ve tekerlek ve ray bileşenlerinin bu ekseninde hareketi sınır koşulu olarak serbest bırakılmıştır. Şekil 3’de tekerlek malzemesinin yuvarlanma yüzeyine etkiyen yanal ve dikey kuvvetler görülmektedir. Düz yolda yüke bağlı olarak dikey kuvvet bileşeni etkin bir parametredir. Yol geometrisine, tekerlek veya altyapıda olan kusurlara bağlı olarak yanal kuvvet bileşeni değişiklik göstermektedir. Düz yolda temal sadece tekerleğin yuvarlanma yüzeyinde gerçekleşirken kurplu geometride temasın flanşın belirli bölgelerine de yayıldığı bilinmektedir.



Şekil 2. Modelde kullanılan tekerlek ve ray kesiti a) düz yol şartları için temas b) kurplu işletme şartları için temas

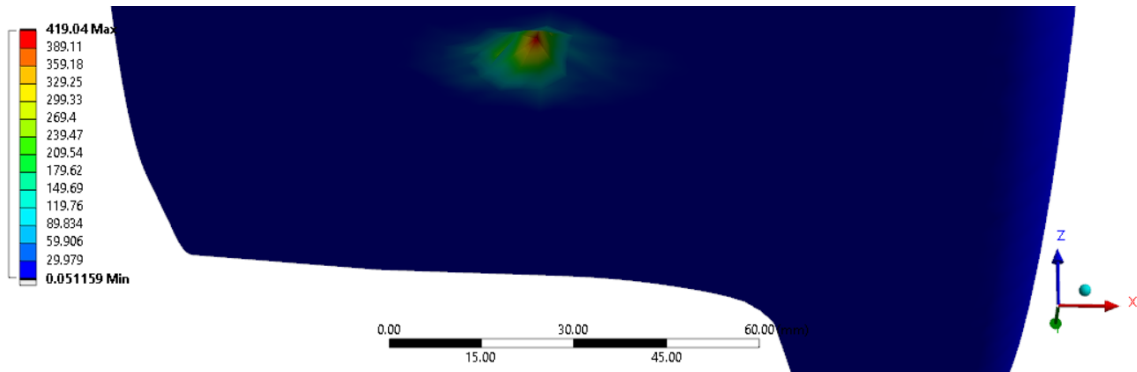


Şekil 3. Tekerlek çeliğine etkiyen yanal ve dikey kuvvetler

3. Bulgular

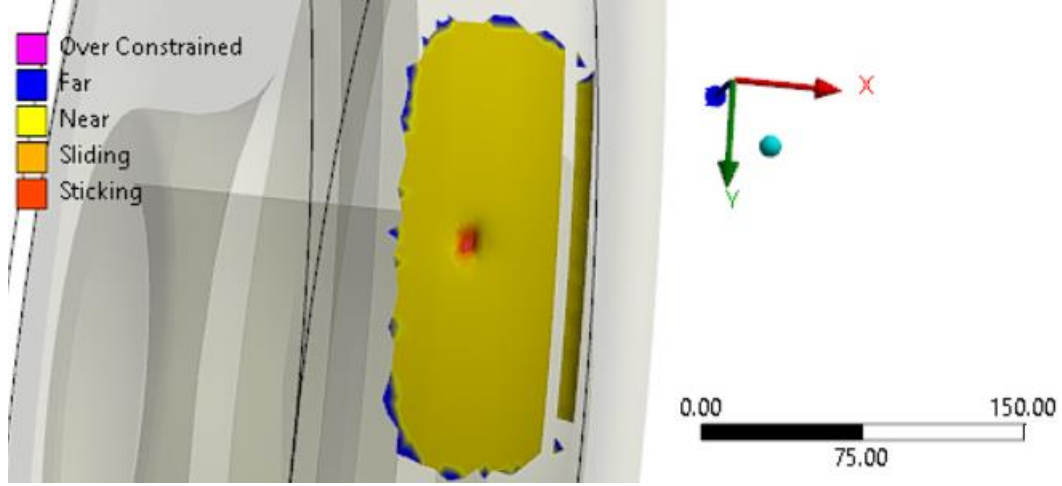
3.1. Doğrulama

Ramanan vd. [1] çalışmasında tekerlek modeline gelen aks yükü 16,25 ton olarak alınmıştır. Aynı çalışmada dinamik etkilerin yükü %40 oranında artırdığı hesaba katılarak analizler yapılmıştır. Buna göre işletme şartlarını simüle eden tam modelde temas bölgesinde eşdeğer Von-Mises gerilme değeri 425 MPa olarak bulunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen lokal modelde aynı sınır koşulları ve tekerlek ray yuvarlanma yüzeyi profillerinin dikkate alındığı koşullarda temas noktasında oluşan en yüksek eşdeğer Von-Mises gerilmesi 419,04 MPa olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla geliştirilen modelin literatürde yer alan çalışmaya oldukça yakın gerçekçi sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Şekil 4’de doğrulama sonucu tekerlek temas noktasında oluşan en yüksek Von-Mises eşdeğer gerilme değeri ve yüzeyde gerilme dağılımı yer almaktadır.

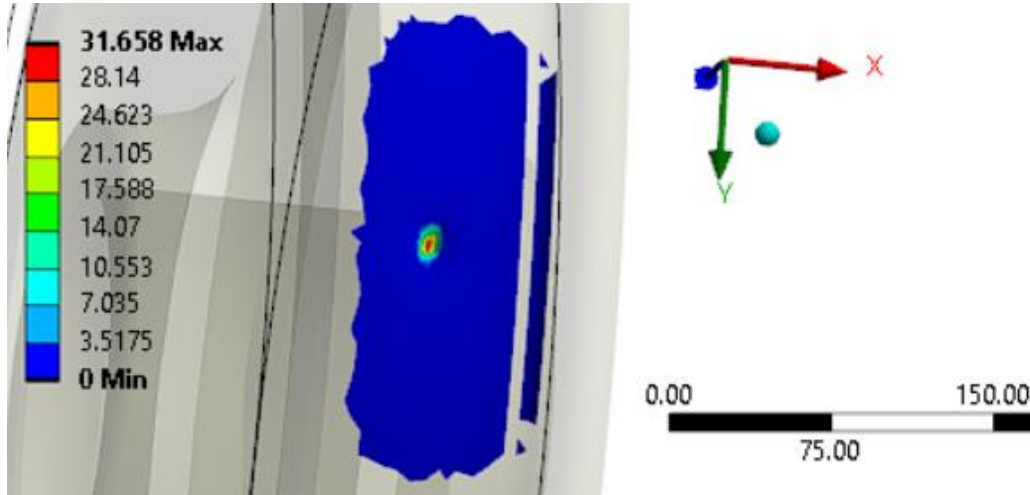


Şekil 4. 16,25 ton aks yükü altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises gerilmesi dağılımı

Şekil 5’de temas yüzeyi ve tekerlek yuvarlanma yüzeyinde temasa yakın bölgeler analiz edilmiştir. Buna göre beklenildiği gibi tekerlek yuvarlanma yüzeyinde küçük bir eliptik yüzeyde temas ve kayma olduğu analiz edilmiştir. Bunun yanısıra Şekil 6’da temas noktası ve yakın yüzeylerde oluşan sürtünme gerilme değeri mega-paskal biriminde yer almaktadır.



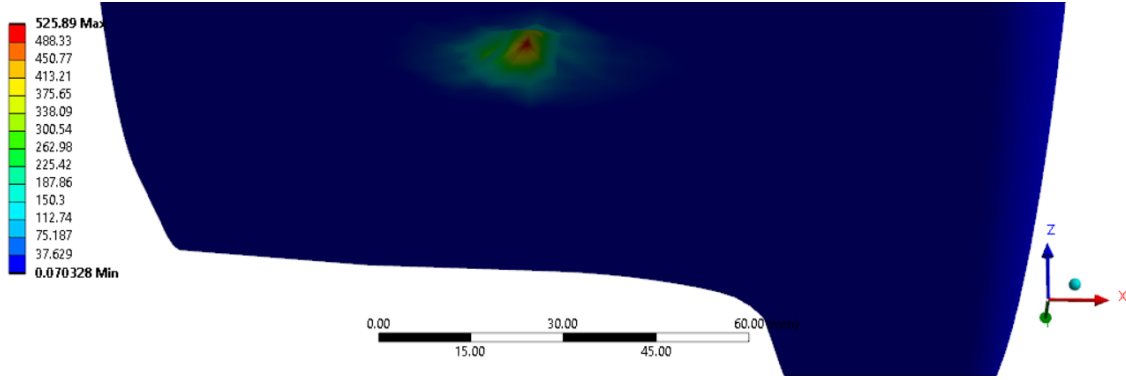
Şekil 5. Analiz için tanımlanan sınır koşulları altında tekerlek üzerinde temas noktası ve yakın yüzeyler



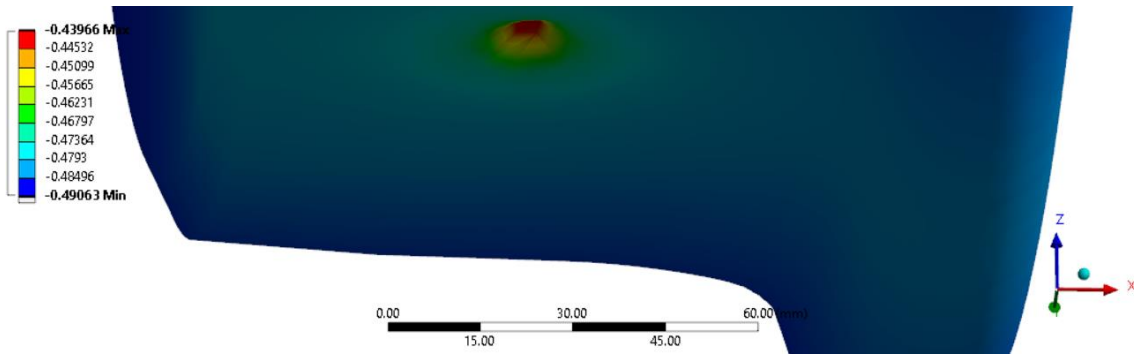
Şekil 6. Analiz için tanımlanan yük değeri altında tekerlek üzerinde temas noktası ve yakın yüzeylerde oluşan sürtünme gerilme değeri

3.2. Farklı sınır koşullarında düz yol ve dar kurp için yüksek hızlı yük işletmeciliği şartları altında elde edilen analiz sonuçları

Araç tekerleği için geliştirilen model dinamik etkilerin karşılığı olan %40 ek yük koşullarında tekrardan analiz için kullanılmıştır. Buna göre yük altında dinamik şartlarda temas bölgesinde oluşan en yüksek Von-Mises gerilme değeri 525,89 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 7). Aynı sınır koşulları altında araç yükünün tekerleğe etki ettiği -z ekseninde yer değiştirme değeri 0,49 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 8).

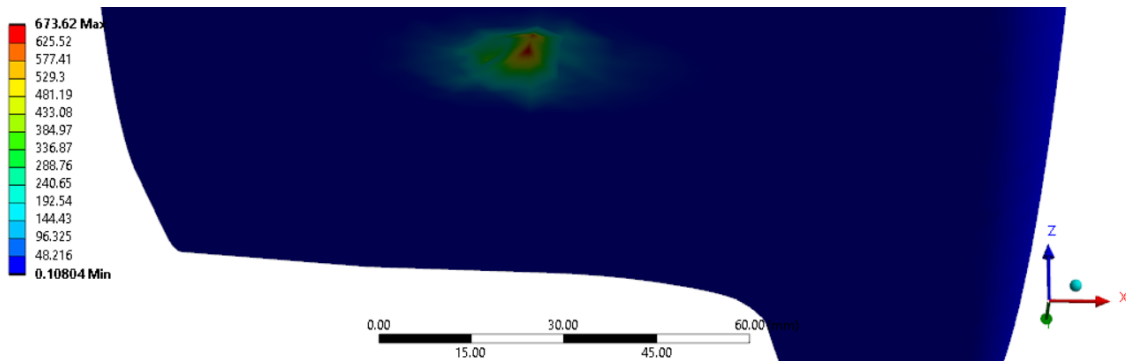


Şekil 7. %40 artırılmış yük altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilme değeri dağılımı

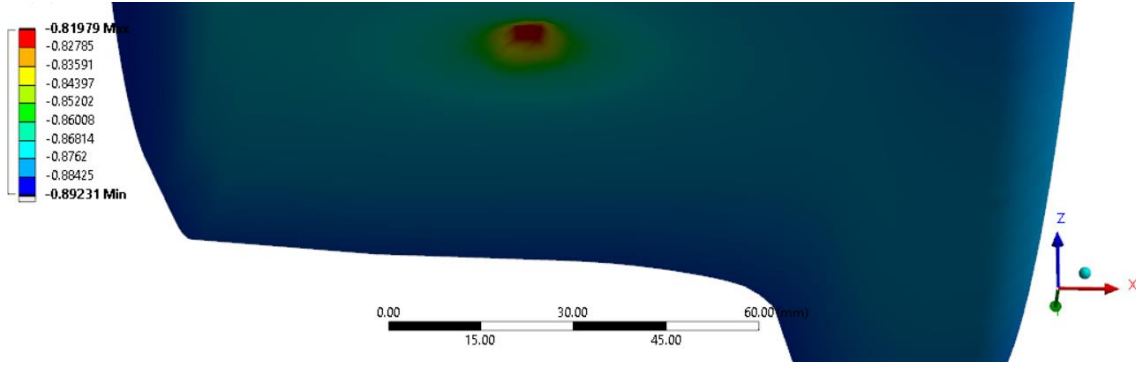


Şekil 8. %40 artırılmış yük altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde -z ekseninde oluşan yerdeğiştirme değeri

Fransa'da işletilen TGV yüksek hızlı trenleri aynı zamanda yük taşımacılığı için de kullanılmaktadır. Buna göre artırılmış dinamik, frenleme ve diğer mekanik yükleme şartları altında oluşan 149,45 kN yükleme koşullarında [26] tekerlek temas yüzeyinde oluşan gerilme değeri 673,62 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 9). Aynı analiz ile elde edilen -z eksenindeki yer değiştirme değeri 0,89 mm'dir (Şekil 10). Buna göre hıza bağlı dinamik yükler dikkate alındığında elde edilen 525,89 MPa gerilme ve 0,49 mm yerdeğiştirme değerinin çok üzerinde zorlu şartlar altında işletmecilik yapılacağı anlaşılmaktadır.



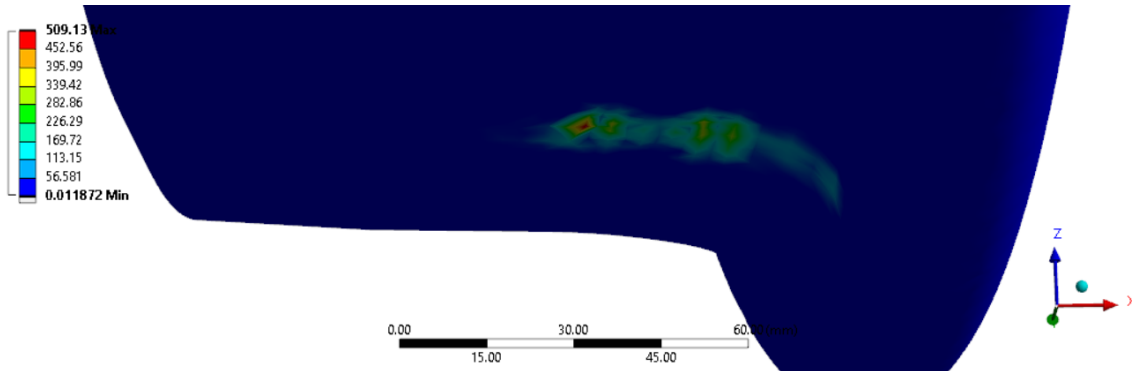
Şekil 9. 149,45 kN artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilme değeri dağılımı



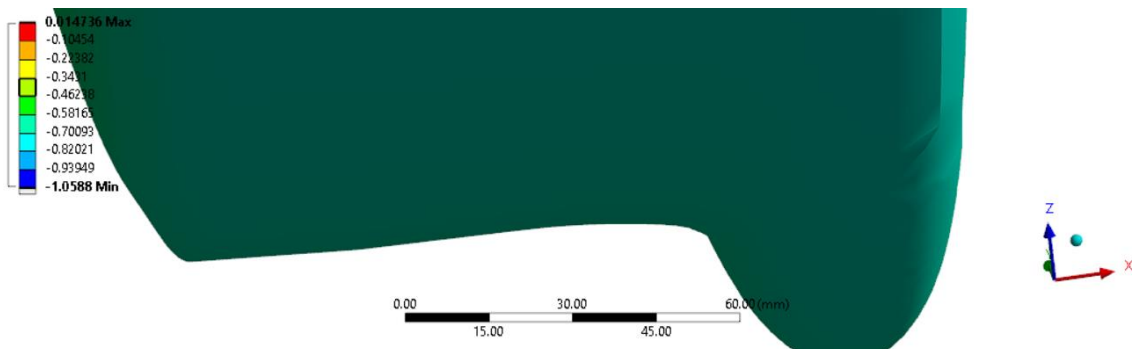
Şekil 10. 149,45 kN artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde -z ekseninde oluşan yerdeğiştirme değeri

Deng vd. [29] çalışmasında yüksek hızlı yük taşımacılığı için yatay yüklerin modellesini yapmıştır. Buna göre demiryolu aracının en az 5500 m kurp, 169 mm dever ve 350 km/s hız ile işletilmesi şartları analiz edilmiştir. Geliştirilen lineer-plastik malzeme modelinde tekerlek ray sürtünme katsayısı 0,32-0,35 alınmış ve tekerlek takımına iletilen en büyük yanal yük değerinin stabil yükleme durumu için 22 kN olduğu analiz edilmiştir.

Bu çalışmada 22 kN yatay yük değeri kurplu yüksek hızlı işletmecilik şartlarında oluşan yükleme durumu olarak ele alınmış ve analizler yapılmıştır. Buna göre kurplu işletme şartları altında en yüksek gerilme değeri 509 MPa (Şekil 11), yerdeğiştirme değeri ise 1,05 mm (Şekil 12) olarak elde edilmiştir. Dar kurplu işletme şartlarında tekerleğin flanş alanına yakın bölgelerin de ray yuvarlanma yüzeyiyle temasta olduğu dikkate alındığında gerilim değerlerinin tekerlek yuvarlanma yüzeyinde yayıldığı ve bir kısmının flanş bölgesinde toplandığı analiz edilmiştir.



Şekil 11. 149,45 kN dikey ve 22 kN yatay artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde oluşan Von-Mises eşdeğer gerilme değeri dağılımı



Şekil 12. 149,45 kN dikey ve 22 kN yatay artırılmış yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları altında tekerlek çeliğinin temas yüzeyinde -z ekseninde oluşan yerdeğiştirme değeri

4. Sonuç

Bu çalışmada yüksek hızlı tren işletmeciliğinde yolcu naklinin yanında yük nakli durumu değerlendirilmiştir. Dünyada farklı ülkelerde yük taşımacılığı yüksek hız ile yapılmaktadır. Buna göre Fransa’da işletilen yüksek hızlı trenler için kargo ulaştırmasında elde edilen hız, yükleme, frenleme gibi sınır koşulları altında oluşan yükleme değerleri dikkate alınarak gerilme ve yerdeğiştirme analizleri yapılmıştır. Bunun yanısıra hıza bağlı dinamik yükleme şartlarının %40 arttığı durum için analizler ayrıca tamamlanmıştır. Buna göre %40 artırılmış dinamik etkiler altında elde edilen 525,89 MPa gerilme ve 0,49 mm yerdeğiştirme değerinin, tanımlanan sınır koşulları altında yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları için 673,62 MPa ve 0,89 mm olarak yükseldiği görülmektedir. İşletmede kullanılan monoblok tekerlek çeliğinin akma mukavemetinin 580 MPa olduğu dikkate alındığında %40 artırılmış dinamik etki altında ulaşılan gerilme değerinin bu limitin altında kaldığı ancak tanımlanan sınır koşulları altında yüksek hızlı yük taşımacılığı şartları için elde edilen gerilme değerinin bu değerin üzerine çıktığı görülmektedir.

Dar karp şartlarında artan yatay yüklemelerin dikkate alındığı analizlerde, gerilme konsantrasyonunun tekerlek ray etkileşimine bağlı olarak yuvarlanma yüzeyinin yanısıra tekerlek flanşına doğru yayıldığı görülmüştür. Bu şartlarda elde edilen en yüksek gerilme değeri 509 MPa, yerdeğiştirme değerinin 1,05 mm olduğu analiz edilmiştir. Demiryollarında tekerlek ray teması uzun yıllardır, demiryollarının dünyada kullanılmaya başlandığı günden itibaren yoğunlukla çalışılan bir konu olmuştur. Günümüzde karmaşık işletme şartları, çok boyutlu analiz girdileri dikkate alındığında konunun halen yoğun olarak araştırmacılar tarafından ele alındığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analizinde belirlenen sınır koşulları analiz hassasiyetini ve sonuçları birincil dereceden etkilemektedir. Bu nedenle daha hassas analizler için daha yoğun ağların atıldığı simülasyon çalışmalarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada tanımlanan sınır koşulları altında dar karp ve düz yol yükleme şartları için tekerlek bileşeninin analizi yapılmıştır. Analiz ile edilen değerler dikkate alındığında gelecekte tekerlek bileşeni için kullanılmak üzere malzemelerin daha yüksek mukavemette tasarlanıp üretilmesi güvenli işletmecilik açısından dikkate alınması gereken önemli bir durumdur. Bu konuda son yıllarda tekerlek çeliğinin mikroyapısı manipüle edilerek yüksek mukavemet gerektiren durumlarda beynitik çeliklerin kullanımı makas, karp veya yük taşımacılığı için alternatif malzeme olarak yoğunlukla araştırılmaktadır.

Kaynakça

- [1] L. Ramanan, R. K. Kumar, and R. Sriraman, “Thermo-mechanical finite element analysis of a rail wheel,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 41, no. 4–5, pp. 487–505, 1999, doi: 10.1016/S0020-7403(98)00078-2.
- [2] E. Kabo and A. Ekberg, “Fatigue initiation in railway wheels - A numerical study of the influence,” *Wear*, vol. 253, no. 1–2, pp. 26–34, 2002, doi: 10.1016/S0043-1648(02)00079-0.
- [3] M. Krácalík, G. Trummer, and W. Daves, “Application of 2D finite element analysis to compare cracking behaviour in twin-disc tests and full scale wheel/rail experiments,” *Wear*, vol. 346–347, pp. 140–147, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2015.11.013.
- [4] H. M. El-sayed, H. N. Zohny, H. S. Riad, and M. N. Fayed, “A three-dimensional finite element analysis of concrete sleepers and fastening systems subjected to coupling vertical and lateral loads,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 122, no. September 2020, p. 105236, 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105236.
- [5] R. Masoudi Nejad, K. Farhangdoost, and M. Shariati, “Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 52, pp. 75–89, 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.03.002.
- [6] J. W. Seo, S. J. Kwon, H. K. Jun, and D. H. Lee, “Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 16, no. 7, pp. 2493–2507, 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.013.

- [7] M. A. Arslan and O. Kayabaşı, “3-D Rail-Wheel contact analysis using FEA,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 45, no. 1, pp. 325–331, 2012, doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.10.009.
- [8] Y. Liu, B. Stratman, and S. Mahadevan, “Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels,” *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 7, pp. 747–756, 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.007.
- [9] R. Masoudi Nejad, “Using three-dimensional finite element analysis for simulation of residual stresses in railway wheels,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 45, pp. 449–455, 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.07.018.
- [10] M. Toumi, H. Chollet, and H. Yin, “Finite element analysis of the frictional wheel-rail rolling contact using explicit and implicit methods,” *Wear*, vol. 366–367, pp. 157–166, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.06.008.
- [11] L. Han, L. Jing, and L. Zhao, “Finite element analysis of the wheel-rail impact behavior induced by a wheel flat for high-speed trains: The influence of strain rate,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 232, no. 4, pp. 990–1004, 2018, doi: 10.1177/0954409717704790.
- [12] X. Zhou, L. Jing, and X. Ma, “Dynamic finite element simulation of wheel-rail contact response for the straight track case,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 24, no. 5, pp. 856–869, 2021, doi: 10.1177/1369433220971733.
- [13] M. A. Che Zulkifli, K. S. Basaruddin, M. Afendi, W. H. Tan, and E. M. Cheng, “Finite Element Simulation on Railway Wheels under Various Loading,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 429, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/429/1/012002.
- [14] L. Xin, V. L. Markine, and I. Y. Shevtsov, “Numerical analysis of the dynamic interaction between wheel set and turnout crossing using the explicit finite element method,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 3, pp. 301–327, 2016, doi: 10.1080/00423114.2015.1136424.
- [15] A. B. Rezende *et al.*, “Wear behavior of bainitic and pearlitic microstructures from microalloyed railway wheel steel,” *Wear*, vol. 456–457, no. January, p. 203377, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203377.
- [16] M. R. Zhang and H. C. Gu, “Microstructure and properties of carbide free bainite railway wheels produced by programmed quenching,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 8, pp. 970–974, 2007, doi: 10.1179/174328407X192831.
- [17] B. Gao *et al.*, “Accelerated Isothermal Phase Transformation and Enhanced Mechanical Properties of Railway Wheel Steel: The Significant Role of Pre-Existing Bainite,” *Steel Res. Int.*, vol. 93, no. 2, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1002/srin.202100494.
- [18] Y. Sarikavak, “Wheel Rail Interaction; a Finite Element Analysis on Fatigue Failure Resistance of Pearlitic and Bainitic Steels,” *Railw. Eng.*, no. 14, pp. 65–76, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.934471.
- [19] M. Boehm, M. Arnz, and J. Winter, “The potential of high-speed rail freight in Europe: how is a modal shift from road to rail possible for low-density high value cargo?,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 13, no. 1, 2021, doi: 10.1186/s12544-020-00453-3.
- [20] E. C. Martínez, “Maintenance management and maintenance processes in railway operators: Case studies,” Barcelona, 2016.
- [21] A. Ghidini, M. Diener, A. Gianni, and J. Schneider, *Innovative steel by Lucchini RS for high-speed wheel application*.
- [22] L. Boussalia and A. Bellaouar, “Numerical simulation of the tread defects’ form impact on the eigen frequencies of a railway wheel,” *UPB Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.*, vol. 80, no. 2, pp. 63–74, 2018.
- [23] E. Norm, “EN 13979-1; Railway applications - Wheelsets and bogies - Monobloc Wheels - Technical approval procedure - Part 1: Forged and rolled wheels,” 2006.
- [24] EN 13674-1, “Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above applications,” 2013.
- [25] Y. Sarikavak, “Demiryollarında Ön Germeli Traverslerin Farklı İşletme Yükleri Altında Mekanik Analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 115–121, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.832641.
- [26] D. Plotkin, “Carrying freight on high-speed rail lines,” *J. Transp. Eng.*, vol. 123, no. 3, pp. 199–201, 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:3(199).
- [27] G. Troche, “High-speed rail freight - Efficient train systems for freight transport,” KTH Railway Group Report 0512, Stockholm, 2005.
- [28] S. D. Iwnicki, S. Stichel, A. Orlova, and M. Hecht, “Dynamics of railway freight vehicles,” *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 53, no. 7, pp. 995–1033, 2015, doi: 10.1080/00423114.2015.1037773.
- [29] G. Deng, Y. Peng, and C. Yan, “Running safety evaluation of a 350 km / h high-speed freight train negotiating a curve based on the arbitrary Lagrangian-Eulerian method,” 2021, doi: 10.1177/0954409720986283.

Özgeçmiş**Yasin SARIKAVAK**

Makine Yüksek Mühendisi, Dr.; Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Aynı yıl TCDD, Ankara Demiryolu Fabrikası, Motor Grup Müdürlüğü'nde mühendis olarak göreve başlamıştır. Yüksek Hızlı Tren Bakım Onarım Müdürlüğü'nde ve kurucu mühendisleri arasında yer aldığı Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi (DATEM)'nde görev yapmıştır. Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC), Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA) gibi uluslararası kurumlarda çeşitli komisyonlarda ve projelerde görev almıştır. Halen Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: sarikavak@gmail.com; ysarikavak@ybu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.