

## Raylı taşıtlarda dinamik hareketler ve titreşim azaltma yöntemlerinin incelenmesi

### Investigation of dynamic motions and vibration reduction methods in railway vehicles

Meral BAYRAKTAR<sup>1\*</sup>, Muammer TAHTALI<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
mbarut@yildiz.edu.tr, muammer.tahtali@tubitak.gov.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.10.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 18.03.2019  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.75428  
Derleme Makalesi/Review Article

#### Öz

Demiryolu ulaşımı güvenli oluşu, daha fazla kişi ve eşya taşımaya uygunluğu sebebiyle önemini her geçen gün arttırmaktadır. Raylı taşıtlara olan talep ile konfor ve hız anlamında bu araçlardan beklentiler artmış olup, çözüm için raylı taşıtlardaki dinamik etkiler üzerinde çalışmalar hızlandırılmıştır. Düşey ve yanıl dinamik hareketler sonucu oluşan titreşimler araç güvenliği, yol tutuş ve konfor açısından yüksek hızlarda beklenen seviyeyi karşılayabilmektedir. Dinamik etkilerin azaltılması için süspansiyon sistemleri üzerine yoğunlaşılın çalışmalarda geleneksel pasif sistemlerinin yerine, yapısında bir kontrol mekanizması da içeren aktif ve yarı aktif süspansiyon teknolojileri ön plana çıkmıştır. Aktif süspansiyon sistemlerinde mevcut pasif elemanlara ek olarak sisteme bir eyleyici ve kontrolcü eklenirken, yarı aktif süspansiyon sistemlerinde ise eyleyici olmadan sadece sönümleme elemanı üzerinden kontrol sağlanarak çözüm üretilmeye çalışılmıştır. Titreşim azaltmak için geliştirilen bir diğer yöntem süspansiyon sistemlerinin optimizasyonudur. Bu derlemede raylı taşıtlardaki dinamik hareketler, modelleme metotları ve yol girdileri incelenmiş olup aktif, yarı aktif sistem ve optimizasyon yöntemlerinin araç titreşimlerinin azaltılmasındaki etkileri ele alınmıştır. Titreşimin azaltılmasında en etkili yöntemin aktif sistemler olduğu ancak uygulamada makul sonuçlar alınmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, demiryolu taşıtlarını modelleme ve oluşan titreşimleri azaltma konularında çalışacak gelecekteki araştırmacılara yol göstermesi amaçlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Raylı taşıtlar, Süspansiyon sistemleri, Titreşim

#### Abstract

Rail transportation is remaining its importance day by day because it is safe and convenient to carry more people and goods. With the demand for rail vehicles, expectations have increased especially in terms of comfort and speed, so the studies have been accelerated on the dynamic effects on rail vehicles to be a solution. Vibrations resulting vertical and lateral dynamic movements cannot supply the expected level in terms of vehicle safety, handling and comfort at high speeds. In the studies focused on suspension systems for reducing the dynamic effects, active and semi-active suspension technologies, which contain a control mechanism in place of conventional passive systems, have come to the forefront. In addition to passive elements, in the active suspension systems actuators and controllers are added to the system, while in semi-active suspension systems, it is tried to find a solution by controlling only the damping element without adding the actuator to the system. Another method that is developed to reduce vibration is the optimization of suspension systems. In this review, the dynamic motions in rail vehicles, methods of modeling and rood inputs are examined and the effect of active, semi-active system and optimization methods on reducing vehicle vibrations are discussed. It is concluded that the most effective method for reducing vibration was active systems but is not feasible in practice. In the present study, it is aimed to guide the future researchers who will practice on modeling and reducing the vibrations of railway vehicles.

**Keywords:** Rail vehicles, Suspension systems, Vibration

## 1 Giriş

Hayatın her alanında insanların ve eşyaların bir yerden bir yere taşınması ulaşım araçları sayesinde yapılabilmektedir. Karayolları, bireysel kullanımın olabilmesi ve maliyet azlığı sebebiyle en çok tercih edilen ulaşım tipi olmuştur. Ancak, son dönemlerde demiryolu taşımacılığının önemi giderek artmakta olup, özellikle Kuzey Avrupa ve Uzak Doğu ülkelerinde demiryolu taşımacılığına yapılan yatırımlar hızlanmaktadır. Fazla sayıda yolcu taşıyabilmesi ve enerjide tasarruf sağlaması bu ülkeler için demiryolu taşımacılığını ön plana çıkaran unsurlardır. Tablo 1'de Türkiye'de ve Dünya'da yüksek hızlı tren ile taşınan yolcu sayısındaki değişiklikler 2010-2016 yılları arası için gösterilmiştir. Buna göre birçok ülkede her geçen sene hızlı tren kullanan kişi sayısı artmaktadır. Türkiye'de de 6 sene içerisinde km başına taşınan yolcu sayısı 1.4 milyon artmıştır ve bu da hızlı tren taşımacılığına verilen önemi göstermektedir. Ancak bu gelişmeye rağmen, Türkiye, aynı nüfusa sahip olduğu benzer ülkelere nazaran yüksek hızlı tren ile taşınan yolcu sayısında henüz çok gerilerde kalmış

görünmektedir. Bu durum, Türkiye'nin bu konuda gerekli altyapı ve planlamaları yapıp yolcu taşımacılığında yüksek hızlı trenlerin payını artırması gerektiğini de ortaya koymaktadır.

Şekil 1'de Türkiye'deki mevcut ve planlanan hızlı tren (HT) ve yüksek hızlı tren (YHT) hatlarına yer verilmiştir. 2017 yılı verilerine göre ülkemizdeki hızlı tren hattı uzunluğu 1213 km'dir ve bu hatlar İstanbul, Ankara, Eskişehir, Konya, İzmit, Sakarya ve Bilecik olmak üzere 7 ilden geçmektedir. Devam eden projeler ile başta Ankara-İzmir ve Ankara-Sivas olmak üzere birçok hızlı tren hattı yapılmakta olup 2023 yılı itibarıyla 9195 km'lik uzunluğa ulaşılması beklenmektedir [1].

Türkiye, demiryolu araçları, özellikle de metro ve tramvay araçlarının üretimi konusunda ilerleme kaydedip, yurtdışına ihraç edebilen bir pozisyona gelmiş durumdadır. Ancak, hızlı tren ağının genişlemesine rağmen, hızlı tren setlerinin üretimi yurtiçinde henüz yapılamamakta olup, ithal edilmektedir.

Şekil 2'de, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından kullanılan Velaro yüksek hızlı trenlerine bir örnek verilmiştir.

Tablo 1: Dünya’da YHT taşımacılığı (Milyon yolcu/km) [1].

ÜLKE/YIL	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Çin	46.3	105.8	144.6	214.1	282.5	386.3	464.1
Japonya	76.9	79.6	84.2	87.4	89.2	97.4	98.6
Kore	11	13.6	14.1	14.5	14.4	15.1	16.3
Fransa	51.9	52	51.1	50.8	50.7	50	49.1
Almanya	23.9	23.3	24.8	25.2	24.3	25.3	27.2
Türkiye	0.5	0.7	0.9	1.2	1.6	1.8	1.9
İspanya	11.7	11.2	11.2	12.7	12.8	14.1	15.1
İtalya	11.6	12.3	12.3	12.8	12.8	12.8	12.8
Toplam	233.8	298.5	343.2	418.7	488.3	602.8	685.1



Şekil 1: Türkiye’de mevcut ve planlanan HT/YHT hatları [1].



Şekil 2: TCDD yüksek hızlı treni [2].

Raylı taşıt sektöründe son teknoloji ürünler üzerine yapılan çalışmalar da hızlandırılmıştır. Hyperloop adı verilen ve ray ötesi sistem olarak tanımlanan araçlarda sistemin, hava kompresörleri ve asimetrik motorlar tarafından sürülen basınç kapsülleri içerisinde 1220 km/sa. hıza ulaşması hedeflenmektedir. Şekil 3’te gösterilen araç geleceğin en yenilikçi ulaşım teknolojisi olarak adlandırılmaktadır.

Hız beklentilerinin yükselmesi ile beraber, raylı taşıt dinamiği konusu da önemini arttırmaktadır. Raylı taşıtlarda dinamik hareketler, esas olarak yanal ve düşey doğrusal hareketleri olarak değerlendirilir. Bu hareketler ray pürüzlülükleri, kurp geçişleri, tekerlek aşınmaları, aerodinamik kuvvetler gibi etkenlerden oluşurlar. Bu doğrusal hareketler yuvarlanma, kafa

urma ve yalpa gibi dönme hareketlerine de sebebiyet vermektedirler.



Şekil 3: Hyperloop teknolojisi [3].

Raylı taşıt dinamiği çalışmalarında öncelikli olarak aracın ve yol koşullarının modellenmesi gerekir. Modelleme yöntemi olarak tam, yarım ve çeyrek taşıt modelleri kullanılıp, kuvvet-moment dengeleri ile gerekli hareket denklemleri çıkarılabilir [4],[5]. Bununla birlikte, bilgisayar yazılımları ile modelleme de son yıllarda gerçeğe yakın modellerin oluşturulması için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Araçlar, bu yazılımlar ile modellenmekte ve gerçek araç cevapları bu modeller ile daha hızlı elde edilebilmektedir [6]-[9].

Raylı taşıtlarda dinamik hareketler sonucu oluşan titreşimler, konfor öncelikli olmak üzere araç kararlılığı, raydan çıkma gibi konularda olumsuz etki yaratmaktadır. Titreşimler genelde ray pürüzlülükleri, tekerlek profilleri, kurp geçişleri gibi etkenlerden oluşmaktadır. Bu titreşimlerin azaltılmasında süspansiyon sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar oldukça etkili sonuçlar vermiştir. Süspansiyon optimizasyonu çalışmaları ile süspansiyon parametrelerinin optimize edilmesi ve bu sayede özellikle araç konforunun iyileştirilmesi hedeflenmiştir [10]-[12]. Konfor dışındaki araç dinamik karakteristiklerine de yine optimizasyon yöntemi ile çözüm aranmıştır [13],[14].

Süspansiyon optimizasyonu pasif sistemler üzerindeki yay ve damper katsayılarının belirlenmesi çalışması olup, titreşimlerin azaltılması için sınırlı faydalar sağlamaktadır. Bu sebeple daha yüksek düzeylerde bir iyileştirme için pasif sistemler yerine aktif sistemler çözüm olarak sunulmuşlardır. Aktif süspansiyon sistemleri pasif sistemlere sensör, eyleyici ve kontrolcü gibi elemanların eklenmesi ile oluşturulur. Bu sistemler ile araçlarda oluşan titreşimlerin yüksek düzeylerde azaltılabildiği ve konfor seviyelerinin iyileştirilebildiği görülmüştür. Aktif sistemler farklı kontrolcüler ile çalışabilmektedir. Skyhook yöntemi bunlardan biridir [15],[16]. Bunun dışında  $H_\infty$ ,  $H_2$ , PID, LQG gibi kontrol metotları ile de aktif çözümler elde edilebilmektedir [17]-[20]. Birden fazla kontrolcü ile karşılaştırma yaparak hazırlanmış çalışmalar da bulunmaktadır [21].

Yarı aktif süspansiyon sistemleri ise aktif sistemlerden farklı olarak eyleyici bulundurmadan sadece sönümleyiciyi kontrol ederek titreşim azaltılmasını sağlarlar. Aktif sistemlere göre daha az maliyetli ve basit yapıdadırlar. Çalışmalarda sönümleyiciler genellikle Skyhook yöntemi ile kontrol edilmiştir [22],[23]. Yapısında manyetik alan ile kontrol edilebilen magneto reolojik sıvı içeren Magneto Reolojik (MR) sönümleyiciler çözüm olarak sunulmaktadır [24],[25].

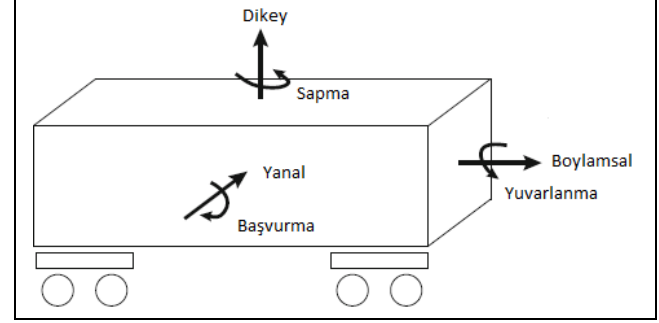
Bu derleme çalışmasında, raylı taşıtlarda oluşabilecek dinamik hareketler ile ilgili genel bilgi verilmekte olup, farklı modelleme ve simülasyon yöntemlerinin model doğruluğu ve dinamik sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, dinamik hareketler sonucu oluşacak titreşimlerin azaltılması için kullanılan aktif ve yarı aktif sistemler ile optimizasyon yöntemleri açıklanmakta ve kullanım durumlarına göre avantajları ele alınmaktadır. Bu derleme, raylı taşıt dinamiği çalışmalarını için bir ön bilgi niteliği taşımakta olup, titreşimlerin azaltılması konusunda yapılmış çok sayıda bilimsel çalışmada kullanılan yöntemleri içermektedir. Bu alanda çalışacak kişi ve kurumlara, araç modelleme ve titreşimleri azaltmada en uygun yöntemin bulunması için katkı sağlaması hedeflenmektedir. Aynı zamanda, raylı taşıt dinamiğinin uluslararası düzeyde geldiği noktanın gösterilmesi, bilgi ve tecrübeli insan gücü yetiştirilmesine destek olması amaçlanmaktadır.

## 2 Raylı taşıtlarda dinamik hareketler

Raylı taşımacılıkta gelişen teknoloji ile yüksek hızlı tren ve metro hatlarına doğru yönelim olmaktadır. Yüksek hızlı araçlara olan bu yönelimler üretim giderlerinin, enerji tüketiminin ve teker ray arasındaki etkileşimin azalmasını sağlayan daha hafif araç gövdelerine duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Araç ağırlıklarındaki azalma yapısal katılığın azalmasına ve aynı zamanda düşük doğal frekansların ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum rezonans titreşimlerinin oluşma riskini artırır ve yolcu konforunu olumsuz yönde etkiler. Araç ağırlığında değişme olmasa bile

yüksek hızlar daha fazla kuvvet ve ivmelenmeye sebebiyet vereceğinden yolcu konforu sürekli tartışılması ve araştırılması gereken bir konu haline gelmiştir. Bu sorunlara çözüm bulabilmek için raylı araç dinamiği alanında yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır [26].

Bir katı cisim uzayda 6 farklı serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 4'te bir aracın serbestlik derecesine bağlı olarak maruz kalabileceği dinamik hareketlere yer verilmiştir.



Şekil 4: Araç dinamik hareketleri [4].

Serbestlik dereceleri yüksek olan raylı taşıt sistemlerinin dinamik olarak farklı yönleri ile ele alınması gerekmektedir. Sektördeki firmaların araç dinamiği açısından en büyük beklentisi sürüş güvenliğidir. Örneğin, manevra karakteristiğinin yetersiz oluşu sonucu oluşabilecek raydan çıkmalar istenmemektedir. Bir diğer beklenti ise yolcular tarafından kabul edilebilir derecede bir konfor sağlamasıdır. Bu istek bir sonraki nokta olan kârlılık konusunu gündeme getirmektedir. Konfor seviyesi düşük olan bir araç müşteri beklentisini karşılayamayacağından yüksek bir gelir sağlamayacaktır. Bütün bu beklentiler piyasaya sürülecek bir raylı taşıtta değerlendirme kriterlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bir sonraki aşama ise ömür süresi maliyetlerinden oluşmuştur. Raylı bir taşıtta dinamik istekleri belirlerken aşağıdaki değerlendirme kriterleri göz önünde bulundurulmaktadır:

- Aracın raydan çıkması gerekmektedir,
- Araç herhangi bir hareket esnasında devrilmemelidir,
- Araç yanal yönde raydan kaymamalıdır,
- Yolcular için kabul edilebilir bir konfor derecesinde olmalı ve aynı zamanda gürültü seviyesi tolere edilebilir eşik değerinin üzerine çıkmamalıdır,
- İstenilen hıza ulaşmak, bu hızı devam ettirmek ve rampa çıkışları başarmak için çekiş sistemi yeterli çekiş gücünü sağlamalı ve aktarma organları bu gücü tekerlerden raya aktarmalıdır,
- Güvenliği sağlayan parçalarda arızalar çıkmamalı ve komponentlerde yorulma vb. kaynaklı yıpranma ve zarar olabildiğince az olmalıdır,
- Kabul edilemez seviyede (özellikle balast yerleşiminden kaynaklı) yol pürüzlülüğünden kaçınılmalıdır [27].

### 2.1 Düşey dinamik hareketler

Bir raylı taşıt hareket süresince sürüş kalitesi, güvenliği ve konforuna etki edecek düşey yönde titreşimlere maruz kalmaktadır. Düşey titreşimler genel olarak raylar üzerindeki pürüzlülükler sebebiyle oluşmaktadır. Raylardaki bu düzensizlikler bojiler tarafından araç gövdesine ve yolculara



iletilmektedir. Tekerlek setlerinin yapısı, ray ve tekerlek temas yüzeyleri, süspansiyon elemanlarının katlılıkları ve boji gövde arası bağlantılar da bu titreşimlerin oluşmasına sebep olabilmektedir.

İleri düzeylerde düşey sürüş konforunu sürdürülebilir kılmak için birçok yol haritası bulunmaktadır. Düşey titreşimler, sistemin yapısal katılık düzeylerine odaklanarak ya da sönümleme elemanlarını optimize ederek belli seviyelere düşürülebilir. Daha sonuç odaklı çözümler ise aktif sistemlerin kullanılması ile mümkündür. Ancak maliyetli olması sebebiyle aktif sistemlerin gerçekleştirilebilirliği tartışılmaktadır.

## 2.2 Yanal dinamik hareketler

Raylı taşıtlarda her gün gerçekleşen uygulamalarda, rayların yapısındaki kusurlardan ve virajlardan kaynaklı güçlü yanal etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler özellikle işletimsel hızlarda, viraj yerleşiminden ve raylardaki yüzey hatalarının büyüklüklerinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak araçlar yüksek yanal süspansiyon sapmalarına maruz kalmakta ve rayların temas merkezlerine göre araç gövdelerinde yanal yer değiştirmelerine neden olmaktadır. Son yıllardaki raylı taşıtlardaki enerji tüketimini azaltmaya yönelik hafifletme çalışmaları ise aracın rüzgâr etkisine daha duyarlı olmasına sebep olmaktadır. Bu da yanal bir etki yaratıp özellikle virajlarda büyük risk oluşturmaktadır. Son yıllardaki viraj dönmesi esnasında meydana gelen kazalar da bu aerodinamik etkinin önemini vurgulamaktadır [28].

Yanal yönde gerçekleşen titreşimlerin sebeplerinden biri olan tekerlek setlerinin yapısı, tekerlek ve ray arası temas bölgelerinin önemine vurgu yapmaktadır. Konik formdaki tekerlek setleri yüksek hızlara ulaştığında yanal yönde sinüzoidal bir hareket ortaya çıkarırlar. Dönme hareketi devam ettikçe tekerlek setlerinin ağırlık merkezi sağ ve sol tekerleklere doğru değişkenlik göstermektedir. Küçük yanal yer değiştirmeler ile oluşan bu harekete aynı zamanda salınım hareketi de denmektedir. Bu hareket tamamıyla kinematik bir prosestir ve hareketin dalga boyu dönme yarıçapı, tekerlek temas noktasının merkeze mesafesi ve koniklik açısına bağlıdır.

Yüksek hızlarda viraj alma hareketi boyunca araç gövdesi boji ve ray bağlantılarının da etkisi ile yanal yönde dışı doğru hareket etmeye yönelir. Bu yanal yönelimler lastik takozların etkisiyle sınırlandırılmaktadır. Lastik takozlarda temaslar görüldüğünde en yüksek ivmelenmeler oluşur ve sürüş konforu iyice kötüleşir. Araç gövdesinin yanal yer değiştirmesi minimize edilebilirse lastik takozların teması da engellenmiş olur.

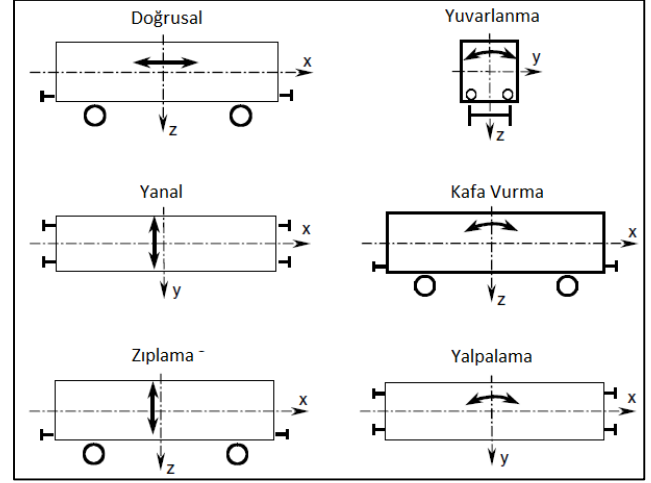
## 3 Raylı taşıtların modellenmesi

### 3.1 Hareket denklemleri ve yol girdileri

Raylı taşıt dinamiği, bir araçta Şekil 5'te gösterilen farklı hareketler sonucu oluşabilecek titreşimlerin minimize edilmesini amaçlamaktadır. Özellikle düşey ve yanal yöndeki titreşimler ile sapma ve yuvarlanma açısal hareketleri günümüz hızlı trenlerinin konfor kısıtlarına neden olan unsurlardır. Hareket denklemleri çıkartılırken de bu açısal hareketler temel alınarak kuvvet ve moment dengesi ile denklemler oluşturulur.

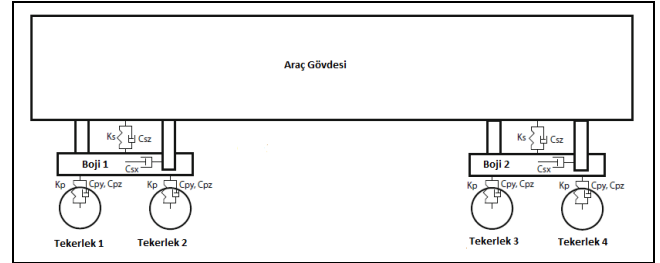
Raylı taşıt dinamiği konusunda titreşim azaltılması amacıyla yapılan birçok çalışmada ilk olarak sistemin modeli oluşturulup hareket denklemleri çıkartılmıştır. Farklı serbestlik dereceleri ile oluşturulan modellerde hareket denklemlerinin

çıkartılmasında en önemli unsur aracın maruz kalacağı hareketlerin ve yönlerinin saptanmasıdır.



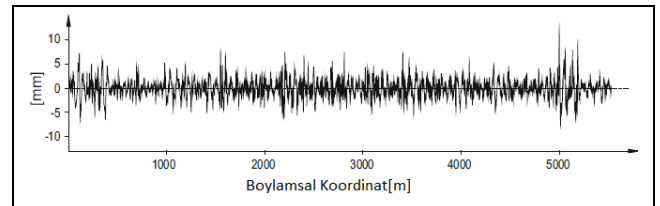
Şekil 5: Raylı taşıtlarda titreşim modları [29].

Aboud ve Khan (2010) ise yine 31 serbestlik dereceli model kullandıkları ve simule ettikleri çalışmalarında ikincil süspansiyon sisteminde bulunan yayların katılık değerlerinin değişiminin düşey araç titreşimlerine etkisini incelemiştir [14]. Demir (2016) çalışmasında çoklu gövde dinamiği yöntemini kullanarak bir metro aracındaki süspansiyon elemanlarının sönümleme ve katılık özelliklerini belirlemeyi amaçlamış ve bunu yaparken 31 serbestlik dereceli modelde (Şekil 6) hareket denklemlerini araç gövdesi, boji ve tekerlek setleri için ayrı ayrı çıkarmıştır [4].



Şekil 6: 31 serbestlik dereceli modele ait elemanlar [4].

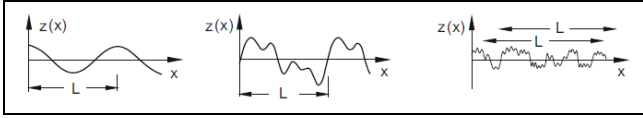
Raylı taşıt dinamiği araştırmalarında çoğu zaman raylar katı ve sabitlenmiş olarak alınmaktadır. 200 Hz frekans değerinin üzerindeki ray ve tekerlek arası kuvvetlerin simülasyonlarda olması istenirse basit ray modellerinin oluşturulması gerekecektir. Titreşime sebep olan tahrikler, ray bozuklukları ve tekerlek ray arası temas bölgelerinde tahrike sebep olan istenmeyen ovalliklerin sonucudur. Bununla birlikte bazen tekerleklerin dengesizliği ile aerodinamik koşullar da yol bozukluklarına sebebiyet vermektedir. Şekil 7'de Göttingen-Hannover hattına ait bir yol pürüzlülük grafiği verilmiştir.



Şekil 7: Düşey Yol Pürüzlülükleri [30].

Yol bozukluklarına sebep olan tahrikler Periyodik, Deterministik ve Stokastik olarak üç grupta incelenmektedir. Raylı taşıt tekerleklerindeki ovalikler ile ilgili sorunların sebep olduğu tahrikler periyodik tahriklerdir. Her bir turda kendini tekrar etmektedir. Deterministik tahrikler periyodığe göre daha yaygın kullanılmaktadır, makaslar ve kesişen yollar, rüzgârın etkisi, köprü ve diğer geçişlerdeki yapısal farklılıklar ve travers bozuklukları gibi sebepler bu titreşimleri ortaya çıkarmaktadır. Stokastik tahrikler ise çalışmalarda en yaygın kullanılan ve gerçeğe en yakın yol bozukluk nedenleridir. Şekil 8'de bu 3 farklı tahrikin sebep olduğu bozukluklara yer verilmiştir.

Stokastik bozukluklar ve bunun sonucu oluşan düzenli titreşimleri karakterize edebilmek için periyodik ve deterministik bozukluklardan daha farklı yöntemler kullanılmaktadır. Aritmetik ortalama değer  $\bar{z}$  ve kuadratik ortalama değer  $\overline{z^2}$  pürüzlü bir yolda ray düzensizliklerini karakterize etmektedir. Hesaplama yapabilmek için sonsuz uzunlukta bir sürecin seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 8: Periyodik, Deterministik ve Stokastik Bozukluklar[30].

Stokastik bozuklukların belirlenmesinde kullanılan güç spektrumu birçok yerel demiryolu şirketine göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S_z(\bar{\Omega}) = \frac{A_v \Omega_c^2}{(\bar{\Omega}^2 + \Omega_r^2)(\bar{\Omega}^2 + \Omega_c^2)} \quad (1)$$

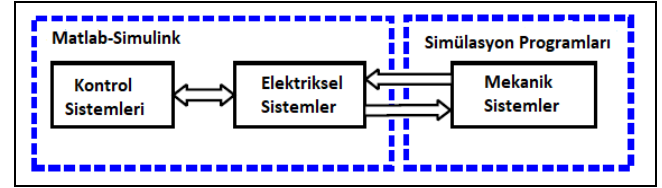
Bu analitik formüller günümüzde birçok ülkede kabul görmüş ve uygulaması devam etmektedir. ABD ve Çin gibi tren dinamiği çalışmaları yapılan ülkelerde hala güç spektrumu yol pürüzlülüklerini tanımlamada kullanılmaktadır. Güç spetral yoğunluk  $S_z(\bar{\Omega})$ ,  $m^2 \left(\frac{rad}{m}\right)$  birimi ile ilişkilendirilir.  $A_v$  ve  $\Omega$  ise gerekli katsayılarıdır. Bu yol pürüzlülükleri zaman adım bütünlüşmesi için bir girdi olmaktadır. Farklı çalışmalarda farklı mesafelerde güç spektra değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlarda bulunan güç spektrum değerleri mesafenin uzunluğundan genellikle bağımsız çıkmaktadır. Sadece 4.5 km ve 5.5 km arası sonuçlar farklılaşmaktadır.

Raylı taşıt dinamiğine yönelik birçok çalışmada araştırmacılar yol pürüzlülük değerlerini güç spektrumu yöntemi ile elde etmişlerdir. Lin ve diğ. (2006), raylı taşıtlar için Skyhook yöntemini kullanarak aktif süspansiyon modeli tasarımı yapmış ve düşey yol datası için yine güç spektral yoğunluk formülünü kullanmışlardır [31]. Wang ve diğ. (2013) çalışmalarında Simpack programında oluşturdukları bir hızlı tren modeli ile kritik hız analizi yapmışlar, düşey düzensizlik ve hizalama düzensizlik güç spektral yoğunluk değerlerini Matlab programında elde etmişlerdir [32]. Eriş ve diğ. (2015) aktif damper sistemi geliştirdikleri çalışmalarında düşey yöndeki yol profili karakteristiğini stokastik proses olarak düşünmüşler ve güç spektral yoğunluk formülü ile elde etmişlerdir [33].

### 3.2 Modelleme ve simülasyon

Ticarileşme ve teknolojik gelişime yönelik konfor arayışı, raylı araçlar dinamiğinde gürültü, emniyet, titreşim vb. araştırmaların sayısını her geçen gün arttırmaktadır. Bu konularda yapılan çalışmalarda da raylı taşıtlarda matematiksel modeller kullanılmış ve bilgisayar

simülasyonları ile modeller desteklenmiştir. Sonuçlar gerçeğe yakın çalışma koşulları üzerinden araç dinamik hareketlerinin herhangi bir uygulama gereksiz tahmin edilebilmesini sağlamıştır. Bu sayede henüz sistemler tasarım aşamasındayken bazı çözümler geliştirilip bunların imalata yansması sağlanmıştır. En büyük amaç gerçeğe en yakın çözümler sunabilmektir. Dolayısıyla herhangi bir raylı taşıtın modeli çıkarılırken doğruluk payını arttırabilmek için sistemin tüm serbestlik derecelerinin saptanması gerekmektedir. Ancak bu da sistemi karmaşık bir hale getirerek çözümü daha da zorlaştırabilmektedir. Bu sebeple en optimum serbestlik derecesini verebilmek için bazı tecrübeler ihtiyacı duyulmaktadır [27]. Konfor hesaplamaları ve stabilite araştırmaları için, 25 Hz civarı düşük frekans aralığındaki sistemin öz değer frekanslarının yinelenebileceği modeller oluşturmak genellikle yeterli olacaktır. Oluşturulan bu koşullarda, araç gövdesinin her birine yay ve sönümleyiciler aracılığı ile bağlı olan şasi ve tekerlek akslarını katı model olarak almak yeterli olacaktır. Araç gövdesi genellikle 6 serbestlik dereceli katı cisim ve ilk elastik normal modda modellenir. Bu hesaplamalar yapılırken bazı çalışmalarda araç simetrik olarak düşünülerek modellenir. Şekil 9'da görüldüğü gibi simülasyon programlarında oluşturulan mekanik sistemler farklı programlar aracılığıyla diğer sistemler ile birlikte çalışabilir.



Şekil 9: Modelleme yöntemi [34].

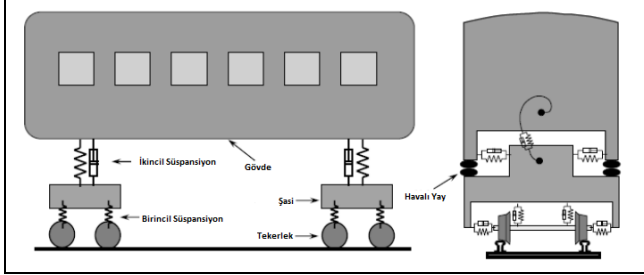
Adams Rail, Matlab, Simpack, Vampire ve Vocogibi modelleme programları formüle etme ve hareket denklemlerini çözme konusunda mühendislerin işlerini kolaylaştırmakla beraber aynı zamanda sürüş konforu ve tekerlek-ray kuvvetlerini tahmin etmek için gerekli hesaplamaları yapan işlem sonrası araçlarını da sağlamaktadır. Bu yazılım sistemleri 3 boyutlu birleştirilmiş düşey ve yatay modellerin hesaplamalarını yapabilmektedirler [30].

Tablo 2'de farklı çalışmalardan alınmış ve farklı programlar ile oluşturulmuş modeller görülmektedir.

Tablo 2: Raylı araç simülasyon programları [6]-[9].

Program	Model
Simpack	
Vampire	
Adams/Rail	
Matlab	

Bu modellerde her bir şasi birbirine katı bir aks ile bağlanmış çiftler halinde olan ve aynı hızla iki adet tekerlek çiftinden oluşmuştur. Tekerlek setleri birincil süspansiyon elemanları ile şasiye bağlanmıştır. Şekil 10'da görüldüğü gibi şasi ile gövde arasındaki bağlantı ise ikincil süspansiyon elemanları ile sağlanmaktadır. Bu süspansiyon elemanları aracın güvenliğini ve stabilitesini sağlayabilmek için tasarlanmış olup ikincil süspansiyonlara göre çok daha katı elemanlar içermektedir.



Şekil 10: Bir raylı taşıtta gövde ve boji konfigürasyonu [35].

Raylı taşıtlarda konfor ve titreşim analizi çalışan birçok araştırmacı çalışmalarında farklı süspansiyon konfigürasyonu ve farklı serbestlik dereceleri kullanarak modellerini oluşturmuş ve simule etmişlerdir. Örneğin; Stribersky (1997), Simpack programı kullanarak devrilme hareketini engelleyici aktif sistemlerin kullanıldığı bir raylı taşıtın matematiksel modellemesi yapmış ve simülasyon sonuçlarını prototip aracın test sonuçları ile karşılaştırmıştır [36]. ShuGuang ve diğ. (2007) tren ve tren rayları arasındaki bağlantı dinamiğini tekerlek/ray arası temas bölgeleri, tren yapısı, elektrik/pantograf sistemi ve yüksek hızlardaki hava akışını simule eden kapsayıcı bir model oluşturmuş ve tekerlek ray temaslarının avantaj ve dezavantajlarını derlemiştir [37]. Kondo ve Yamazaki (2013) çalışmalarında, bir metro ulaşım sistemindeki her bir bojinin kinematik performansının hesaplanmasında ve kullanılan bir doğrultu için tekerlek akslarında oluşan gerilme streslerinin tahmininde, Simpack programında tek bir bojiyi modelleyerek bilgisayar simülasyonu ve bağlantılı hesaplama teknolojilerini kullanmışlardır [38]. Jeong ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, 25 m yarıçaplı bir virajı dönebilen ve aynı zamanda şehir içinde 200 km/sa. hıza ulaşabilen bir tramvay aracı için bir boji tasarlamayı amaçlamışlardır. Aslında gerçek bir aracı test etmenin dışında, 10 adet çekiş motoru olan 5 boji ile entegre edilmiş 5 vagonlu bir aracın dinamik özelliklerini, konfor ve güvenlik performanslarını elde edebilmek için Adams Rail programı ile sanal bir model oluşturulmuştur [39]. Shi ve Wu (2016) ise Beijing-Shanghai hattında kullanılan bir trenin rezonans seviyelerini ölçmek için titreşim testleri uygulamış ve Simpack ile oluşturduğu doğrusal olmayan çoklu gövdeli sistemini kullanarak ve buna sonlu elemanlar yöntemi yazılımı(Ansys) ile esneklik değerleri de ekleyerek 3 boyutlu bir modelin titreşim değerleri ile karşılaştırmıştır [40]. Zhang ve diğ. (2017) yine Simpack programını kullanarak gerçek aracın ve test aracının dinamik modelini oluşturup karşılaştırma yapmışlar ve oluşan küçük farkların süspansiyon karakteristiğinden neticelendiği sonucuna varmışlardır [41]. Pradhan ve Samantaray (2017), Bond Graph (Bağ Grafiği) metodu ile oluşturulmuş araç ve insan biodinamik modelleri ile Adams VI-Rail programında simülasyon gerçekleştirmiş, modellenen aracın düşey ve yatay yönde hareketlerinin yolcu konforuna olan etkisini incelemişlerdir [42].

#### 4 Titreşim azaltma yöntemleri

Raylı taşıt mühendisliğinde sürüş konforu önemli bir konu başlığı olarak ön plana çıkmaktadır. Raylı taşıtlardaki titreşimler ray düzensizlikleri, hat eğimi, kavis, ray profili, tekerlek yapısı, profili ve süspansiyon sistemlerini içeren bir dizi elemandan etkilenen karmaşık bir yapıdır. Yolcular konforsuz sürüşü yüksek hızlarda bile istememekte ve stabil bir sürüş beklemektedir. Bu durumda sürüş konforunu ve düzensiz raylardaki titreşimlerin azaltılmasını sağlayan süspansiyon sistemlerinin önemi daha da artmaktadır. Bununla birlikte çoğu geleneksel süspansiyon sistemleri sürüş konforunu sağlama adına belli kısıtlar içermektedir ve sonuç olarak da yarı aktif ve aktif süspansiyon sistemleri çözüm olarak ortaya çıkartılmıştır.

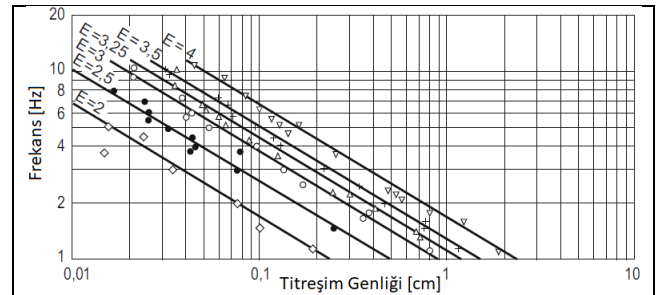
Sürüş konforunun karayolu ve raylı ulaşım araçlarındaki karşılığını belirlemek için ilk olarak titreşim cevapları ölçülmeli ve hesaplanmalıdır. Bunun üzerine yapılan varsayımlarda konfor ivmelenme ile tanımlanmıştır. İvmelenme önemli olmakla birlikte frekans değerleri de konforu belirlemede incelenmesi gereken etkenlerdendir. Sürüş konforu birçok farklı ölçüt ile değerlendirilmiştir. Bunlardan en önemlisi olan Sperling indeksinde sürüş konforunu tanımlayan ve deneysel veriler ile bulunmuş Tablo 3'te gösterilmiş konfor dereceleri belli numaralar ile genelleştirilmiştir.

Tablo 3: Sperling konfor dereceleri [30].

E	Tanım
1.0	Fark edilebilir
2.0	Kolaylıkla fark edilebilir
3.0	Duyulabilir fakat tolere edilebilir
3.25	İleri seviyede fark edilebilir, hala tolere edilebilir
3.5	Çok güçlü ve çekilmez, uzun bir süreden sonra tolere edilemez
4.0	Son derece güçlü ve çekilmez, uzun bir süreden sonra tehlikeli

Deneysel veriler ile elde edilen konfor dereceleri frekans ve titreşim genliği üzerinde formüle edilmiş ve Şekil 11'deki gibi grafik üzerine de aktarılmıştır.

$$E = 3.1 \sqrt[10]{x^3 f^5} \quad (2)$$



Şekil 11: Frekans ve genlik değerlerine bağlı konfor dereceleri [30].

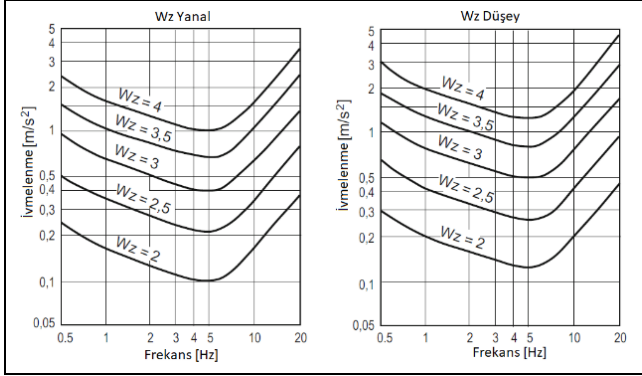
$E(x, f)$  konfor dereceleri genelde yatay yöndeki konfor sınıflandırması için uygulanmakta olup düşey ve yatay yönlü genelleştirilmiş çalışmalarda  $W_z$  konfor sınıfı kullanılmaktadır.

$$W_z = 2.7 \sqrt[10]{x^3 f^5} \quad (3)$$

Titreşim genliği yerine ivme değerleri kullanılırsa;

$$Wz = 0.896 \sqrt[10]{\frac{a^3}{f}} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir, Şekil 12'deki grafiklerle de gösterilir. E konfor sınıflarından farklı olarak tanımlanmış Wz konfor sınıflarına da Tablo 4'te yer verilmiştir.



Şekil 12: Yatay ve düşey konfor dereceleri [30].

Tablo 4: Wz konfor sınıfları [30].

WzG	Sürüş Tanımı
1.0	Çok iyi
2.0	İyi
3.0	Tolere edilebilir
3.5	Kısmen tolere edilebilir
4.0	Çalışabilir
4.5	Çalışamaz
5.0	Tehlikeli

ISO 2631 titreşimlerin konfor ve insan sağlığı açısından değerlendirilme metodlarını belirleyen uluslararası bir standarttır. Raylı taşıtlar için geliştirilen bir standart değildir ancak araç ve cihazlar için genelleştirilmiştir. Raylı taşıtlar için ise bu standartta göre hesaplanmış değerler UIC 513 ve EN12299 standartlarında kullanılarak sonuçlandırılmaktadır. Tablo 5'te belirtilen CEN standartlarına göre oluşturulan konfor sınıfı  $N_{mv}$  ile açıklanmış ve Denklem (5)'teki gibi formülize edilmiştir:

$$N_{mv} = 6 \cdot \sqrt{(a_{x95.wd})^2 + (a_{y95.wd})^2 + (a_{z95.wd})^2} \quad (5)$$

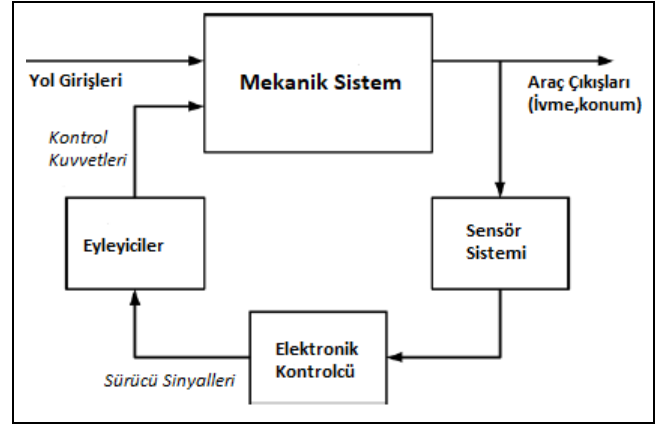
Tablo 5:  $N_{mv}$  konfor sınıfı [30].

$N_{mv}$	Sürüş Tanımı
$N_{mv} < 1$	Çok konforlu
$1 \leq N_{mv} < 2$	Konforlu
$2 \leq N_{mv} < 4$	Orta düzey
$4 \leq N_{mv} < 5$	Konforsuz
$N_{mv} \geq 5$	Çok konforsuz

Sürüş konforunda gerçek değerlere ulaşabilmek için yol yapısının ve düzensizliklerin bilinmesi gerekmektedir. Sürüş konforu bir sistem özelliği olup araç özelliklerine, yol yapısına ve işletim koşullarına bağlıdır [30].

#### 4.1 Aktif süspansiyon sistemleri

Raylı taşıtlarda aktif teknolojiler yıllardır araştırılmakta olup pasif sistemler ile karşılaştırıldığında büyük yarar sağlamaktadırlar. Aktif süspansiyon sistemlerinde mekanik komponentler yol girişlerindeki bozuklukları sensörler, kontrolçüler ve eyleyiciler aracılığıyla Şekil 13'te gösterilen işleyiş ile minimum seviyeye indirgemektedir.



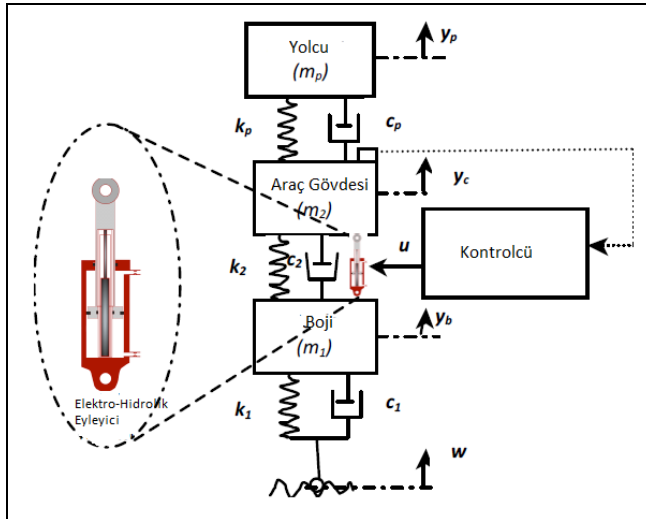
Şekil 13: Aktif süspansiyon işleyişi [43].

Yüksek hızlarda ya da ray düzensizlikleri istenen düzeyde olmadığı aktif sistemlerin belirgin avantajı ön plana çıkmaktadır. Sonuç olarak aktif sistemler bu gibi durumlarda maliyet etkili çözümler sunmaktadır. Kayda değer sonuçlarına rağmen aktif süspansiyon sistemleri operasyonel kullanımlarda ikna edici bir atılım haline gelememiştir (Yatar gövdeli tren teknolojisi dışında). Aktif süspansiyon teknolojisinde tam olarak bir başarı elde edilememesinin sebebi sağladığı faydalarına karşın uygulamada çok maliyetli bir hal almasıdır.

Aktif süspansiyon teknolojisi ile sürüş konforunu arttırmak için yapılan çalışmalar literatürde hem normal araçlar hem de raylı taşıtlar için görülebilmektedir. Mariyama ve diğ. (1997), Shinkansen test aracı üzerinde yaptıkları çalışmada  $H_{\infty}$  kontrolcülü aktif süspansiyon tasarımı yapmışlar ve araca entegre ederek dayanım testlerini gerçekleştirmişlerdir [17]. Goodall ve Foo (1999) çalışmalarında esnek araç gövde modellerine sahip araçlarda klasik aktif süspansiyon kontrolcülerini kullanmış ve esneklik etkisini bu sayede minimize etmeye çalışmışlardır. Aktif kontrolü ikincil süspansiyona yerleştirdikleri eyleyiciler ve Skyhook kontrol teorisi ile gerçekleştirmişlerdir [15]. Zolotas ve diğ. (2005) çalışmalarında Simpack programı ile oluşturdukları 7 serbestlik dereceli hafif raylı taşıt modeline Simulink programı ile aktif kontrolcü tasarlayıp entegre etmiş ve kompleks modeller üzerinden aracın aktif stabilitesini kontrol etmişlerdir [44]. Schandl ve diğ. (2007), Simpack modeliyle oluşturdukları tek araç modeli üzerine yerleştirdikleri birkaç eyleyici vasıtasıyla aracın sürüş konforunu arttırmayı hedeflemişlerdir [45]. Metin ve Güçlü (2009) çalışmalarında İstanbul trafiğindeki hafif metro aracını baz alarak 22 serbestlik dereceli bir model oluşturmuş ve Matlab programı ile Fuzzy Logic kontrolcü tasarlayarak sistemin aktif kontrolünü sağlamışlardır [34]. Yine bu ikili 2010 yılındaki diğer bir çalışmalarında oluşturdukları 11 serbestlik dereceli yarım taşıt modeli üzerinde farklı yol pürüzlülükleri verileri ışığında PID ve Fuzzy Logic ile kontrol ettikleri aktif ikincil süspansiyonlardaki düşey titreşimleri incelemiş ve kontrolcü farkını araştırmışlardır [46]. Yusof ve diğ. (2010) aktif süspansiyon teknolojisinin etkilerini araştırmak için elektrohidrolik ve elektromekanik eyleyicilerin ikincil süspansiyona entegrasyonunu çalışmış ve sistemde Skyhook kontrolcü kullanmışlardır [47]. Pacchioni ve diğ. (2010), Skyhook ve LQG kontrol metodlarını kullandıkları çalışmalarında tek seviyeli aktif süspansiyon ve çift seviyeli aktif süspansiyon sistemleri arasındaki farkın iki akslı bir raylı taşıt modeli üzerindeki dinamik ve konfor etkisini



incelemişlerdir [20]. Güçlü ve Metin (2010) ise geleneksel PID fuzzy kontrolcü ve parametre adaptif fuzzy kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiş ve hem oluşturdukları 6 serbestlik dereceli hafif metro aracı modelinde hem de ABB hafif metro aracında aldıkları sonuçları karşılaştırmışlardır. 30 km/h hızda gerçekleşen çalışmada model ve gerçek araç arasında benzer sonuçlar alındığı görülmüştür [19]. Chen Lin ve diğ. (2011), üç gövdeli hafif raylı taşıt modeli üzerinde skyhook sönümleyicisi, kuvvet algoritması ve yol pürüzlülük takibi gibi aktif süspansiyon parametreleri arasında yaptıkları optimizasyon ile en uygun sürüş kalitesini ve en az süspansiyon genişlemesini amaçlayan bir çalışma yapmışlardır [48]. Ahmed ve diğ. (2014) oluşturdukları çeyrek taşıt modelinde Skyhook kontrolcü kullanarak aracın 31 m/s hızdaki aktif ve pasif süspansiyon sistemlerinin karşılaştırmasını yapmıştır [16]. Qazizadeha ve diğ. (2016) çalışmalarında Regina 250 EMU aracını modellemiş, araç hızı ile eyleyici kuvvetinin orantılı olduğu geleneksel Skyhook yöntemlerinin aksine eyleyici kuvveti ile farklı kinematik özellikleri orantılamış ve aradaki farkları incelemiştir [49]. Graa ve diğ. (2016), mekatronik tasarımını yaptıkları Şekil 14'te verilen çeyrek model raylı taşıt üzerinde yolcu konforunu arttırmak için gerçek eyleyici karakteristikleri üzerinde tartışmışlar ve ray pürüzlülük hataları ve eyleyici kuvvetleri arasında oluşturulan bağıntı ile PID ve LQR kontrolcülü model üzerinde çalışmışlardır [50].



Şekil 14: Aktif süspansiyon modeli [50].

Leblebici ve Türkay (2017), radyal elastik ve geleneksel tekerlek çeşitlerini kullanarak oluşturduğu 17 serbestlik dereceli tam taşıt modeli üzerinde H<sub>2</sub> kontrolcüsü kullanarak konforlu ve güvenli bir taşıt karakteristiği elde etmeye çalışmışlardır [18]. Eriş ve diğ. (2017) ise Geciktirilmiş Rezonatör yöntemi ile ray pürüzlülüklerinden kaynaklı titreşimleri engellemek için aktif sönümleme teknolojilerini çalışmışlardır [33]. Menga ve diğ. (2017) hidro elektrik enerji depolayan aktif radyal dönüşlü boji tasarımı yapmış ve bu sayede süspansiyonlardaki düşey yönlü yer değişikliklerini ve ivmelenmeleri minimize ederek yolcu konforunu arttırmak istemişlerdir [51]. Abobghala ve diğ. (2017) 20 serbestlik dereceli model oluşturup yerleştirdikleri yanıl eyleyiciler aracılığı ile aktif direksiyon sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır [52]. Zhengl ve diğ. (2017) ise piezoelektrik eyleyici kullanarak oluşturdukları model ile sürüş konforunu arttırmayı hedeflemişler, bunu yaparken LQG, Skyhook ve H<sub>∞</sub> gibi farklı kontrol metotları kullanmışlar ve gerekli

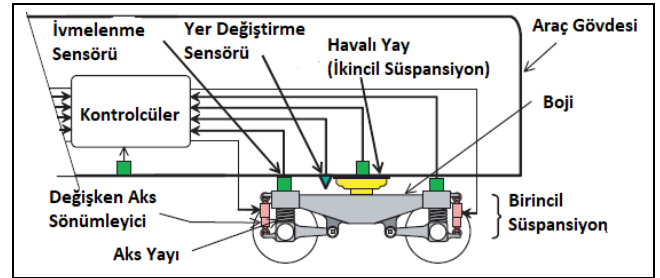
karşılaştırmaları yapmışlardır [21]. Alireza Qazizadeh (2017) ise doktora tezinde aktif süspansiyon konusunu detaylı bir şekilde çalışmıştır. Yazar çalışmada aktif süspansiyon elemanları olan eyleyiciler, sensörler ve kontrolcülerini Regina 250 Borbardier test aracına entegre etmiş ve bazı deneysel sonuçlar elde etmiştir. Sapma, başvurma ve yuvarlanma hareketlerini kontrol ederek düşey titreşimleri egale etmeye çalışan yazar, çalışmanın ikinci bölümünde ise daha çok teorik konulara değinmiş ve oluşturduğu modelde H<sub>∞</sub> kontrolcülü sistem üzerinde sonuçlar elde etmiştir. Böylece teoride var olan aktif sistemin pratikte de uygulanabilirliğini göstermiştir [53].

#### 4.2 Yarı aktif süspansiyon sistemleri

Yarı aktif süspansiyon sistemlerinin sürüş kalitesini iyileştirmede pasif süspansiyon sistemlerine göre çok daha etkin sonuçlar verdiği bilinmekle birlikte performans olarak da aktif süspansiyon seviyesine ulaştığı gözlenmiştir. Bununla birlikte hem maliyet olarak hem de basitlik olarak yarı aktif sistemler aktif sistemlere göre daha büyük avantaj sağlamaktadır (enerji tüketimi, eyleyici ve sensör gibi donanım maliyeti).

Yarı aktif süspansiyon sistemleri kontrolcüler, sensörler ve yarı aktif sönümleme elemanlarından oluşmaktadır. Sistemdeki kontrolcünün görevi gerekli sönümleme kuvvetinin belirlenmesi için sensörlerden sürekli geri bildirim almaktır. Sönümleme kuvveti hesaplandıktan sonra sönümleme elemanı kontrolcüsü uygulama anını bildirecek ve yarı aktif sönümleyici gerekli yönlendirmelere göre manyetik ya da elektromanyetik valfi harekete geçirecektir. Özellikle Çin'de yarı aktif süspansiyon kontrol teorileri hakkında laboratuvar çalışmaları devam etmekte olup pratikte de uygulanabilir durumdadır.

Yarı aktif süspansiyon sistemlerinde de aktif sistemler gibi birçok çalışma yer almaktadır. Sugahara ve Kazato (2008) çalışmalarında iki bojili bir araç gövdesi üzerine prototip kontrol edilebilir sönümleyici ve kontrol edilebilir havalı yay entegre etmişler (Şekil 15) ve bu test aracı üzerinden aldıkları titreşim verileri ile yarı aktif sistemlerin konfor üzerine olan etkisini araştırmışlardır [54].



Şekil 15: Yarı aktif süspansiyon modeli [54].

Pugi ve diğ. (2009), Pendolino trenine ait bir model oluşturmuş ve MR sönümleyicili sistemin kontrolünü Skyhook kontrolcüsü ile yapıp pasif sistemlere göre sağladığı avantajları sıralamıştır [55]. Yang ve diğ. (2011) çeyrek taşıt üzerinde oluşturdukları lineer olmayan yarı aktif süspansiyon sistemlerinde geleneksel PID ve uyarlamalı PID kontrolcülerini uygulamış ve araç dengesi ve konfor açısından iki yöntemi karşılaştırmışlardır [56]. Allotta ve diğ. (2011) ise son dönemin yenilikçi teknolojilerinden olan Magneto-reolojik (MR) sönümleyici kullanarak dinamik stabilite ve konfor kazanımı için yarı aktif sistemleri tasarlamışlar ve farklı kontrolcüler ile karşılaştırma yapmışlardır [24]. Sim, Park ve diğ. (2013) yine Adams/Rail uygulaması ile oluşturdukları hafif raylı araç modeli üzerinde



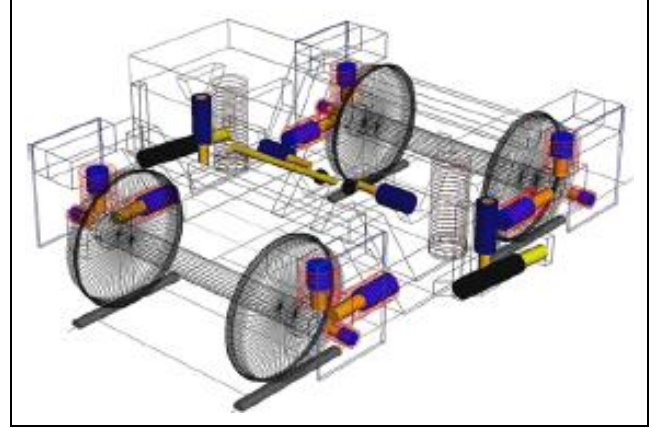
Skyhook kontrolcü kullanarak yarı aktif süspansiyon sistemi üzerinde çalışmışlar ve yolculuk konforu için sonuçlar çıkarmışlardır [23]. Meymand ve Ahmadian (2013) ise farklı kontrol metotları ile oluşturdukları yarı aktif süspansiyon sistemleri üzerinde çalışmış ve yol pürüzlülüklerinden gelen dinamik etkileri bu yöntemler ile minimize etmeyi hedeflemişlerdir [57]. Shin ve diğ. (2014) çalışmalarında deneysel test aracında gövde ve boji arasına yerleştirdikleri MR sönümleyiciler ile yarı aktif süspansiyon teknolojisini test etmişlerdir [25]. Seok Oh ve diğ. (2016), Skyhook kontrolcü ile tasarladıkları 5 serbestlik dereceli model üzerinde yarı aktif süspansiyon sistemlerinin pasif sistemlere göre avantajlarını incelemişlerdir [58]. Sugahara ve diğ. (2016), Kyushu firmasına ait bir test aracına değişken sönümleme kuvvetleri sağlayan hidrolik sönümleyiciler ve bu değişkenliği sağlayan kontrolcüler ve sensörlerden oluşan bir yapıyı entegre ederek test sonuçlarını gözlemlemişlerdir. Kontrol algoritması olarak Skyhook kontrolcü kullanılmıştır [22]. Tiansheng Gu (2016), Adams programında oluşturduğu çeyrek taşıt modeli üzerinde farklı kontrolcü çeşitleri kullanarak yarı aktif süspansiyon sistemlerinin araç konforuna etkisini incelemiştir [59]. Sharma ve diğ. (2017) yüksek hızlı bir raylı taşıtın 9 serbestlik dereceli modelini oluşturarak yarı aktif kontrolünü gerçekleştirmişlerdir ve kontrolü sönümleyici yapısında Magneto-reolojik sıvı malzeme kullanarak tamamlamışlardır [60].

#### 4.3 Süspansiyon optimizasyonu

Raylı taşıtlarda süspansiyon tasarımı bir araç için gerekli tüm süspansiyon elemanları düşünülerek uzun süredir çalışılmaktadır. Süspansiyon sistemi elemanlarının dinamik modellemesi de bu çalışmalarda ayrıntıları ile verilmiştir. Bununla birlikte raylı taşıtların aks yük özellikleri ve araç hızlarına bağlı olarak bazı süspansiyon elemanları fonksiyonel olmamaktadır. Sonuç olarak raylı taşıtın çeşidine ve kullanım durumuna göre süspansiyon elemanları seçilmelidir. Üretim ve bakım maliyetlerini en aza indirmek için minimum gerekli süspansiyon elemanı kullanılmalıdır. Bazı uygulamalarda birincil veya ikincil süspansiyon sönümleyicilerine yer verilmediği görülebilmektedir. Süspansiyon tasarımındaki en önemli nokta aracın yatay ve düşey denge hareketinin korunmasını sağlayacak süspansiyon parametrelerinin belirlenmesidir [4].

Süspansiyon parametreleri belirlenmesi ve optimizasyonu konusunda günümüze değin yapılmış birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Chung ve diğ. (2005) prototip bir test aracının imalatından önce matematiksel modellemesini Adams/Rail programında gerçekleştirmiş ve frekans analizi metotları ile özellikle yanal ve yalpa sönümleyicilerini içeren boji süspansiyon karakteristiklerinin optimizasyonunu çalışmışlardır [61]. Sayyaadi ve Shokouhi (2009) çalışmalarında yeni bir lineer olmayan havalı yay yapısının sistem performansına ve dinamik karakteristiklere olan etkisini araştırmış ve Sperling sürüş konfor indeksine göre sonuçları karşılaştırmıştır [10]. Park ve diğ. (2009) hızlı raylı taşıtlarda süspansiyon sistemleri tasarımı için gerekli elemanlar ve katsayıları belirleme amaçlı hassasiyet analizi yapmışlardır [62]. Abood ve Khan (2010) çalışmalarında 31 serbestlik dereceli model oluşturmuş ve ikincil süspansiyon yay katılık değerlerinin değişiminin araç konforuna ve yuvarlanma, sapma, düşey hareketler gibi araç dinamiği karakteristiklerine olan etkilerini incelemişlerdir [14]. Baek ve diğ. (2012), Kore taşımacılığı yüksek hızlı treninin 10 serbestlik dereceli modelini Adams/Rail programında oluşturmuş ve

optimizasyon algoritmaları kullanarak en uygun sönümleme ve katılık değerlerini elde etmeye çalışmışlardır [8]. Dumitriu (2012) çalışmasında süspansiyon sönümleme katsayılarının araç dinamiği, rijitliği ve sürüş konforuna etkisini incelemiş, konfor çözümlenmeleri için Wz indeksini kullanmıştır [11]. Bideleh ve Berbyuk (2014), Çarpımsal Boyutsal Azaltma (M-DRM) metodu kullanarak boji birincil ve ikincil süspansiyon katılıklarının ve sönümleme komponentlerinin (Şekil 16) araç dinamik karakteristiğine olan etkisini incelemişlerdir [13].



Şekil 16: Boji süspansiyon komponentleri [13].

Demir (2016) yüksek hızlı bir raylı taşıtın 31 serbestlik dereceli modelini oluşturmuş ve bazı süspansiyon parametrelerini değiştirirken diğerlerini sabit tutup optimum özellikleri bularak model üzerinden sonuçlarını incelemiştir [4]. Xie ve diğ. (2016) Çin taşımacılığına ait CRH2 model raylı taşıtı Simpack programı kullanarak modellemiş ve duyarlılık analizi metodu ile en uygun süspansiyon parametrelerini bulmayı hedeflemişlerdir [63]. Kim ve diğ. (2016), geleneksel çelik boji, birincil süspansiyondan oluşan kompozit boji ve kauçuk burçlu birincil süspansiyondan oluşan kompozit boji olmak üzere üç farklı yapının modelini oluşturmuş, sürüş konforu, kritik hız ve ağırlık olarak dinamik karakteristikleri karşılaştırmıştır [64]. Dawei Zhang ve Shengyang Zhu (2017) çalışmalarında lineer olmayan kauçuk yay modelini raylı taşıt birincil süspansiyonu için tasarlamış ve 10 serbestlik dereceli modelde araç dinamiğine ve konfora olan etkisini araştırmıştır [12].

## 5 Sonuç

Raylı taşımacılık ulaşım sektörünün en önemli parçalarından biri olup yolcu ve mürettebat açısından yüksek bir konfor seviyesi sunması beklenmektedir. Titreşimlerin azaltılması ve yolcu konforu geliştirilmesi konusunda dünyanın birçok farklı ülkesindeki şirketler, araştırmacılar ve üreticiler yeni teknikler geliştirmeye ve çözüm üretmeye çalışmaktadırlar. Bu kapsamda bu derleme makalesi ile araçlar üzerinde yapılan modelleme ve titreşim azaltma çalışmaları incelenmiştir.

Hareket denklemleri ile oluşturulan modellerde serbestlik derecesinin optimum seviyede seçilmesi gerekliliği ve bunun da tecrübe ile sağlanacağı belirtilmiştir. Simülasyon programlarında oluşturulan modellerin hareket denklemleri ile kurulan modellere kıyasla tekerlek-ray temas kuvvetlerini yansıtması ve boyutsal verilerin girilebilmesi yönünden daha doğru cevaplar vereceği saptanmıştır. Ayrıca gerçek araç cevaplarının elde edilmesi için gerçek yol girdisi kullanımı tavsiye edilmektedir.

Raylı taşıtlarda titreşimlerin azaltılması konusunda farklı yaklaşımlar ele alınmıştır. Aktif süspansiyon sistemleri bu

alandan en fazla yoğunlaşılacak konu olmuştur. Titreşim azaltılmasında en etkili çözümleri sunmasına karşın sisteme entegre edilecek sensörler, eyleyiciler ve güç kaynağı ile maliyet yönünden makul seviyelerde olmadığı görülmüştür. Yarı aktif süspansiyon sistemleri ile ilgili çalışmalarda MR sönümleyiciler üzerine yoğunlaşıldığı görülmüştür. Aktif sistemlere göre eyleyici ve fazladan güç kaynağı gerektirmediği ve bu sayede daha basit ve düşük maliyetli olduğu saptanmıştır. Titreşim azaltılması konusunda ise aktif sistemlerin seviyesine yaklaşabildiği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda kontrol mekanizmasında bir hata ortaya çıktığında sistemin pasif olarak çalışabilir olmasının da bir avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Pasif sistemler üzerinde yapılan süspansiyon optimizasyonu çalışmalarında ise farklı algoritmalar kullanılabilirdi, titreşim azaltmada olumlu sonuçlar verse de etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür. Aynı zamanda optimizasyon işlemlerinde hesaplama sürelerinin uzun oluşunun kritik bir sorun oluşturduğu belirtilmiştir. Tüm bunlara rağmen ek ekipman gerektirmeden yapılabilir bir değişiklik olması demiryolu firmalarına fayda sağladığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, literatürdeki çalışmalarda titreşim azaltılması konusunda en basit çözümün optimizasyon işlemi olduğu ancak ikna edici iyileştirmeler sağlamadığı, aktif sistemlerin en etkili çözüm olmasına rağmen karmaşıklığı ve maliyeti sebebiyle uygulanabilir düzeye gelemediği görülmüştür. Yarı aktif sistemlerin titreşim azaltmada makul sonuçlar verdiği ve işletme şartlarında aktif sistemlere göre tercih edildiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte araştırmacıların aktif sistemlerin yüksek performans ve güvenilirlik ilerlemesini sağlayıp gelecekte daha düşük maliyetli çözümler için çalışmalarına devam ettikleri belirtilmiştir.

## 6 Kaynaklar

- [1] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü. "Demiryolu Sektör Raporu 2017". Ankara Türkiye, 2017.
- [2] Sabah Gazetesi. "Yüksek Hızlı Trenin Kazanani Belli Oldu". <https://www.sabah.com.tr/ekonomi/2018/03/28/yukse-k-hizli-tren-ihalesinin-kazanani-belli-oldu> (04.10.2018).
- [3] The Times. "Britain Must Wait for 700 mph Hyperloop Train". <https://www.thetimes.co.uk/article/britain-must-wait-for-700mph-hyperloop-train-20jzg5z65> (19.02.2019)
- [4] Demir E. "3D suspension characterization of a rapid transit vehicle using a multi-body dynamic model". *Urban Rail Transit*, 2(3-4),172-187, 2016.
- [5] Abood KHA, Khan RA. "Railway carriage simulation model to study the influence of vertical secondary suspension stiffness on ride comfort of railway carbody running on Curved Tracks". *Modern Applied Science*, 5(2),11-24, 2011.
- [6] Herrero A. Towards Optimization of a High Speed Train Bogie Primary Suspension. Msc Thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2013.
- [7] Kang BB. "Influence of train length on the lateral vibration of a high-speed train equipped with articulated bogies". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(9), 3517-3527, 2014.
- [8] Baek SG, Shin B, Lee SW, Choi YS, Kim J, Koo JC. "Optimization of high speed EMU suspension parameters for vibration reduction". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(2), 305-311, 2012.
- [9] Shin YJ, You HW, Hur HM, Park JH. "Semi-active control to reduce carbody vibration of railway vehicle by using scaled roller rig". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), 3423-3431, 2012.
- [10] Sayyaadi H, Shokouhi N. "Improvement of passengers ride comfort in rail vehicles equipped with air springs". *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 3(5), 592-598, 2009.
- [11] Dumitriu M. "Influence of the suspension damping on ride comfort of passenger railway vehicles". *University Politehnica of Bucharest Sci. Bull, Series D*, 74(4),75-90, 2012.
- [12] Zhang D, Zhu S. "A Fractional derivative model for rubber spring of primary suspension in railway vehicle dynamics". *ASME: Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B*, 3(3), 1-8, 2017.
- [13] Bideleh SMM, Berbyuk V. "Global sensitivity analysis of bogie dynamics with respect to suspension components". *Multibody Syst Dyn*, 37, 145-174, 2016.
- [14] Abood K, Khan RA. "Railway carriage model to study the influence of vertical secondary stiffness on ride comfort of railway carbody running on curved tracks". *Modern Applied Science*, 5(2),11-24, 2010.
- [15] Foo E, Goodall RM. "Active suspension control of flexible-bodied railway vehicles using electro-hydraulic and electro-magnetic actuators". *Control Engineering Practice*, 8, 507-518, 1999.
- [16] Ahmed MI, Hazlina MY, Rashid MM. "Mathematical modeling and control of active suspension system for a quarter car railway vehicle". *Malaysian Journal of Mathematical Sciences*, 10(S), 227-241, 2016.
- [17] Maruyama Y, Ishihara K, Matsui T, Koizumi S. "Development of an active suspension system for railway vehicles". Nippon Steel and Sumitomo Metal, Research and Development, Technical Report, No. 59, 108-112, Japan, 1997.
- [18] Leblebici A, Türkay S. "Influence of wheel-rail contact stiffness on the H<sub>2</sub> controlled active suspension design". *International Federation of Automatic Control*, 50(1), 3642-3647, 2017.
- [19] Güçlü R, Metin M. "Vibrations control of light rail transportation vehicle via PID type fuzzy controller using parameters adaptive method". *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 19(5), 807-816, 2011.
- [20] Pacchioni A, Goodall RM, Bruni S. "Active suspension for a two-axle railway vehicle". *Vehicle System Dynamics*, 48(1), 105-120, 2010.
- [21] Zhengl X, Zolotas A, Goodall R. "Combining active structural damping and active suspension control in flexible bodied railway vehicles". *35<sup>th</sup> Chinese Control Conference*, Chengdu, China, 27-29 July 2016.
- [22] Sugahara Y, Kojima T, Akami Y, Igarashi Y. "Development of a vertical semi-active suspension system using variable hydraulic dampers". *15<sup>th</sup> International Conference on Railway Engineering Design and Operation*, Madrid, Spain, 19-21 July, 2016.
- [23] Sim KS, Park TW, Kim WH, Lee JH. "A study on ride improvement of a high speed train using skyhook control". *3<sup>rd</sup> International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering*, Bali, Indonesia, 4-5 January 2013.

- [24] Allotta B, Pugi L, Colla V, Bartolini F, Cangiolini F. "Design and optimization of a semi-active suspension system for railway applications". *Journal of Modern Transportation*, 4, 223-232, 2011.
- [25] Shin YJ, You WH, Hur HM, Park JH, Lee GS. "Improvement of ride quality of railway vehicle by semiactive secondary suspension system on roller rig using magnetorheological damper". *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering*, 6, 1-10, 2014.
- [26] Orvnas A. "Methods for reducing vertical car body vibrations of a rail vehicle". Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Scientific Report, 35, 2010.
- [27] Metin M. Raylı Sistem Araçlarının Modellenmesi ve Titreşimlerinin Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [28] Thomas D, Berg M, Stichel S. "Measurements and simulations of rail vehicle dynamics with respect to overturning risk". *Vehicle System Dynamics*, 48(1), 97-112, 2010.
- [29] Iwnicki S. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. 1<sup>st</sup> ed. Florida, USA, Taylor&Francis, 2006.
- [30] Knothe K, Stichel S. *Rail Vehicle Dynamics*. Cham Switzerland, Springer, 2017.
- [31] Lin YC, Lin C. & Shieh NC. "An evolutionary approach to active suspension design of rail vehicles". *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 29(5), 909-915, 2006.
- [32] Wang L, Huang A, Liu G. "Analysis on Critical Speeds of the Rail Vehicle Based on SIMPACK." *Advanced Materials Research*, 694-697, 69-72, 2013.
- [33] Eriş O, Ergenç AF, Kurtulan S. "A modified delayed resonator for active suspension system of railway vehicles". *International Federation of Automatic Control*, 48-12, 281-285, 2017.
- [34] Metin M, Güçlü R. "Fuzzy logic control of vibrations of a light rail transport vehicle in use in İstanbul traffic". *Journal of Vibration and Control*, 15(9), 1423-1440, 2009.
- [35] Zolotas AG, Goodall RM. "Modelling and control of railway vehicle suspensions". *Lecture Notes in Control and Information Sciences, Mathematical Methods for Robust and Nonlinear Control*. New York, Springer, 373-412, 2007.
- [36] Stribersky A, Rulka W, Netter H, Haigermoser A. "Modelling and simulation of advanced rail vehicles". *IFAC Transportation Systems*, 30(8), 473-478, 1997.
- [37] ShuGuang Z, WeiHua Z, XueSong J. "Dynamics of high speed wheel/rail system and its modelling". *Chinese Science Bulletin*, 52(11), 1566-1575, 2007.
- [38] Kondo O, Yamazaki Y. "Simulation technology for railway vehicle dynamics". Nippon Steel & Sumitomo Metal, Amagasaki Hyogo, Japan, Technical Report, No. 105, 2013.
- [39] Jeong NT, Wang M, Yoo S, Kim WK, Han SY, Lee HY, Suh WM. "Conceptual design of high-speed semi-low-floor bogie for train-tram". *International Journal of Automotive Technology*, 18(3), 523-533, 2015.
- [40] Shi H, Wu P. "Flexible vibration analysis for car body of high-speed EMU". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(1), 55-66, 2016.
- [41] Zhang Y, Wang Z, Gao Z, Du Y, Yao D. "Based on SIMPACK to reduce the proportion of test vehicle modelling analysis". *Asia-Pacific Engineering and Technology Conference*, Beijing, China, 25-26 May, 2017.
- [42] Pradhan S, Samantaray AK. "Integrated modeling and simulation of vehicle and human multi-body dynamics for comfort assessment in railway vehicles". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(1), 109-119, 2017.
- [43] Orvnas A. "Active Secondary Suspension in Trains". A Literature Survey of Concepts and Previous Work, ISBN 978-91-7415-144-2, KTH Railway Group, Stockholm, Sweden, 2008.
- [44] Zolotas AC, Pearson JT, Goodall RM. "Modelling requirements for the design of active stability control strategies for a high speed". *Bogie Multibody System Dynamics*, 15(1), 51-66, 2006.
- [45] Schandl G, Lugner P, Benatzky C, Kozek M, Stribersky A. "Comfort enhancement by an active vibration reduction system for a flexible railway car body". *Vehicle System Dynamics*, 45(9), 835-847, 2007.
- [46] Metin M, Güçlü R. "Active vibration control with comparative algorithms of half rail vehicle model under various track irregularities". *Journal of Vibration and Control*, 17(10), 1525-1539, 2010.
- [47] Yusof H, Goodall RM, Dixon R. "Assesment of Actuator Requirements for Active Railway Suspensions". *5<sup>th</sup> IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, Marriott Boston Cambridge, MA, USA, 13-15 September 2010.
- [48] Lin YC, Lin CL, Shieh NC. "An evolutionary approach to active suspension design of rail vehicles". *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 29(5), 909-915, 2006.
- [49] Qazizadeha A, Stichela S, Persso R. "Studying Variations of Skyhook Method for Comfort Improvement". *Stephenson Conference for Railways*, London, USA, 21-23 April 2015.
- [50] Graa M, Nejlaoui M, Houidi A, Affi Z, Romdhane L. "Mechatronic Rail Vehicle Design Based on the Passenger Comfort". *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(3), 176-186, 2016.
- [51] Menga L, Xub L, Zou J, Mi J, Guo S. "Design and analysis of parallel interconnection hydraulic-electric energy harvesting active radial steering bogie system". *Proceedings of the 2017 Joint Rail Conference*, Philadelphia, USA, 4-7 April 2017.
- [52] Abobghala A, Iwnicki S, Goodall R. "Evaluation of passive and active steering systems for railway vehicles using Matlab and Simulink simulation". *23<sup>rd</sup> International Conference on Automation & Computing*, University of Huddersfield, United Kingdom, 7-8 September 2017.
- [53] Qazizadeh A. On Active Suspension in Rail Vehicles, Doctoral Thesis. Dep. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2017.
- [54] Sugahara Y, Kazato A. "Suppression of vertical vibration in railway vehicles by controlling the damping force of primary and secondary suspensions". *QR of RTRI*, 49(1), 7-15, 2008.
- [55] Pugi L, Bartolini F, Rinchi M, Meli E. "Design of a lateral and vertical semi-active suspension system for an highspeed train". *Multibody Dynamics Eccomas Thematic Conference*, Warsaw, Poland, 29 June-2 July 2009.
- [56] Yang Z, Zhang J, Chen Z, Zhang B. "Semi-active control of high-speed trains based on fuzzy PID control". *Procedia Engineering*, 15, 521-525, 2011.
- [57] Meymand SZ, Ahmadian M. "Designing rail vehicle suspensions for reducing track dynamic loading". *Proceedings of the 2013 Joint Rail Conference*, Knoxville, Tennessee, USA, 15-18 April 2013.



- [58] Oh SJ, Shin YJ, Koo HW, Kim HC, Park J, Choi SB. "Vibration control of a semi-active railway vehicle suspension with magneto-rheological dampers". *Advances in Mechanical Engineering*, 8(4), 1-13, 2016.
- [59] Gu T. "A New type of hybrid semi-active control strategy in the application of the high-speed railway vehicle vibration control". *6<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment*, Yinchuan, China, 13-14 August 2016.
- [60] Sharma SK, Kumar A. "Ride performance of a high speed rail vehicle using controlled semi active suspension system". *Smart Materials and Structures*, 26(5), 1-19, 2017.
- [61] Chung KR, Paik JS, Picht J. "A Study on the Prediction of Dynamic Behavior of Suspension Design for Korean High Speed Train System (KHST)". High Speed Railway Technology R&D Division Korea Institute of Industrial Technology, ChonAn Korea, 2005.
- [62] Park C, Kim Y, Bae D. "Sensitivity analysis of suspension characteristics for Korean high speed train". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 938-941, 2009.
- [63] Xie H, Zeng W, Lin GM. "Sensitivity analysis of suspension parameters on dynamic performance of a rail vehicle based on a virtual prototype response surface method model". *Advances in Mechanical Engineering*, 8(9), 1-9, 2016.
- [64] Kim JS, Yoon HJ, Lee WG. "A study on comparisons of composite and conventional steel bogie frames". *Journal of Mechanical Science and Technology* 30(12), 5439-5446, 2016.