



Ray-Tekerlek Temasında Temas Parametrelerinin İncelenmesi

Yalçın ÖZDEMİR^{id}

*Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 12345,
Eskişehir, Türkiye*

yalcinozdemir@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 02.10.2019, Kabul/Accepted: 02.12.2019, Yayımlama/Published: 31.01.2020)

Özet: Ray-tekerlek teması, temas mekaniğinde önemli bir yeri olan araştırma alanıdır. Araç dinamiğinden raylı sistem yolu üzerinde meydana gelen hasarların incelenmesine kadar farklı araştırma alanlarının ana unsurlarından biridir. Raylı sistem araçlarının matematiksel modellerinin oluşturulmasında başlangıç noktası, aracın yol ile bağlantısının kurulmasıdır. Bundan dolayı literatürde birçok inceleme yayımlanmıştır. Bu yayınlar arasında matematik modellerin yanı sıra nümerik çözümler de bulunmaktadır. Ray-tekerlek temasında da üç boyutlu modeller oluşturularak farklı başlıklarda nümerik çözümler yapılmıştır. Bu çalışma içerisinde ray-tekerlek temasında temas parametrelerinin incelenmesini hedefleyen nümerik çözümleri kapsayan yayınlar özetlenecektir. Yazar tarafından bu alanda öne çıkan çalışmalar seçilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ray-Tekerlek Teması, Raylı Araçları, Temas Mekaniği, Sonlu elemanlar Metodu.

Examination of Contact Parameters in Wheel-Rail Contact

Abstract: Rail-wheel contact is one of the research topics in the contact mechanics. It is one of the main component of different research areas that are from vehicle dynamics to the examination of damages on the rail system. The starting point for the development of mathematical models of rail system vehicles is the connection of the vehicle with the track. Therefore, many studies have been published in the literature. These publications include mathematical models as well as numerical solutions. Numerical solutions with different titles have been made by developed three-dimensional models in rail-wheel contact. In this study, the publications covering numerical solutions aimed at examining contact parameters in rail-wheel contact will be summarized. The author has selected the most prominent studies in this field.

Keywords: Wheel-Rail Contact, Railway Vehicles, Contact Mechanics, Finite Element Method.

1. Ray-Tekerlek Teması

Raylı sistem araçları, lastik tekerlekli araçlardan farklı olarak asfalt veya stabilize yol üzerinde ilerlememektedir. Bu araçlar, ray olarak adlandırılan özel bir geometriye sahip ve metal malzemeden imal edilen yapı üzerinde ilerlemektedir. Raylar ile toprak zemin arasında belirli katmanlar hazırlanmakta, rayların bağlı olduğu bloklar bu katmanların üzerine yerleştirilmektedir. Tekerlek seti iki tekerlek ve bir akstan meydana gelmektedir. Tekerlek setlerinin, araç altındaki bojiye montajı yapılmaktadır. Tekerlek kesit görünüşü incelendiğinde standartlarda belirlenen bir profile sahip olduğu görülecektir. Aynı şekilde ray da belirli bir profile sahiptir. Farklı ray ve tekerlek profilleri standartlarda mevcuttur.

Ray ile tekerleğin birbirleriyle teması sonucunda ortaya temas ara yüzeyi çıkmaktadır. Temas ara yüzeyindeki gerilim dağılımları hem aracın dinamik performansı açısından hem de ray üzerinde meydana gelecek hasarların analizi açısından önemli bir parametredir. Temasın anlaşılması ve dikkat edilmesi gereken parametreler, araştırmacıların dinamik ve nümerik modellerin

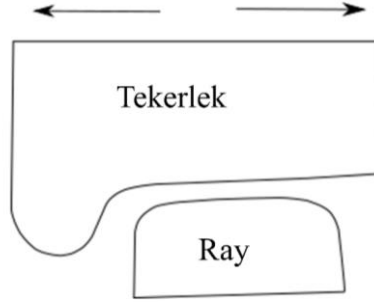
Atıf için/Cite as: Y. Özdemir, "Ray-Tekerlek temasında temas parametrelerinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 1-13, Jan. 2020.

Demiryolu Mühendisliği

oluşturulmasında detaylarını bilmeleri gereken konulardır. Dinamik modeller oluşturulurken farklı temas modelleri kullanılmakta ve oluşturulan bilgisayar kodları içerisine aktarılmaktadır.

Sonlu elemanlar analizinde ray ve tekerlek katı modeli kullanılmakta ve programların içerisine analiz öncesinde oluşturulan üç boyutlu parçalar montaj parametrelerine göre aktarılmaktadır. Nümerik modellemede kullanılacak olan geometrinin doğru bir şekilde konumlandırılması ve modellerin nümerik programın hangisi olduğuna bakılmaksızın öncelikle bileşenlerin kurulması temel unsurdur. Bundan dolayı ray ve tekerleğin birbirine göre doğru bir şekilde montajının yapılması, sonuçların sağlıklı bir şekilde elde edilmesini ve yorumlanmasını sağlayacaktır.

Araç ilerlerken tekerlek seti yanal eksende sabit kalmamaktadır. Özellikle ilk kalkış esnasında teker seti sağ ve sol yönlerde hareket etmektedir (Şekil 1). Dolayısıyla ray üzerinde temas alanı farklı konumlarda oluşmaktadır. Bundan dolayı ray-tekerlek temasında, tekerleğin tek bir konumdaki temas parametreleri değil “her bir konumundaki” temas parametreleri önemlidir. Fakat tekerlek setinin yanal hareketinde ana engel tekerleğin boden kısmıdır. Bu kısım bir engel teşkil etmekte, tekerlek setinin yanal hareketinde bir sınır vazifesi görmektedir. Tekerlek merkez konumundayken temas alanı tek bir şekle sahipken, tekerlek sağa ya da sola hareket ettiğinde temas alanı farklı konumlarda meydana gelmektedir. Ray üst yüzeyi ve tekerlek temas yüzeyi farklı yarıçaplara sahip eğrilerin birleşimidir. Bundan dolayı temas alanı değişmekte ve özellikle boden kısmı temas etmeye başladığında aynı anda birden fazla temas alanı ray yüzeyinde oluşmaktadır. Bununla ilgili olarak literatürden örnekler bulmak mümkündür [1].



Şekil 1. Tekerleğin sağ ve sol yöndeki hareketleri

Ray tabanı, yol zeminine paralel olacak şekilde konumlandırılmamaktadır. Bunun yerine belirli bir eğim verilerek sabitlenmektedir. Yapılacak olan çalışmada öncelikle raya verilecek olan eğim tespit edilmelidir. Buna göre ray-tekerlek montajı yapılmalıdır çünkü verilen eğime göre ray tepe noktasının konumu değişecektir. Temas mekaniği açısından ise temas alanı başta olmak üzere tüm bileşenler etkilenmektedir.

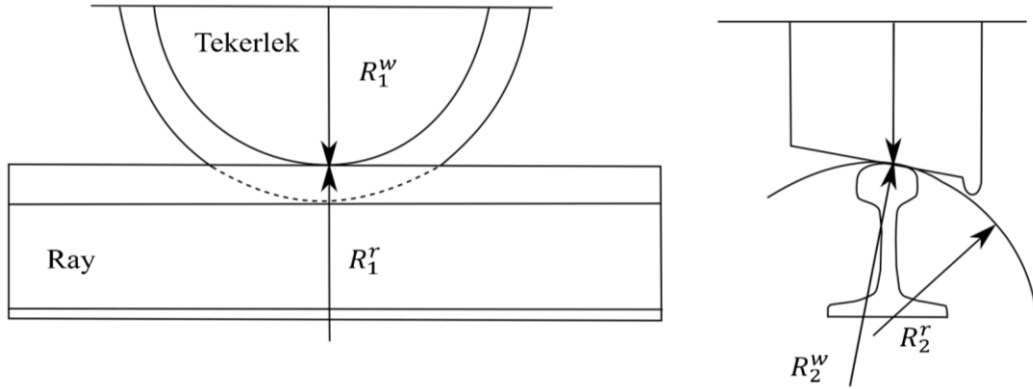
Daha önce bahsedildiği gibi referans noktalarına göre ray ve tekerleğin birbirlerine göre konumları tespit edilir ve montaj oluşturulur. Burada dikkat edilecek olan incelenecek parametrenin türüdür. Eğer temas alanındaki gerilim dağılımları incelenekse mümkün oldukça küçük eleman ölçüleri seçilmelidir. Modelin büyüklüğü eleman sayısını arttıracaktır bundan dolayı da hesaplama süresi uzayacaktır. Eleman sayısı hesap süresini arttıracaktır.

Sonlu elemanlar metodu için kullanılacak paket programlar, içerisine aktarılan geometri üzerinde farklı parametreler tanımlanmasına imkân sağlamaktadır. Bu parametrelerden biri malzeme özellikleridir. Sadece elastik alanda mı yoksa elastik-plastik malzeme parametrelerinin kullanılacağına karar verilmelidir. Bu karar da ana eksen kalıcı şekil değişimi göz önünde bulundurulup bulundurulmayacağıdır. Elastik-plastik malzeme tanımı; malzemenin akma noktasına kadar olan elastik davranışını, akma noktasını ve akma noktası sonrası plastik alanı (kalıcı şekil değişiminin olduğu bölgeyi) içermektedir.

Demiryolu Mühendisliği

Malzeme parametrelerinden sonraki önemli ikinci parametre ise sınır şartlarıdır. Normalde raylı sistem yolunda ray uzunluğu kısa değildir ancak sonlu elemanlar metodu analiz programlarında bu kadar büyük bir modelin kullanımı çözüm süresini uzatmaktadır. Analizlerde modellenen yol uzunluğu kısadır. Bundan dolayı sınır şartlarına dikkat edilmelidir. Örneğin tekerleğin merkezinden belirli bir eğimde montajı yapılan ray yüzeyine doğru tekerlek merkezine kuvvet uygulayarak bastırıldığında kuvvet etkisiyle kayma ya da eğilme meydana gelecektir. Bu tip hareketler göz önünde bulundurulmalıdır. Uygulanan sınır şartları bundan dolayı önemlidir.

Sonlu elemanlar çözümlerinde elde edilen sonuçlar literatürde mevcut olan farklı teoriler ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda oluşturulan modelin kabul edilebilir olduğu yayınlarda ele alınmaktadır. Özellikle eliptik temas alanı ve üzerindeki basınç dağılımı için en yaygın uygulama Hertz Temas Teorisi'nin kullanılmasıdır [2]. Hertz Temas Teorisi'nde öncelikle bilinmesi gerekenler temas alanındaki eğrilik yarıçap değerleridir. Eğriliklerin hesabında öncelikle temasın oluşacağı bölgeler belirlenmektedir. Hem ray hem de tekerlek için temasın gerçekleşeceği noktaların olduğu kısımların yarıçapları hem hareket doğrultusunda hem de yanal doğrultuda bulunur. Elde edilen değerler basınç ve temas alanı hesabında kullanılmaktadır. Gerçek tekerlek profili, lineer olmayan bir eğridir dolayısıyla temas noktasında yarıçap değişmektedir. Ray ve tekerlek temas yerlerindeki eğrilik yarıçapları Şekil 2.'de gösterilmektedir. Şekildeki yarıçaplarda üst indis olarak kullanılan w , tekerleği; r ise rayı göstermektedir. Alt indis olarak kullanılan 1 ve 2 sırasıyla yanal ve hareket doğrultusunu göstermektedir.



Şekil 2. Ray ve tekerlek eğrilik yarıçapları [3]

Birçok kaynak, Hertz Temas Teorisi'nin detaylarını anlaşılır bir şekilde vermektedir. Aşağıda verilen Denklem 1. ve 2. [3] kullanılarak temas alanı ölçüleri hesaplanmaktadır. Denklemlerde kullanılan m ve n katsayıları tablolar kullanılarak bulunmaktadır. Ayrıca temas eden gövdelerin malzeme özellikleri kullanılarak K_1 ve K_2 değerleri bulunmaktadır. K_3 ise eğrilik yarıçap değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Detayları farklı kaynaklarda bulunmaktadır.

$$a = m(3\pi F_n(K_1 + K_2)/4K_3)^{1/3} \quad (1)$$

$$b = n(3\pi F_n(K_1 + K_2)/4K_3)^{1/3} \quad (2)$$

Ray üzerinde hareket eden tekerleğin raya teması esnasında “temas ara yüzeyi” meydana gelmektedir. Bu temas ara yüzeyi incelenmesinde sonlu elemanlar metodundan faydalanılmaktadır. Bu çalışmada ray-tekerlek teması ara yüzeyi incelemesinde sonlu elemanlar metodundan faydalanılarak yapılan akademik çalışmalardan yazar tarafından tespit edilebilenlerin içerikleri hakkında bilgi verilecek ve sonuçları özetlenecektir.

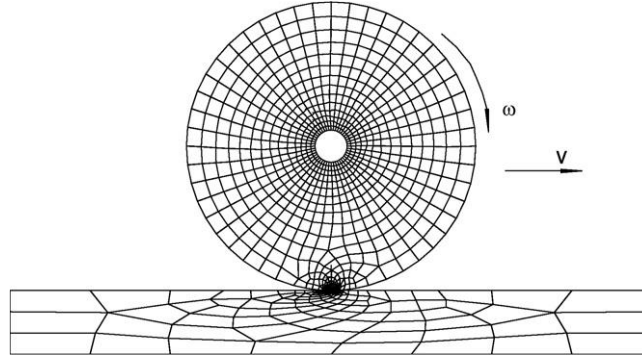
2. Temas Parametrelerinin Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak İncelenmesi

Demiryolu Mühendisliği

Temas parametrelerinin incelenmesinde kullanılan modelleri farklı kategorilerde incelemek mümkündür. Genel olarak bakıldığında modellerin, iki boyutlu ve üç boyutlu olması ya da ilerleme ve dönme hareketinin olup olmamasına göre alt başlıklar altında incelenmesi mümkündür. Bu çalışmada öncelikle iki boyutlu modellerin kullanıldığı analizleri içeren yayımlar aktarılacak, üç boyutlu modellerin kullanıldığı ve hareketin göz ardı edildiği çalışmalar ile devam edilecek ve son olarak hareketi içine alan üç boyutlu modeller ile gerçekleştirilen incelemeler paylaşılacaktır.

İki boyutlu modeller hem hesaplama süresi hem de kullanılan bilgisayarların kapasitesi bakımından araştırmacılara çeşitli avantajlar sağlamaktadır. İki boyutlu modeller halka şeklinde bir tekerlek ve düz bir yoldan ibarettir.

Xiaoyu ve Xuesong [4] çalışmalarında iki boyutlu bir model kullanmıştır. Çalışmanın inceleme alanını farklı normal yükler ve farklı ilerleme hızları kullanılarak basınç dağılımı ve tahrik kuvvetinin incelenmesi oluşturmuştur. Kullanılan model Şekil 3.'te verilmektedir. Dik kuvvet için seçilen tekerlek başına düşen kütle 5, 10 ve 15 ton'dur. İlerleme hızı olarak ise yüksek hız göz önünde bulundurulmuş ve sırasıyla 100, 200, 300 ve 400 km/saat ilerleme hızları kullanılmıştır. Temas alanındaki basınç dağılımı Hertz ve Kalker [5, 6] çözümleriyle karşılaştırılmış ve sonucun her iki çözüm sonucu elde edilen dağılımların arasında olduğu belirtilmiştir. Bu farkın ise darbeden kaynaklandığı yazarlar tarafından açıklanmıştır. Temas ara yüzeyinin hücum tarafında (temas ara yüzeyinin tekerlek hareket yönü tarafı) tekerleğin dönmelerinden dolayı tekerleğin raya çarptığı ve temas alanında ilave bir darbe kuvveti meydana getirdiği ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dinamik analizdeki basınç dağılımının statik koşullarda elde edilene göre az miktarda farklı olduğu, ilerleme hızının artmasıyla yüzeye dik basıncın temas yüzeyi hücum kenarı tarafında genişlediği ve firar kenarı tarafında ise küçüldüğü, hızın artmasıyla teğet tahrik kuvvetinin mutlak değerinin hücum kenarı tarafında azaldığı, firar kenarı tarafında ise arttığı verilmiştir. Fakat ilerleme hızının basınç ve tahrik kuvveti üzerindeki etkisinin, dingil kuvveti yerine kullanılan dik kuvvetin artmasıyla azaldığı bu yazarlar tarafından aktarılmıştır.

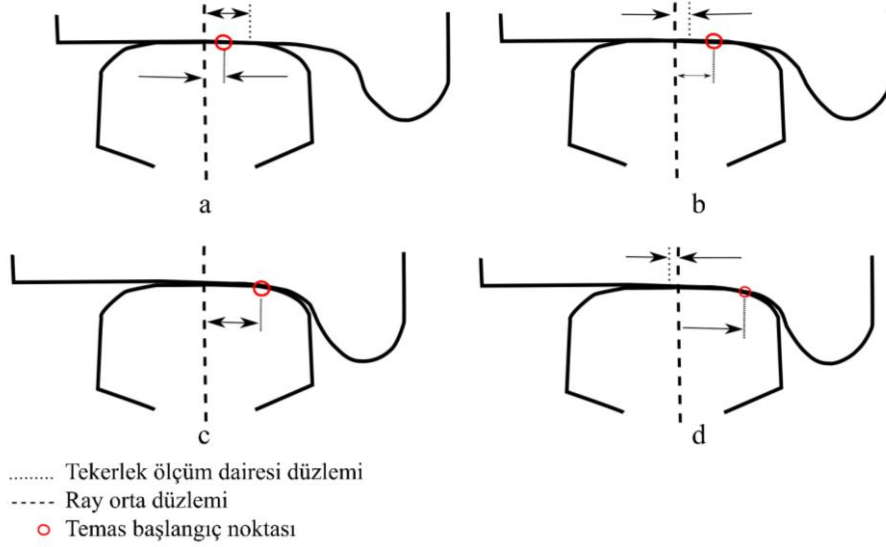


Şekil 3. Xiaoyu ve Xuesong tarafından kullanılan ray-tekerlek temas modeli [4]

Üç boyutlu gövdelerin kullanıldığı analizlerde, başlangıçta tekerleğin hareket ettirilmesinden ziyade durağan hâlde temas çözümleri yapılmıştır. Hertz Temas Teorisi yaygın olarak kullanıldığı için nümerik çözümler ile karşılaştırma yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur [7]. Yan ve Fischer [8] üç boyutlu model kullanarak sonlu elemanlar analizi sonuçlarını Hertz Temas Teorisi ile karşılaştıran ve uygulanabilirliğini tartışan bir çalışma yayımlamıştır. Çalışma içerisinde sadece ray değil, tekerlek ile farklı yol bileşenlerinin de temas modellerinin temasını incelemektedir. Ray profili olarak Avrupa'da yaygın bir şekilde kullanılan ray ve tekerlek profili bu çalışmada kullanılmıştır. Tekerleğin yanal hareketini göz önünde bulundurarak farklı pozisyonlarda temas incelemiştir. Travers ve balastın katı modelleri ray altında kullanılmıştır.

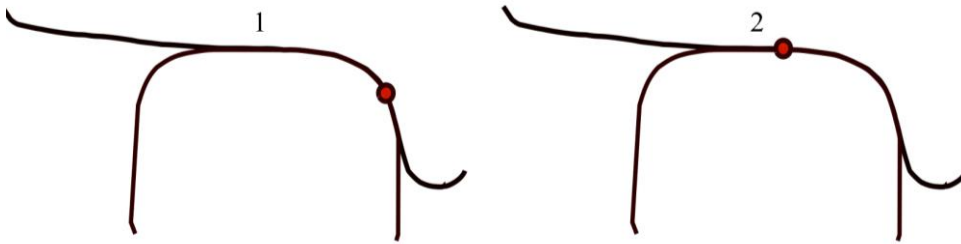
Demiryolu Mühendisliği

Tekerleğin farklı yanal pozisyonuna göre temasın başlangıç konumları aşağıdaki Şekil 4.'te verilmektedir.



Şekil 4. Tekerleğin farklı yanal konumlarına göre temasın başlangıç noktalarının gösterimi [8]

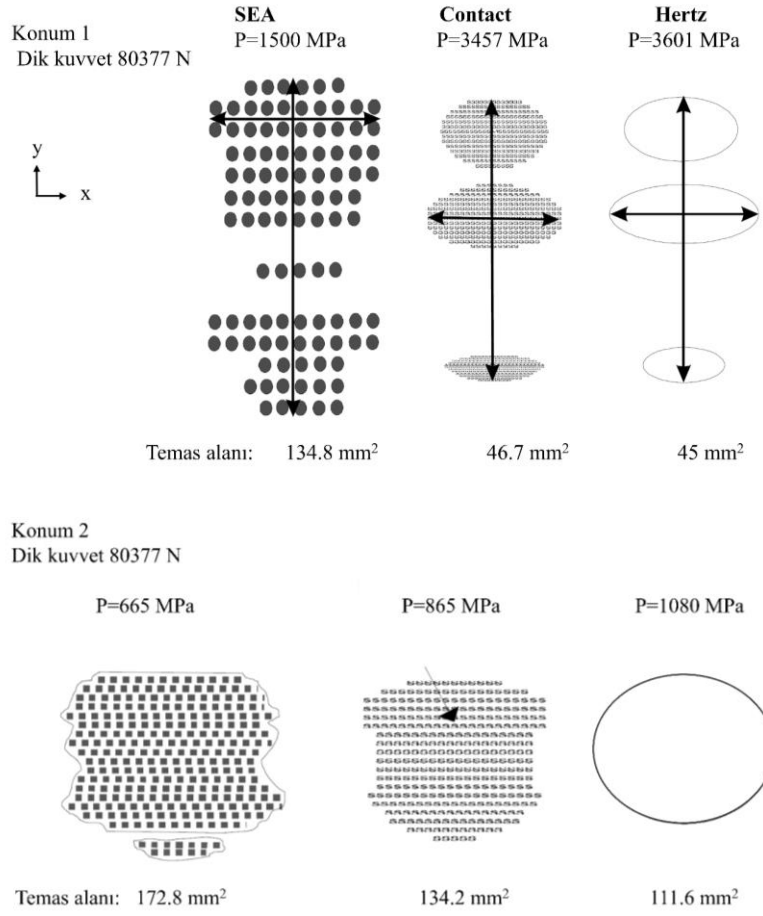
Lineer elastik ve elastik-plastik malzeme parametreleri analizlerde kullanılmıştır. Analizlerin sonucunda hem hareket doğrultusunda hem de yanal doğrultuda basınç dağılımları elde edilmiş, Hertz Temas Teorisi kullanılarak elde edilen dağılımlarla karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçlara göre eğer rayın yüzey eğriliği temas alanı içerisinde değişmiyorsa nümerik çözüm sonucu elde edilen sonuçların Hertz temas teorisi ile uyumlu olduğu ayrıca plastik deformasyon olması durumunda farklılığın meydana geldiği ve elastik basınç dağılımından daha düşük olduğu belirtilmiştir. Diğer bir çalışma ise Telliskivi ve Oloffson tarafından yapılmıştır [1]. Ray ve tekerlek profillerinin ölçümleri yapılmış ve analizlerde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında Hertz Temas Teorisi'ne göre hesaplamalar yapılmış, Contact programı [9] kullanılmıştır. Contact programının içeriği, temas alanıyla ilgili birçok araştırması bulunan Kalker'in çalışmalarına dayanmaktadır. İki farklı durum (Şekil 5.) için analizler yapılmıştır. Bu durumlar temasın meydana geldiği konum açısından birbirinden farklıdır. Bunlar; ray tepe noktası ve diğeri ray yüzeyinin köşe kısmıdır. İlgili konumlar Şekil 5.'te verilmektedir.



Şekil 5. İki farklı konumda temas başlangıç noktalarının gösterimi [1]

Her iki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 6.'da özetlenmektedir.

Demiryolu Mühendisliği

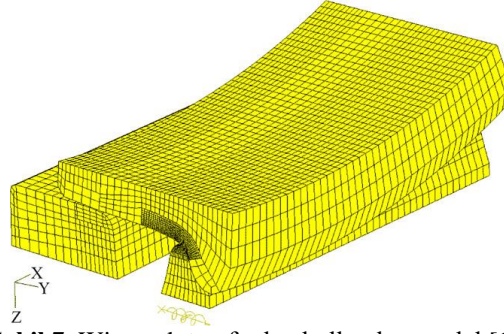


Şekil 6. Farklı çözümler için temas basıncı ve temas alanı değerlerinin karşılaştırılması [1]

Birinci durum için farkın büyük olduğu, ikinci durum için ise daha az olduğu yazarlar tarafından ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra ikinci durumdaki farklılığın elastik-plastik malzeme parametresinden kaynaklanabileceği bildirilmektedir. Şekil 6.'ya bakıldığında birinci konumda birden fazla temas alanı olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle tekerleğin boden kısmı raya yaklaştığında bu durum meydana gelmektedir. Konu üzerine farklı bir çalışma da literatürde bulunmaktadır [10]. Bunun yanı sıra tek nokta temastan iki noktada yani boden'in dâhil olduğu temasa geçişi inceleyen bir çalışma da bulunmaktadır [11].

Arslan ve Kayabaşı [12] çalışmalarında ray-tekerlek temas modelini ele almış, üç boyutlu model oluşturulmasındaki temel prosedürü sunmuştur. Sınır şartları, simetrik model kullanımı, analiz esnasında takip edilecek basamaklar çalışma içerisinde verilmiştir. Farklı bir inceleme ise Khan ve Dasaka tarafından yapılmıştır [13]. Hibrit olarak adlandırılan modelde ray rijit kabul edilmiştir. Ağır yük koşulları göz önünde bulundurulmuş ve yüksek dingil yükü kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Wiest vd. [14] makas bölgesindeki birleşim elemanlarındaki teması incelemiştir. Çalışmada, nümerik çözümün yanı sıra Hertz Temas Teorisi ve Contact programı sonuçlarını kullanmıştır. Kalıcı şekil değişimini gözlemleyecek biçimde malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çözümleri gerçekleştirilen model Şekil 7.'de verilmektedir. Temas alanı ve maksimum basınç değerleri verilerek model sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar üzerinden plastik deformasyonun etkisi irdelenmiştir. Yük değerleri ve temas konumu dinamik simülasyon programından alınarak analiz girdisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 7. Wiest vd. tarafından kullanılan model [14]

Tablo 1.'e göre temas alanı açısından sonuçlar birbiri ile uyumlu görünmekte ayrıca maksimum temas basıncı değerlerinde de fark bulunmamaktadır. Kalıcı şekil değişiminin etkisi, sonuçlara bakıldığında belirgin bir biçimde anlaşılmaktadır. Temas alanında artış, maksimum basınçta ise düşme görülmektedir. Temas alanının artmasıyla basıncın azalması beklenen bir sonuçtur.

Tablo 1. Farklı çözüm yöntemlerinde elde edilen temas alanı ve maksimum basınç değerleri [14]

Temas modeli	Temas alanı (mm ²)	Maksimum basınç (MPa)
Hertz	65	2566
Contact	67	2555
Elastik SEA	70	2561
Elastik-plastik SEA	128	1085

Literatürde bu konularla ilgili çalışmalar yapan araştırmacılar, genellikle sonlu eleman analizlerinde kullanılan modelin kullanılabilir olduğunu göstermek amacıyla, teorisyenler tarafından geliştirilen modelleri kullanmaktadır. Dolayısıyla eğrisel bir tekerlek profili kullanılıyorsa temas alanı tekerlek konumuna göre farklılık gösterecektir. Böyle durumlarda “Contact” programı sonuçları kullanılmaktadır. Hem dikey hem de yatay temas çözümleri gerçekleştirilmekte sonuçlar sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca bazı araştırmacılar düz tekerlek profili yani silindirik tekerlek geometrisi kullanmaktadır, böylece eliptik bir temas alanı elde etmektedir. Hertz Temas Teorisi'nin hesabı ile karşılaştırarak öncelikle modelin kullanılabilir olduğunu ifade etmektedirler. Zhao vd. [15] dinamik ray-tekerlek modeli oluşturarak ray yüzeyindeki basınç ve gerilim dağılımlarını incelemiştir. Araştırmadaki temel amaç, teğet kuvvet etkilerini gözlemlemektir. Elde edilen sonuçlara göre teğet kuvvetin ray yüzeyindeki gerilim dağılımında etkili olduğu ve yüzeyden başlayan hasarda önemli bir kriter olduğu vurgulanmaktadır. Sürtünmenin dâhil olduğu dönerek ilerleme hareketinin incelendiği modeller hakkında araştırmalar bulunmaktadır [16]. Birçok mühendislik uygulamasında bu hareket gözlenmektedir. Modellemenin detayları ray-tekerlek teması üzerinden araştırılmıştır.

Tablo 2. Zhao ve Li tarafından elde edilen sonuçlar [17]

Metot	Temas alanı			Maksimum basınç (Mpa)
	Yarıçap (mm)	Yarıçap (mm)	Alan (mm ²)	
Hertz	7.73	5.86	142.31	1340
Contact	7.80	5.69	139.68	1347
Sonlu elemanlar analizi	8	6.03	151.55	1344

Zhao ve Li [17] çalışmalarında yatayda düz bir tekerlek profili kullanmıştır. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken eleman sayısının yoğun olduğu ölçüm alanı oluşturulmuş ve sonuçlar buradan elde edilmiştir. Birincil süspansiyon yerine yay ve sönümleyici modelleri kullanılmıştır. Dikey ve yatay temas çözümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar dikey çözümü için Hertz Temas

Demiryolu Mühendisliği

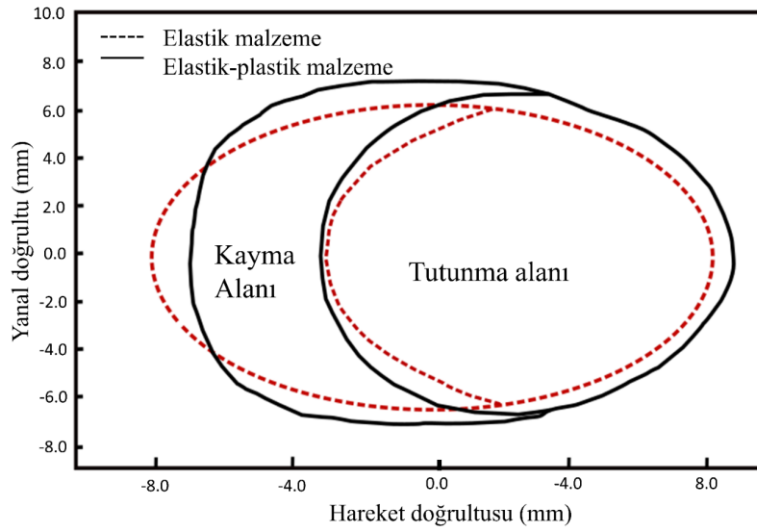
Teorisi ve Contact ile karşılaştırılmış, yatay temas çözümlerinde ise Contact sonuçları kullanılmıştır. Sonuçlar Tablo 2.'de verilmektedir. Tabloda iki farklı yarıçap bulunmasının sebebi temas alanının eliptik olmasıdır. Bundan dolayı elipsin iki yarıçapı verilmektedir. Ayrıca eleman kenar ölçülerinin sonuca etkisi araştırılmış ve farklı ölçüler için değerler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Eleman ölçülerinin temas çözümüne etkisi [17]

Parametreler	Eleman ölçüleri			
	0.33	0.63	1.3	
Temas yüzeyi	Yarıçap (mm)	8.00	7.83	8.48
	Yarıçap (mm)	6.03	5.95	7.07
	Alan (mm ²)	151	146	188
Maksimum basınç (MPa)	1344	1323	1297	
Tutunma yüzey alanının temas yüzey alanına oranı (%)	60.0	59.6	62.5	
Yüzeydeki maksimum kayma gerilmesi (MPa)	575	580	485	
Toplam işlem süresi (saat)	27.05	6.29	2.37	

Kalıcı şekil değişimi meydana geldiğinde yüzey geometrileri bozulacak, dolayısıyla temas ara yüzey çözümleri değişecektir. Zhao ve Li [18] eliptik temas alanında plastik deformasyon etkisini incelemişlerdir. Yatayda düz profile sahip olan tekerlek kullanılmıştır. Temas yüzeyindeki meydana gelen farklılık ve tutunma/kayma bölgelerindeki değişim verilmiştir. Ayrıca temas yüzeyindeki gerilim dağılımı hareket doğrultusunda alınarak görselleştirilmektedir. Böylece kalıcı şekil değişiminde meydana gelen farklılık gözlenebilmektedir. Lineer elastik ve elastik-plastik malzeme parametreleri çalışmada kullanılmıştır.

Nümerik çözümlerde hareket parametreleri değiştirilmiş ve farklı tutunma kabiliyetleri kullanılarak sonuçlar gözlenmiştir. Plastik deformasyon sonucu temas alanında değişim incelenmiş ve meydana gelen temas alanı yumurtaya benzediği için yazarlar tarafından “egg shape” olarak adlandırılmıştır.



Şekil 8. Plastik şekil değişimi sonucu temas alanındaki değişim [18]

Temas yüzeyindeki basınç ve kayma gerilmeleri hem elastik hem de elastik-plastik malzeme parametreleri kullanılarak elde edilmiştir. Basınç dağılımı, kalıcı şekil değişimi olduğunda elastik analizden elde edilen dağılımın altında kalmakta ve maksimum basınç değeri düşmektedir. Aynı şekilde benzer düşme yüzeydeki kayma gerilimi dağılımında da meydana gelmektedir.

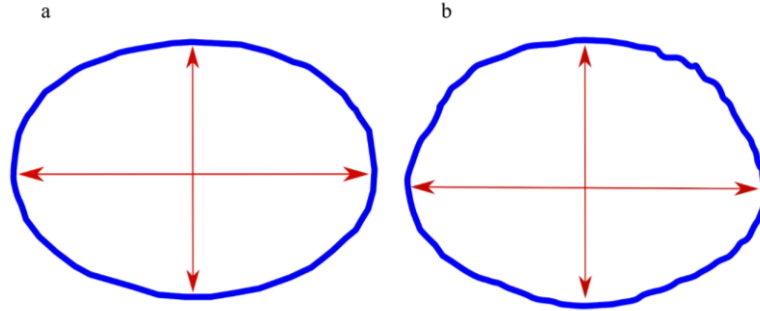
Demiryolu Mühendisliği

Vo vd. [19] farklı tutunma şartlarında temas parametreleri ve malzeme deformasyonu açısından inceleme yapan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kalıcı şekil değişiminin etkisini de malzeme parametrelerinde göz önünde bulundurmıştır. Aşınmış tekerlek profilinin kullanılmasında meydana gelen etkiler de yazarlar tarafından özetlenmiştir. Bu çalışmanın verilmesindeki ana unsur çalışmanın ilk kısmında temas parametrelerinin detaylı olarak incelenmesi ve farklı çalışmalarla sonuçların irdelenmesidir. Düşük (%0.28), yüksek (%0.47) ve tamamen kayma (%1.2) durumuna göre hareket parametreleri belirlenmiştir. Contact programı ve Polach [20, 21] modelinin sonuçları karşılaştırma amaçlı hesaplanarak çalışmada paylaşılmıştır. Ayrıca ray eğiminin varlığında sonuçların nasıl değiştiği de incelenerek sonuçları verilmektedir (Tablo 4.).

Tablo 4. Tablo eğimli ve eğimsiz ray sonuçları [19]

Ray tipi	Temas alanı			Temas kuvveti		Teğet kuvvet/dikey kuvvet (%)	Maksimum basınç (MPa)
	Yarıçap-a (mm)	Yarıçap-b (mm)	Oran a/b	Dikey kuvvet (kN)	Teğet kuvvet (kN)		
Eğimli ray	10	6.22	1.61	130	47.50	37.05	1222
Eğimsiz ray	9.9	6.02	1.65	129.88	46.39	35.71	1229

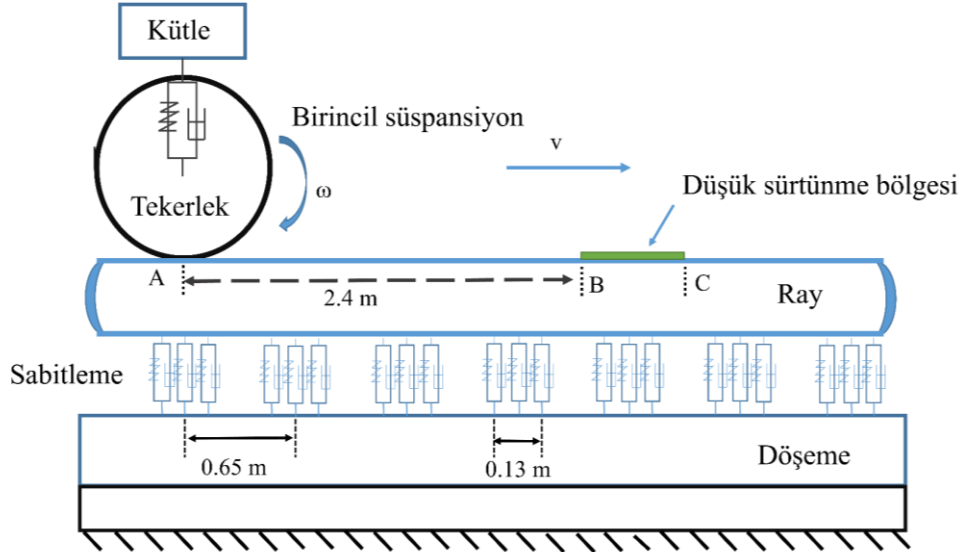
Aşınmış tekerlek durumunda temas alanının şeklindeki değişim gözlenmiş ve aşınmış tekerleğin temas ara yüzeyine etkisi paylaşılmıştır. Temas alanının şeklindeki değişim Şekil 9.'da gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere aşınmış tekerlek profili durumunda temas alanının şekli değişmekte sonuç olarak temas parametreleri etkilenmektedir.



Şekil 9. Yeni (a) ve aşınmış tekerlek (b) profilleri kullanımında oluşan temas alanları [19]

Yatay temas hesabının yapılması için öncelikli olarak sürtünme katsayısı tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar analiz programlarında yüzeyler bölümlere ayrılarak farklı sürtünme katsayıları tanımlanabilmektedir. Böylece ray üzerinde su ve yaprak gibi farklı çevresel atıkların varlığı durumunda temas ara yüzey çözümlerinde nelerin değiştiği incelenebilmektedir. Kuru sürtünme özellikleri ve düşük sürtünme özellikleri bir arada verilmekte, bölgesel geçişlerde nelerden etkilendiği irdelenmektedir. Zhao vd. [22] yüksek hız değerlerinde farklı sürtünme katsayıları kullanarak kuru sürtünme ve düşük sürtünme özellikleri gösteren bölgeleri bir arada oluşturmuş (Şekil 10.) ve temas parametrelerini hem bölgeler arası geçişte hem de bölgeler üzerinde tekerlek hareket ederken incelemiştir.

Demiryolu Mühendisliği



Şekil 10. Zhao vd. tarafından kullanılan modelin şematik gösterimi [22]

Temas kuvvetlerinin dikey ve hareket doğrultusundaki yatay bileşeni verilmiştir. Plastik deformasyon göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlarda dikey temas kuvvetinin ve basınç dağılımının etkilenmediği belirtilmiştir. Yatay (hareket doğrultusunda) kuvvetin etkilendiği ve düştüğü ifade edilmiştir. Düşük sürtünme bölgesine girişte ve çıkışta tutunma/kayma bölgelerinde değişimler gözlemlendiği paylaşılmıştır. Düşük sürtünme bölgesinden sonra başlayan kuru sürtünme bölgesine geçişte daha fazla plastik deformasyon ve aşınma beklendiği yorumlanmıştır. Ayrıca düşük sürtünme bölgesinin uzunluğunun da etkili olduğu elde edilen sonuçlara göre yazarlar tarafından belirtilmiştir. Farklı sürtünme koşullarına sahip bölgelerden birinden diğerine geçiş düşük hız değeri kullanılarak da gözlenmiştir [23].

Hareketi içerisine alan çalışmalarda öncelikle sabit sürtünme katsayısı kullanılmaktadır. Daha sonrasında değişken sürtünme özelliği gösteren bölgeler oluşturulmuş ve bölgeler arası geçişler incelenmiştir. Son olarak farklı bir durum olan sürtünme katsayısının hızla bağlı olarak değişiminin sonlu elemanlar analizinde kullanılmasıdır. Zhao ve Li [24] sürtünme katsayısını hızla bağlı olarak tanımlayarak bu tanımın etkilerini incelemiştir. Analizlerde iki farklı sürtünme tanımı kullanılmıştır. Bunlardan biri sabit sürtünme katsayısıdır, diğeri ise hızla bağlı olarak değişen sürtünme katsayısıdır. Hızla bağlı olarak sürtünme tanımlanmasında Denklem 3. kullanılmıştır.

$$f = f_d + (f_s - f_d)e^{-ks_n} \quad (3)$$

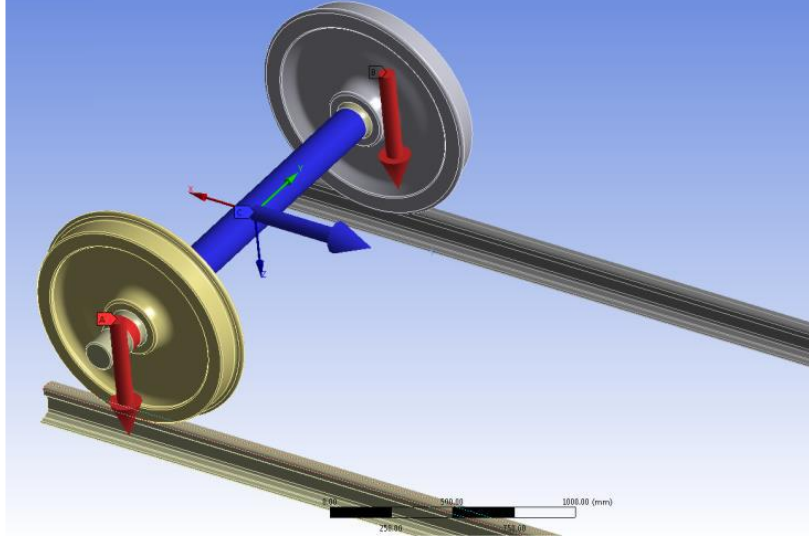
Denklem 3.'te; f_s statik sürtünme katsayısını, f_d kinetik sürtünme katsayısını, k azalma katsayısını, s_n temas ara yüzeyindeki noktaların birbirlerine göre hızlarını göstermektedir.

Malzeme parametrelerinde, malzeme sönümlenme parametreleri de elastik malzeme parametreleri ile birlikte tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre dikey temas çözümünde temas alanı, dikey temas basıncı değerlerinin tanımlanan sürtünme modellerinden etkilenmediği ifade edilmiştir. Özellikle yatay temas çözümlerinin etkilendiği vurgulanmıştır. Yatay temas kuvveti, temas esnasında meydana gelen salınımlar ve kayma/tutunma bölgelerinin nasıl etkilendiği detaylı bir şekilde verilmiştir.

Ayrıca dingil yükü ve temas yüzeyi sürtünme özellikleri arasındaki ilişkiyi inceleyen bir çalışma da mevcuttur [25]. Bu çalışmada 160 km/h hız ve 20-32.5 ton dingil yükü değerlerinde incelemeler yapılmıştır. Temas ara yüzeyindeki sürtünme katsayısının uygulanan dingil yükünün artmasıyla paralel olarak arttığı belirtilmektedir. Artış oranının ise yüksek dingil yükü

Demiryolu Mühendisliği

değerlerinde düşme eğiliminde olduğu bildirilmiştir. Kullanılan model Şekil 11.'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Khan ve Dasaka tarafından kullanılan model [25]

Sonlu elemanlar metodu ray-tekerlek teması ve bu yapı üzerinden incelenebilecek farklı başlıklarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar farklı teoriler veya deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Bu yöntemin yaygın ve geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır.

Çalışmanın kapsamında özellikle temas ara yüzeyi üzerine odaklanan yayınlar incelenmiştir. Öte yandan literatürde sonlu elemanlar metodu izlenerek yapılan birbirinden farklı başlıklar altında yapılmış yayınlar da mevcuttur. Oluşturulan model üzerinden kinematik parametreler rahatlıkla değiştirilmekte ve bu sayede başta hız olmak üzere farklı girdilerin etkileri gözlenmektedir. Ayrıca çözümlere termal özellikler dâhil edilebilmekte; modeller yalın mekanikten ziyade, termal etkileri de içeren çözümler hâline gelmektedir [26]. Temas haricinde rayların birleşim yerleri [27, 28], kaynaklı bölgeler [29], ray yüzeyindeki geometrik değişimler [30, 31], tekerlek yüzeyindeki hatalar gibi geometrik [32] ve mekanik özellikler modellere dâhil edilmekte ve sonlu elemanlar metodu ile çözümler yapılmaktadır.

4. Sonuç ve Yorum

Ray- tekerlek teması, raylı sistemler alanında başlıca araştırma konularından biridir. Başta temas ara yüzeyi olmak üzere birçok konuda araştırma yapılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu bu araştırmalar esnasında kullanılan nümerik çözümdür. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak üç boyutlu modeller oluşturulmaktadır. Yüzey ve yüzey altı gerilim dağılımları gözlenmektedir. Ara yüzey parametreleri dışında farklı incelemeler de sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Ara yüzey incelemelerinde basınç dağılımları, yatay gerilim dağılımları ve ara yüzeydeki yatay kuvvet öncelikle gözlenen değerlerdir. Böylece ray yüzeyinde oluşan geometrik değişimlerin sebepleri araştırılabilmektedir.

Kalıcı şekil değişimi olması durumunda temas ara yüzey parametrelerinin nasıl etkilendiği incelenebilmektedir.

Farklı yüzey özelliklerinin tanımlanabilmesi, değişen sürtünme özelliklerinde temas ara yüzeyindeki gerilim dağılımlarının nasıl etkilendiğini gözlemlenmesini sağlamaktadır. Bu sayede ıslak ve kuru gibi ortamların etkisi araştırılmıştır.

Mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodundan raylı sistemlerde alanında farklı araştırma konularında yararlanılmaktadır. Araştırmacılara hem model hem de malzeme açısından çeşitlilik sunan yöntem bu alanda öne çıkmaktadır.

Araştırılacak parametreye göre eleman sayısı değiştirilmektedir. Çözüm bölgelerinde daha sık ızgara yapısı oluşturulmaktadır. Bu ise çözüm süresini uzatmaktadır. Bundan dolayı çözümlere başlamadan önce eleman sayısı üzerine çalışılmakta, optimum eleman sayısına karar verilmektedir.

Raylı sistemler açısından bakıldığında birçok araştırma alanında yaygın bir şekilde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu alandaki güncel çalışmalar incelendiğinde çalışmalarda yol ve altı katmanların da çalışma konusuna dâhil edildiği daha geniş ölçekli modellerin kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bu geniş ölçekli çalışmalarda, inşaat mühendisliği gibi farklı disiplinlerin de işe koşulduğu görülmektedir.

Kaynakça

- [1] T. Telliskivi and U. Olofsson, "Contact mechanics analysis of measured wheel-rail profiles using the finite element method," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 215, no. 2, pp. 65-72, 2001.
- [2] H. Hertz, "Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik 92 (1881), S. 156–171."
- [3] A. A. Shabana, K. E. Zaaza, and H. Sugiyama, *Railroad vehicle dynamics: a computational approach*. CRC press, 2007.
- [4] J. Xiaoyu and J. Xuesong, "Numerical simulation of wheel rolling over rail at high-speeds," *Wear*, vol. 262, no. 5, pp. 666-671, 2007/02/28/ 2007.
- [5] J. J. Kalker, "Simplified theory of rolling contact," *Delft Progress Rep.*, Delft Univ. Press, pp. 1-10, 1973.
- [6] J. J. Kalker, *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*. Kluwer Academic Publishers, Dordrech, 1990.
- [7] J. P. Srivastava, P. K. Sarkar, and V. Ranjan, "Contact Stress Analysis in Wheel–Rail by Hertzian Method and Finite Element Method," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, journal article vol. 95, no. 4, pp. 319-325, October 01 2014.
- [8] W. Yan and F. D. Fischer, "Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems," *Archive of Applied Mechanics*, journal article vol. 70, no. 4, pp. 255-268, May 01 2000.
- [9] E.A.H. Vollebregt, "User guide for CONTACT, Rolling and sliding contact with friction, Technical report TR09-03, version 19.1," *VORtech CMCC*, Delft, The Netherlands, 2019. [Online]. Available: www.kalkersoftware.org [Accessed December 27, 2019].
- [10] J. Zhang, S. Sun, and X. Jin, "Numerical Simulation of Two-Point Contact Between Wheel and Rail," *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 22, no. 4, pp. 352-359, 2009/08/01/ 2009.
- [11] Z. Yang, Z. Li, and R. Dollevoet, "Modelling of non-steady-state transition from single-point to two-point rolling contact," *Tribology International*, vol. 101, pp. 152-163, 2016/09/01/ 2016.
- [12] M. A. Arslan and O. Kayabaşı, "3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA," *Advances in Engineering Software*, vol. 45, no. 1, pp. 325-331, 2012/03/01/ 2012.
- [13] M. R. Khan and S. M. Dasaka, "Numerical Simulation of Wheel-rail Interfaces in Heavy Freight Corridors using Hybrid Rigid-deformable Model," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 11, Part 3, pp. 24642-24651, 2018/01/01/ 2018.
- [14] M. Wiest, E. Kassa, W. Daves, J. C. O. Nielsen, and H. Ossberger, "Assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact," *Wear*, vol. 265, no. 9, pp. 1439-1445, 2008/10/30/ 2008.
- [15] X. Zhao, Z. Li, C. Esveld, and R. Dollevoet, "The dynamic stress state of the wheel-rail contact," in *Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Continuum Mechanics, 15-17 May, 2007, Portoroz, Slovenia, 2007*.

- [16] Z. Yang, X. Deng, and Z. Li, "Numerical modeling of dynamic frictional rolling contact with an explicit finite element method," *Tribology International*, vol. 129, pp. 214-231, 2019/01/01/ 2019.
- [17] X. Zhao and Z. Li, "The solution of frictional wheel–rail rolling contact with a 3D transient finite element model: Validation and error analysis," *Wear*, vol. 271, no. 1, pp. 444-452, 2011/05/18/ 2011.
- [18] X. Zhao and Z. Li, "A three-dimensional finite element solution of frictional wheel–rail rolling contact in elasto-plasticity," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 229, no. 1, pp. 86-100, 2015.
- [19] K. D. Vo, A. K. Tieu, H. T. Zhu, and P. B. Kosasih, "A 3D dynamic model to investigate wheel–rail contact under high and low adhesion," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 85, pp. 63-75, 2014/08/01/ 2014.
- [20] O. Polach, "Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit," *Wear*, vol. 258, no. 7, pp. 992-1000, 2005/03/01/ 2005.
- [21] O. Polach, "A Fast Wheel-Rail Forces Calculation Computer Code," *Vehicle System Dynamics*, vol. 33, no. sup1, pp. 728-739, 1999/01/01 1999.
- [22] X. Zhao, Z. Wen, M. Zhu, and X. Jin, "A study on high-speed rolling contact between a wheel and a contaminated rail," *Vehicle System Dynamics*, vol. 52, no. 10, pp. 1270-1287, 2014/10/03 2014.
- [23] Y. Özdemir and P. Voltr, "Analysis of wheel-rail contact under partial slip and low speed conditions," *Mechanics*, vol. 23, no. 1, pp. 5-10, 2017.
- [24] X. Zhao and Z. Li, "A solution of transient rolling contact with velocity dependent friction by the explicit finite element method," (in English), *Engineering Computations*, vol. 33, no. 4, pp. 1033-1050, 2016.
- [25] M. R. Khan and S. M. Dasaka, "Influence of train axle load on wheel-rail interface friction," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 377, p. 012002, 2018/06 2018.
- [26] Y. Wu, Y. Wei, Y. Liu, Z. Duan, and L. Wang, "3-D analysis of thermal-mechanical behavior of wheel/rail sliding contact considering temperature characteristics of materials," *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 455-462, 2017/03/25/ 2017.
- [27] W. Cai, Z. Wen, X. Jin, and W. Zhai, "Dynamic stress analysis of rail joint with height difference defect using finite element method," *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 8, pp. 1488-1499, 2007/12/01/ 2007.
- [28] Y.-C. Chen and L.-W. Chen, "Effects of insulated rail joint on the wheel/rail contact stresses under the condition of partial slip," *Wear*, vol. 260, no. 11, pp. 1267-1273, 2006/06/30 2006.
- [29] B. An, P. Wang, J. Xiao, J. Xu, and R. Chen, "Dynamic Response of Wheel-Rail Interaction at Rail Weld in High-Speed Railway," *Shock and Vibration*, vol. 2017, p. 11, 2017, Art. no. 5634726.
- [30] X. Zhao, Z. Li, and R. Dollevoet, "The vertical and the longitudinal dynamic responses of the vehicle–track system to squat-type short wavelength irregularity," *Vehicle System Dynamics*, vol. 51, no. 12, pp. 1918-1937, 2013/12/01 2013.
- [31] X. Zhao, Z.-f. Wen, H.-y. Wang, X.-s. Jin, and M.-h. Zhu, "Modeling of high-speed wheel-rail rolling contact on a corrugated rail and corrugation development," *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, journal article vol. 15, no. 12, pp. 946-963, December 01 2014.
- [32] L. Han, L. Jing, and K. Liu, "A dynamic simulation of the wheel–rail impact caused by a wheel flat using a 3-D rolling contact model," *Journal of Modern Transportation*, journal article vol. 25, no. 2, pp. 124-131, June 01 2017.

Özgeçmiş



Yalçın ÖZDEMİR

1986 tarihinde Eskişehirde doğmuştur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde tamamlamıştır. Doktora eğitimini Jan Perner Ulaştırma fakültesinde tamamlamıştır. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesinde çalışmaktadır.