



*Araştırma Makalesi / Research Article*

## ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİ İÇİN KONTROLCÜ ALTINDA POTANSİYEL ENERJİ KAZANIMI ANALİZİ

### CONTROLLER-BASED POTENTIAL ENERGY GAIN ANALYSIS FOR VEHICLE SUSPENSION SYSTEMS

**Bilal EROL<sup>1</sup>**

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1481959>

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author*  
berol@yildiz.edu.tr

*Geliş Tarihi / Received*  
10.05.2024

*Kabul Tarihi / Accepted*  
23.05.2024

#### Öz

Günümüzde elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara olan ilgi yükselen bir ivme ile artmaktadır. Bu araçlara olan ilginin temelinde gerek iklim değişikliğiyle mücadele ve gerekse de karbon emisyonlarının azaltılması önemli bir rol oynamaktadır. Ulaşımın hava kirliliğine ve küresel ısınmaya ciddi oranda doğrudan etkilediği düşünüldüğünde, elektrikli araçlara geçiş bu zararlı emisyonları önemli ölçüde azaltabilecektir. Daha temiz ve daha sürdürülebilir bir gelecek için elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar geniş çapta desteklenmektedir. Bu araçlardaki enerji optimizasyonu konusu direk olarak menzil değerini etkilediğinden oldukça önemli hale gelmiştir. Araçlarda enerji geri kazanımı, enerji verimliliğini artırmak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak dolayısıyla da çevresel etkiyi azaltmak için hayati önem taşır. Enerji geri kazanımlı süspansiyon sistemi, araçtaki enerji toplama yeteneğini artırarak araçları daha sürdürülebilir ve çevre dostu hale getirmektedir. Bu çalışmada araç süspansiyon sistemlerinde aktif bir kontrolcü altında, kazanılabilecek enerji analizi detaylı olarak farklı yol ve araç koşullarında ele alınmıştır. Araştırmada ilk olarak farklı yol profillerinin yolcu konforuna etkisini azaltan süspansiyon sistemi için optimal bir kontrolcü tasarlanmıştır. Ayrıca, bu kontrolcü altında enerji geri kazanımı simüle edilip, analizi yapılarak farklı koşulların potansiyel enerji kazanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif süspansiyon sistemi, enerji geri kazanımı analizi, optimal kontrolcü tasarımı, rejeneratif süspansiyon sistemi.

#### Abstract

Interest in electric and hybrid electric vehicles is increasing rapidly. This interest is driven by the need to combat climate change and reduce carbon emissions. Given the significant direct impact of transportation on air pollution and global warming, the transition to electric vehicles has the potential to significantly reduce these harmful emissions. Electric and hybrid electric vehicles are widely supported for a cleaner and more sustainable future. Energy optimization in these vehicles is crucial as it directly affects their range. Energy recovery in vehicles is vital for increasing energy efficiency, reducing reliance on fossil fuels, and consequently, minimizing environmental impact. The regenerative suspension system enhances energy harvesting capabilities, making vehicles more sustainable and environmentally friendly. In this study, energy analysis under active control of the vehicle suspension system is discussed in detail under different road and vehicle conditions. In the research firstly an optimal controller is developed for the suspension system to enhance passenger comfort by reducing the effects of road roughness. Furthermore, energy recovery was simulated and analyzed under this controller to investigate the effect of different conditions on potential energy gain.

**Keywords:** Active suspension system, energy harvesting analysis, optimal controller design, regenerative suspension system.

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.  
berol@yildiz.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-1810-6500.

## 1. GİRİŞ

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlardaki teknoloji geliştirme çalışmalarının artan bir ivme ile devam ettiği bu dönemde, bu araçların içten yanmalı motorlu araçların yerini almaya başlamıştır. Yakın gelecekte özellikle belli ülkelerde dizel araçların kullanımının engellenmesi ile beraber elektrikli araç kullanım oranlarının çok daha hızlı bir şekilde yükselmesi beklenmektedir. Elektrikli araçların kullanımındaki beklenen artış bu tür araçlardaki iki önemli kısıt olarak tanımlanan şarj süresi ve araç menzili konusundaki çalışmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bir elektrikli aracı şarj etmek, özellikle standart ev tipi şarj cihazları kullanıldığında, geleneksel içten yanmalı motorlu bir araca kıyasla çok daha uzun sürebilir. Hızlı şarj istasyonları şarj sürelerini azaltabilir, ancak bunlar da hem yaygın değil hem de geleneksel benzin istasyonları kadar uygun olmayabilir. Ayrıca çoğu elektrikli aracın sürüş menzilin, benzinli araçlara göre hala sınırlı olması başka bir endişe kaynağıdır. Farklı elektrikli araç modelleri için menzil ve şarj süreleri incelendiğinde, bu tip araçlarda enerji geri kazanımının çok büyük bir öneme sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu sebeple araç menzilin artırılması ve şarj sürelerinin kısaltılmasında önemli rol oynayan araçta kullanılan enerjinin geri kazanımının optimizasyonu da dikkat çekici bir çalışma konusu haline gelmiştir.

Enerji geri kazanımı, yakıt tüketimine katkı sağlayarak, araçlarda menzilin uzamasına doğrudan etki edip, özellikle elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda pazar genişlemesini olumlu katkı sunmakla beraber daha geniş kitle tarafından tercih edilmesine neden olabilecek etkili bir yaklaşımdır. Araçlarda enerji geri kazanımı üzerine son on yılda literatüre kazandırılmış çok çeşitli çözümler bulunmaktadır. Bunların başında rejeneratif frenleme, rejeneratif süspansiyon, tekerlek ve lastiklerden enerji geri kazanımı gibi teknolojiler çalışmalarda yer edinmektedir (Bai & Liu, 2021; Hosseini ve ark., 2023). Rejeneratif frenleme, elektrikli ve hibrit araçlarda enerji verimliliği ve menzil açısından önemli avantajlar sunan önemli bir çalışmadır (Bai & Liu, 2021; Jerrelind ve ark., 2021; Hamada & Orhan, 2022; Hosseini ve ark., 2023; Caban ve ark., 2023). Araçlarda kinetik enerji, fren balataları ve tekerlek arasında ısıya dönüşmektedir. Bu tür araçlarda trafiğin yoğun olduğu durumlarda kaybedilen enerji miktarı da oldukça fazla olmaktadır. Boşa harcanan bu kinetik enerjiyi depolamak rejeneratif frenleme teknolojisinin temel çıkış noktasıdır. Bu teknoloji sayesinde araç frenleme sırasında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür, bu enerji de daha sonra kullanmak için aracın bataryasında depolanır. Menzil uzatılmasına katkı sağlamak adına başvurulmuş bir diğer yöntem ise tekerleklerden ve lastiklerden enerji geri kazanımı üzerinedir. Bu çalışma bir aracın tekerleklerinin hareketinden kaynaklanan mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürülmesi üzerinedir (Maurya ve ark., 2018; Pei ve ark., 2021; Hosseini ve ark., 2023).

Sürüş esnasında yol bozukluklarından kaynaklı aracın dikey yönde hareketlenmesiyle, oluşan titreşim enerjisini ısıya dönüştürerek titreşimleri bastıran geleneksel süspansiyon sistemlerinin aksine, enerji geri kazanımı özelliğine sahip rejeneratif süspansiyon sistemleri, boşa harcanan enerjiyi elektriğe dönüştürebilir. Bu durumda rejeneratif süspansiyon sistemi, sarf edilen enerjinin geri kazanımına yönelik başvurulabilecek yenilikçi bir teknoloji olarak literatürde yer edinmektedir. Aktif geri kazanımlı süspansiyon sistemi, sadece sürüş konforunu ve araç sürüş güvenirliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliği ve sürdürülebilirliğe de doğrudan katkıda bulunmaktadır. Yolda karşılaşılan çukur ve titreşimlerden enerjiyi kullanarak, sistem bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür ve bu elektrik enerjisini aracın çeşitli bileşenlerini, örneğin klimayı çalıştırmak veya sensörlerle donatılmış araçta bu sensörler için kullanılabilir hale getirir. Bu rejeneratif süreç, aracın genel enerji tüketimini ve fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmaya yardımcı olur ve böylece çevre dostu hale gelir. Bundan dolayıdır ki son zamanlarda bu alanda yapılan çalışma sayısı da katlanarak artmaktadır.

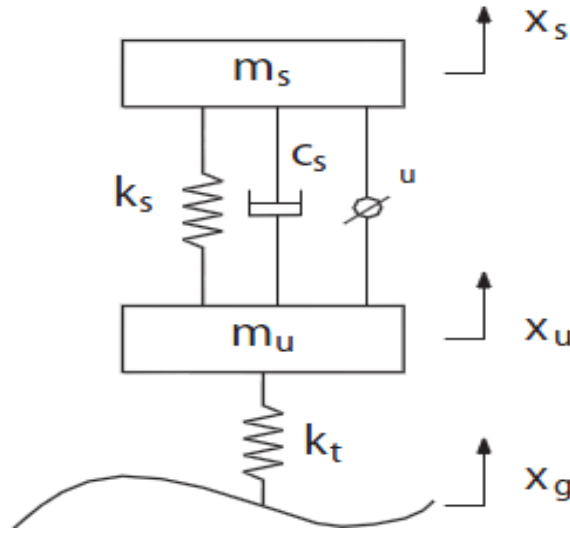
Süspansiyon sistemini en genel haliyle bir yay ve damperden oluşan, tekerlek ile şaft arasında bağlantıyı sağlayan mekanik düzenek olarak tanımlayabiliriz. Burada yay ve damperin temel görevi araç gövdesini taşımak ve yoldan gelebilecek titreşimleri sönmüleyerek sürüş konforunu ve yol tutuş kabiliyetini arttırmaktır. Bir yay ve damperin paralel bağlanmasıyla meydana gelen pasif süspansiyon sistemleri, süspansiyon sistemlerinin en temel halini teşkil etmektedir. Aktif ve yarı aktif süspansiyon sistemleri son 30 yılda kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Savaresi ve ark., 2010; Aly & Salem, 2013). Elektronik malzemelerin, algılayıcıların yetkinliklerinin artmasıyla daha akıllı süspansiyon sistemleri üretilmeye başlanmıştır. Bu da beraberinde daha karmaşık yapıya ve bilhassa daha fazla ek enerji tüketimine sebep olmaktadır. Bundan dolayıdır ki pasif elemanlar ile tasarlanan süspansiyon sistemleri, her ne kadar yoldan gelen bozucuların anlık değişimlerine dinamik bir cevap verememekte ve performans ölçütlerinin istenilen seviyelerin altında olmasına neden olsa da, basit yapısı, yüksek güvenilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle otomotiv endüstrisinde halen kullanılmaktadır.

Geleneksel süspansiyon sistemleri sürüş konforunu sağlamak adına, pasif sistemlerde enerjiyi boşa harcanmakta (Mirzaei & Hassannejad, 2007), aktif sistemlerde ilaveten üretilen enerji de tüketilmektedir (Els ve ark., 2007; Sun ve ark., 2010; Savaresi ve ark., 2010; Moradi ve ark., 2019). Bundan dolayıdır ki, enerjinin önem arz ettiği uygulamalarda hem pasif hem de aktif süspansiyon sistemleri enerji açısından elverişsizdir. Bu süspansiyon sistemlerinin yanında, aktif enerji verimli rejeneratif süspansiyon sistemleri, süspansiyon sisteminin yalnızca gelişmiş dinamik performansını sağlamakla kalmayıp aynı zamanda boşa harcanan titreşim enerjisini de elektriğe dönüştürebilme yetkinliğinden dolayı son yıllarda bilhassa elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar üzerine olan araştırmalarda büyük ilgi görmüştür (Zhang ve ark., 2017; Abdelkareem ve ark., 2018a; Xie ve ark., 2019; Lv ve ark., 2020; Bai & Liu, 2021; Galluzzi ve ark., 2021; Qin ve ark., 2022; Azmi ve ark., 2023). Rejeneratif süspansiyon sistemlerinde, kullanılacak uygun optimizasyona da bağlı olarak güç kaynağında depolanan voltaj seviyesi, aktif kontrol ve enerji yenileme modları arasında ne zaman geçiş yapılacağını belirler (Abdelkareem ve ark., 2018a; Azmi ve ark., 2023). Burada eğer güç kaynağındaki gerilim seviyesi indüklenen gerilimden yüksekse, sistem aktif kontrol modunda çalışır, aksi takdirde rejenerasyon moduna geçer. Böylelikle engebeli arazilerde sürüş konforu ve yol tutuş kabiliyeti sağlanırken, bir miktar enerji de geri kazanılmış olur. Kullanılacak uygun optimizasyon tekniğine de bağlı olarak, rejeneratif süspansiyon sistemleriyle geleneksel olanlara kıyasla daha verimli sonuçlar almak mümkündür (Qin ve ark., 2022). Sonuç olarak süspansiyon titreşimlerinden geri kazanılan enerji, aküyü şarj etmek ve araç alternatörüne ek olarak elektrik yüklerini beslemek için veya gelişmiş sensör ağı ile donatılmış araçlarda bu sensörler için kullanılabilir (Abdelkareem ve ark., 2018a).

Araçlarda, süspansiyon sistemi, tekerlek ile yol yüzeyi arasındaki etkileşimi etkin bir şekilde yöneterek hem güvenliği hem de konforu sağlamada kritik bir rol oynar. Süspansiyon sistemi, yoldan gelen titreşimlerin, araç içerisine olumsuz etkilerini minimize ederek yolcular için konforlu bir sürüş sağlarken, sürüş güvenliğini de korumaya yardımcı olarak genel araç performansını artırır. Dolayısıyla taşıtta güvenlik ve konforun sağlanması için taşıtın süspansiyon sistemleri görevlerini eksiksiz olarak yerine getirmesi gerekmektedir. Bunun sağlanması adına öncelikle süspansiyon sisteminin uygun bir şekilde modellenmesi ve daha sonra bu model üzerinden performans kriterleri baz alınarak uygun kontrolör ile desteklenip bozucu etkisinin azaltılması sağlanmalıdır. Bu çalışmada amaç, ilk hedef doğrultusunda farklı yol profillerinin yolcu konforuna etkisini azaltmak adına çeyrek taşıt süspansiyon sistemi için optimal kontrolcü tasarımı geliştirilmiştir. Literatürden farklı olarak bu çalışmanın devamında, araç süspansiyon sistemlerinde aktif bir kontrolcü altında, kazanılabilecek enerji analizi detaylı olarak farklı yol ve araç koşullarında ele alınmıştır. Ayrıca, bu kontrolcü altında enerji geri kazanımı simüle edilip, analizi yapılarak farklı koşulların potansiyel enerji geri kazanımı üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

## 2. ÇEYREK TAŞIT SÜSPANSİYON SİSTEMİ

Araç süspansiyon sistemleri, 1960'lardan beri hem akademik hem de endüstri araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Başlangıçta, mühendisler pasif süspansiyon sistemleri üzerinde çalışmıştır, bu sistemler temelde yay ve sönümlenme bileşenlerinin paralel bağlantılarından oluşmaktadır. Pasif süspansiyon sistemleri olarak adlandırılan bu sistemler, sabit elemanlara dayandığından, farklı yol koşullarına uyum sağlayamamakla beraber uygulama alanı bakımından ciddi kısıtlamalar barındırmaktadır. Yol uyarılarına daha iyi dinamik bir yanıt sağlamak için bir üzerindeki eyleyiciyle doğrudan uygulanacak kuvvet sayesinde araç gövdesinde yol yüzeyindeki değişimler sonucunda indüklenen enerjinin ayarlanabilmesi mümkün kılınmaktadır. Elektronik tabanlı aktif süspansiyon sistemleri 1980'lerin sonlarında kullanılmaya başlanmıştır. O zamana kadar, kontrol alanındaki gelişmelerin kullanılması, aktif süspansiyon sistemlerinde önemli iyileştirmelere yol açmıştır.



Şekil 1 Çeyrek Taşıt Aktif Süspansiyon Sisteminin Temel Yapısı

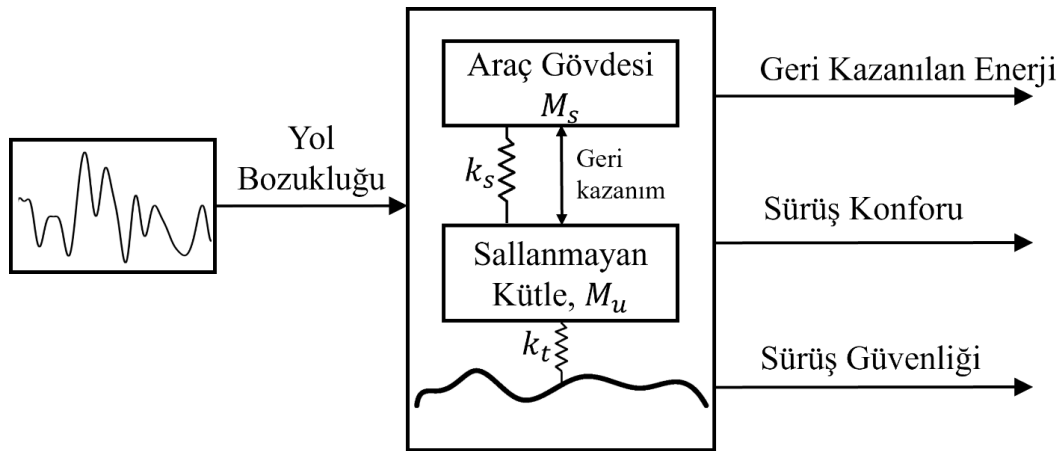
İki serbestlik derecesine sahip çeyrek taşıt süspansiyon sistemi Şekil 1'de gösterilen yapıya sahiptir. Süspansiyon sistemi, araç gövdesi,  $m_s$ , ile sallanmayan kütle,  $m_u$ , arasında bulunmaktadır. Burada  $k_s$  süspansiyon yay sabiti,  $k_t$  tekerlek yay sabiti,  $c_s$  süspansiyonda kullanılan damperin sönüm oranı,  $x_g$ ,  $x_u$  ve  $x_s$  sırasıyla yol, tekerlek ve şase konumlarını ifade etmektedir.  $u$  ise aktif süspansiyon sistemlerinde, yay ile dampere paralel bağlanan harici eyleyicidir. Çeyrek taşıt aktif süspansiyon sistemine ilişkin dikey yönlü hareket denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\begin{aligned} m_u \ddot{x}_u &= k_t(x_g - x_u) - k_s(x_u - x_s) - c_s(\dot{x}_u - \dot{x}_s) - u, \\ m_s \ddot{x}_s &= k_s(x_u - x_s) + c_s(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + u \end{aligned} \quad (1)$$

Süspansiyon sistemlerinin performans iyileştirmesi problemlerinde üç çıkış üzerine işlem yapılmaktadır. Bunlar aracın dikey ivmelenmesi  $\ddot{x}_s$ , süspansiyonun sapma miktarı  $|x_s - x_u|$  ve araç gövdesinin hareketi  $x_s$  şeklindedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra sistemin durum uzay gösterimi Denklem 3'te gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \\ \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_u \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_u} & -\frac{(k_s+k_t)}{m_u} & \frac{c_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_u \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_t}{m_u} \end{bmatrix} x_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_s} \\ -\frac{1}{m_u} \end{bmatrix} u, \\
\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_u \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2)
\end{aligned}$$

Rejeneratif süspansiyon sistemlerinin genel yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Literatürde bu alandaki çalışmalar incelendiğinde başvurulacak optimizasyon çerçevesinde uygun kontrolcü geliştirmek için iki önemli faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bunlardan ilki, süspansiyon sisteminin doğrusal olmayan parametreleridir, bu parametreler zamanla da değişkenlik göstermektedir. İkinci olarak ise, enerji geri kazanımı ile sürüş konforu birbiriyle çelişebilmektedir. Dolayısıyla tasarlanacak kontrolcünün farklı sürüş koşullarında enerji geri kazanımını ve sürüş konforunu doğrudan yönetme kabiliyetine sahip olmalıdır. Bir başka deyişle, aktif, enerji verimli süspansiyon sisteminde yolcu konforu sağlanırken süspansiyon sisteminde geri kazanılan enerji maksimum değere çıkartılarak, araçtaki enerji kullanımının da minimize edilmesi hedeflenilmesidir. Bu amacın başarılı olması durumunda hem araç menzilin uzatılmasına hem de şarj süresinin kısaltılmasına önemli bir katkı yapılmış olacak ve yolcu konforu ile güvenlik seviyesi yükseltilecektir. Literatürde bu alandaki çalışmalarda hibrit elektrik araçlarda aktif süspansiyon sistemi ile enerji kazanımı ve hibrit elektromanyetik süspansiyonlar kullanılarak enerji kazanımı konuları üzerinde durulmuştur (Wang ve ark., 2018; Abdelkareem ve ark., 2018a; Xie ve ark., 2019; Azmi ve ark., 2023).



Şekil 2 Rejeneratif Çeyrek Taşıtlı Süspansiyon Sistemi Modeli

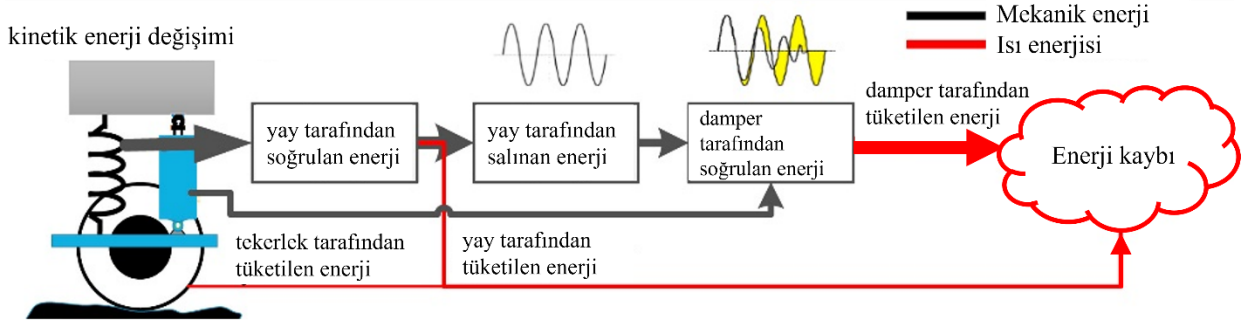
Geleneksel süspansiyon sistemlerindeki enerji akışı Şekil 3'te gösterilmiştir (Zhang ve ark., 2017). Bu şekilde de gözüktüğü gibi tekerlek, yay ve damper tarafından edinilen enerji tüketilmektedir. Literatürde bu alanda yapılan çalışmaların ekseriyetinde, süspansiyon titreşim modeli incelendiğinde geri kazanılabilecek maksimum enerji, sönümlenme elemanı olan damper tarafından tüketilen enerji olarak karşımıza çıkmaktadır, dolayısıyla anlık potansiyel gücü, doğrudan süspansiyon bağlı hızı ile sönümlenme katsayısının çarpımına ilişkilendirmek mümkündür (Zhang ve ark., 2017; Abdelkareem ve ark., 2018a; Hosseini ve ark., 2023; Caban ve ark., 2023). Bu durumda damper üzerinden anlık sönümlenme kuvveti, süspansiyonun hızı  $\dot{x}_s - \dot{x}_u$  ile doğru orantılıdır. Anlık güç de kuvvet ile bu süspansiyonun hızının çarpımına eşittir. Dolayısıyla süspansiyon sistemi üzerinden harcanılan anlık güç,

$$P = c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u)^2 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Abdelkareem ve ark., 2018a; Abdelkareem ve ark., 2018b). Burada  $(\dot{x}_s - \dot{x}_u)$  süspansiyon dikey yöndeki bağıl hızı,  $c_s$  ise sönümlenme katsayısıdır. Sonuç olarak geri kazanılabilecek enerji,

$$W = \int P dt = \int c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u)^2 dt \quad (4)$$

şeklinde elde edilir (Taghavifar & Mardani, 2017).



Şekil 3 Geleneksel Süspansiyon Sistemlerindeki Enerji Akışı (Zhang ve ark., 2017).

### 3. $\mathcal{H}_\infty$ KONTROLÇÜ TASARIMI

Dinamik bir sistemin kararlılığının sağlanmasını takiben, bu sistemi belli performans ölçütleri baz alınarak kontrol edilmesi gerekmektedir.  $\mathcal{H}_\infty$  kontrolcü tasarımı problemi, bu performans ölçütlerinden, sistemin performans çıkışı üzerindeki bozucu etkisinin makul seviyelere indirilmesiyle ilintilidir. Bir sistemin sonsuz normu, o sistemin frekans bölgesinde verdiği en yüksek genlikteki cevabıdır. Bir başka deyişle, bu frekans bandındaki en yüksek tekil değerine

$$\|P_{CL}(s)\|_\infty = \sup_w \bar{\sigma}(P_{CL}(jw)) \quad (5)$$

karşılık gelmektedir. Burada  $P_{CL}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$  bozucu girişi ile önceden seçilen performans çıkışı arasındaki kapalı çevrim transfer fonksiyonunu ve  $\bar{\sigma}$  ise en büyük tekil değeri göstermektedir. Dolayısıyla,  $\mathcal{H}_\infty$  optimizasyon yaklaşımında amaç, olabilecek en kötü durumun yani bozucunun performans çıkışında etkisinin daha fazla olduğu durumu düşünülüp, bunun düşürülmesine dayalıdır. Sonuç olarak Bounded Real Lemma üzerinden,  $\|P_{CL}(s)\|_\infty < \gamma$  denklemini sağlayan pozitif  $\gamma$  bulunabilir (Scherer, 1990).

Standart  $\mathcal{H}_\infty$  tabanlı kontrol teorisinin temel yapısı (Zames, 1981) tarafından oluşturulmuş ve 19. yy. sonlarına doğru bu problem daha uygun formda (Doyle ve ark., 1988) tarafından iki Riccati denkleminin çözümü şeklinde sunulmuştur. Takip eden yıllarda sonraki yıllarda (Gahinet & Apkarian, 1994) çalışmalarında, bu kontrol problemi doğrusal matris eşitsizliğine (DME) indirgeyerek çözüme gitmişlerdir. DME'lerin gelişimiyle beraber konveks yapıdaki bu tür kontrol problemlerinin çözümüne de olanak sağlanmıştır.

### 3.1. Problemin Tanımı

$\mathcal{H}_\infty$  kontrolcü tasarımına ek olarak kapalı çevrim kutuplarının yerlerine kısıt konulmasıyla, bozucu bastırma problemine ile beraber maksimum üst aşım, yerleşme zamanı, eyleyici doyumu gibi performans istekleri de bu kontrolcüyle gerçekleştirilebilir.

Herhangi bir doğrusal iki girişli iki çıkışlı  $P$  sistemi için,  $x \in \mathbb{R}^n$  durum değişkeni vektörü, sistemin girişleri de  $w$  ve  $u$  sırasıyla bozucu girişi ve kontrol girişidir. Bu sistemin çıkışlarından,  $y$  ölçülebilen,  $z$  ise performans çıkışıdır.  $P$  sisteminin durum uzay gösterimi;

$$P: \begin{pmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B_w & B_u \\ C_z & D_{zw} & D_{zu} \\ C_y & D_{yw} & D_{yu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ w \\ u \end{pmatrix} \quad (6)$$

şeklindedir. Burada  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B := [B_w \ B_u] \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C := \begin{bmatrix} C_z \\ C_y \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $D := \begin{bmatrix} D_{zw} & D_{zu} \\ D_{yw} & D_{yu} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times m}$  durum uzay matrisleridir.

$P$  sisteminin ölçülen çıkışlarını,  $y$ , ile sistemin kontrol girişi olan,  $u$  arasına yerleştirilen  $K$  doğrusal kontrolcüsünün durum uzay gösterimi:

$$K := \begin{pmatrix} \dot{x}_k \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ u \end{pmatrix} \quad (7)$$

burada  $x_k \in \mathbb{R}^{n_k}$  kontrolörün durum değişkeni,  $A_k, B_k, C_k, D_k$  sistem matrisleridir. Bozucu girişi  $w$  ile performans çıkışı  $z$  arasındaki transfer fonksiyonuna karşılık gelen,  $P$  sisteminin,  $K$  doğrusal kontrolcüsüyle beraber kapalı çevrim formu,  $P_{CL}(s) = C_{CL}(sI - A_{CL})^{-1}B_{CL} + D_{CL}$  halini alır. Standart  $\mathcal{H}_\infty$  kontrol teorisine göre bu amaç doğrultusunda tasarlanan kontrolcü derecesinin en az sistem derecesinde olması gerekmektedir.

Bu çalışma, sürüş konforunu arttırmaya yönelik iyileştirmeler ve bu iyileştirmeler çerçevesinde süspansiyon sistemlerinde sönümleme elemanı olan damper üzerinden geri kazanılabilecek potansiyel enerji analizi üzerine kurgulanmıştır. Araçlarda sürüş konforuyla doğrudan ilişkili olan dikey yöndeki ivmelenme ile yol bozucusu arasındaki sonsuz normunun minimizasyonu, bir başka ifadeyle olabilecek en kötü senaryo ile başa çıkmak adına çıkış geri beslemeli  $\mathcal{H}_\infty$  kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilecek kontrolcünün başarımı ve bu kontrolcü altında kazanılabilecek enerji analizi Tablo 1'de verilen farklı tipte araçlar ve yol tipleri üzerinde benzetim ortamında gösterilmektedir.

## 4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında çeyrek taşıt süspansiyon sistemi için araç gövdesinin ivmelenmesi ile yol bozucusu arasında kalan sistemin sonsuz normunun minimizasyonunun sağlanması adına  $\mathcal{H}_\infty$  kontrolcü tasarlanmıştır. Çeyrek taşıt süspansiyon modeline ait parametreler farklı araç modellerinden alınmıştır. Başvurulan bu araçlar; binek otomobil, otobüs ve ağır tonajlı tır olarak seçilmiştir, bunlara ait veriler Tablo 1'de verilmiştir.

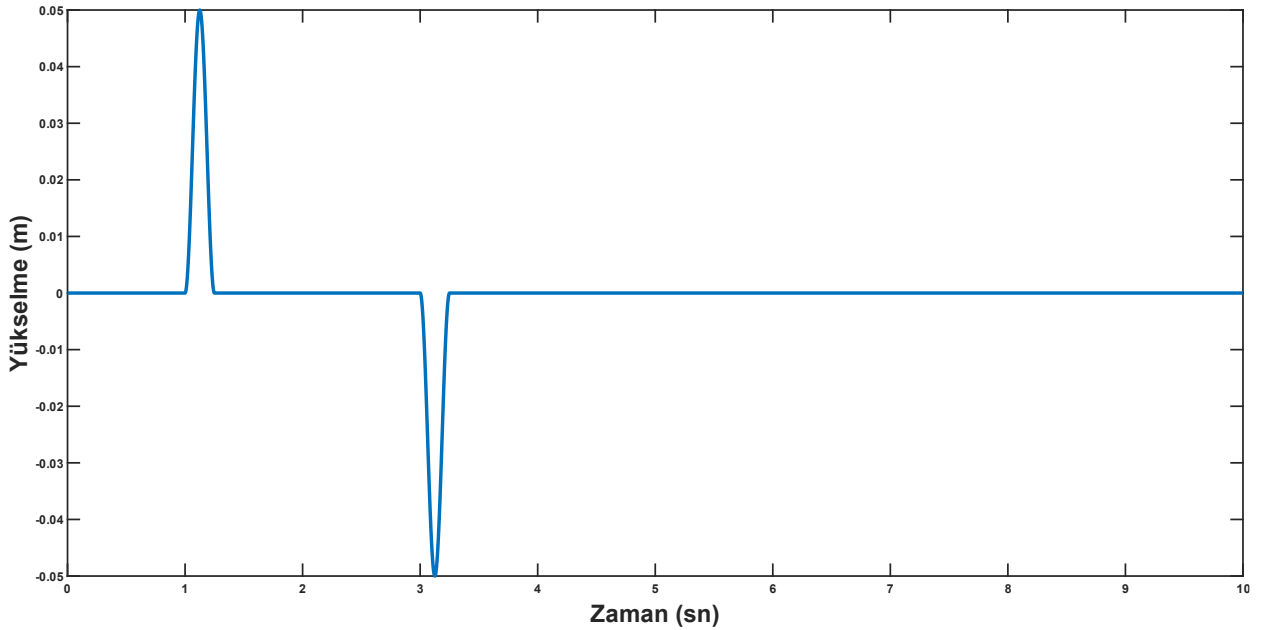
Tablo 1 Kullanılan Çeyrek Taşıt Süspansiyon Sistemlerine Ait Parametreler

Parametre	Otomobil (Mudduluru, & Chizari, 2021)	Otobüs (Abougarair & Mahmoud, 2017)	Ağır Tonajlı Tır (Hajdu ve ark., 2019)
$M_s$ ( kg)	375	2500	2500
$M_u$ ( kg)	59	320	310
$K_s$ ( N/m)	35000	80000	300000
$K_t$ ( N/m)	190000	500000	1000000
$c_s$ ( N.s)/m	1000	350	20000

Yol bozukluk modelleri, araç dinamiklerini doğru bir şekilde simüle etmede önemlidir. Bu profiller, yol yüzeyindeki düzensizlikleri, tümsekleri tanımlar ve aracın sürüş kalitesini ve süspansiyon sisteminin performansını doğrudan etkiler. Bu çalışmada tasarlanan optimal kontrolcünün altında enerji analizi için üç farklı yol tipine başvurulmuştur. Bunlardan ilki 5cm yükselti ve 5cm çukurdan oluşan, Denklem 8’de verilen Şekil 4’te gösterilen tümsek tipi yol profilidir. İkinci yol profili ise Denklem 9’da verilen ve Şekil 5’te gösterilen yirmi sinüs işareti toplamı cinsinden elde edilmiştir. Bu yol profilinin oluşturulmasındaki en önemli bileşen, seçilen işaretin bant genişliğidir. ISO2361’e göre araç içindeki yolcuların en fazla 4-8 Hz aralığındaki titreşimlerden rahatsız olması sebebiyle giriş sinyalinin frekans aralığı olarak 0-50 (radyan/saniye) seçilmiştir.

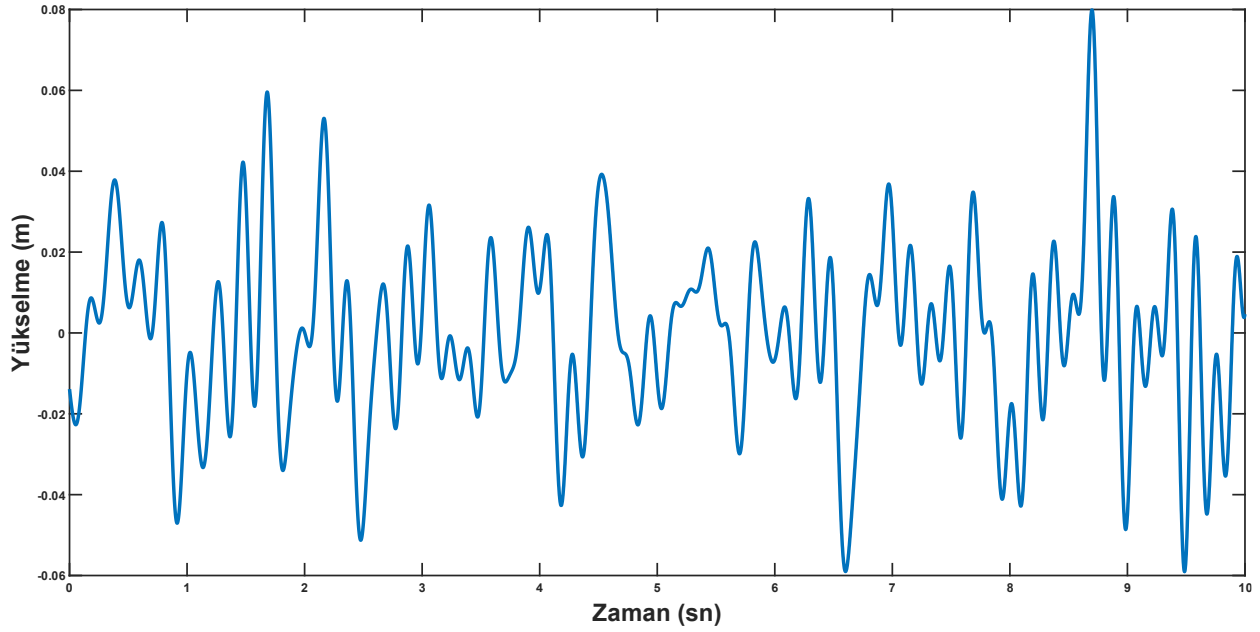
$$w(t) = \begin{cases} 0.05(1 - \cos(8\pi t)), & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$w(k) = \sum_{i=1}^{20} a_i \cos(w_i t_s k) \quad (9)$$



Şekil 4 Tümsek Tipi Yol Profili





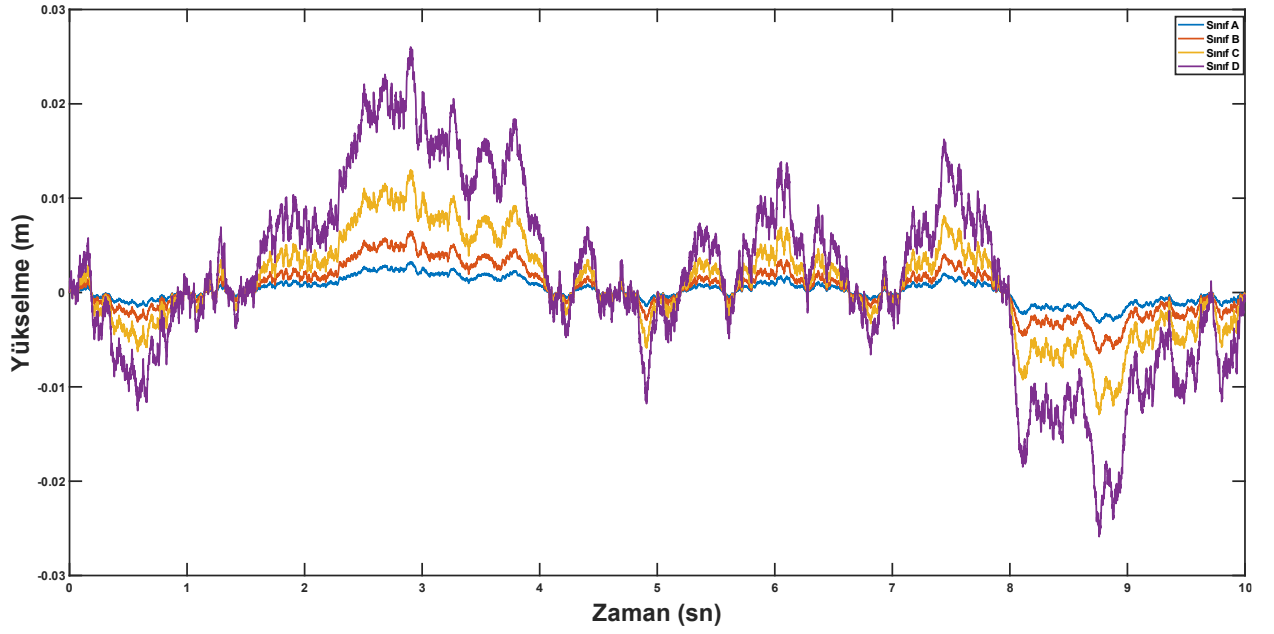
Şekil 5 Farklı Genlik ve Frekansa Sahip 20 Sinüs Sinyalinin Toplamı Cinsinden Elde Edilen Stokastik Yol Profili. Yer Değiştirmeye ilişkin RMS Değeri 64.98mm'dir

Yol yüzeyi pürüzlülüğü karakterize etmede kullanılan bir diğer yaygın yöntem, belirli bir yer değiştirme güç spektral yoğunluğuna (PSD) sahip durağan Gauss stokastik süreç üzerine kurgulanmıştır. Burada yol pürüzlülüğü, ortalama bir değer ve zaman içinde değişmeyen bir varyansla karakterize edilen bir durağan süreç olarak kabul edilir. PSD, pürüzlülüğün farklı frekanslarda nasıl dağıldığını tanımlar. Durağan Gauss stokastik süreç olarak tanımlanan yol yüzeyi pürüzlülüğü,

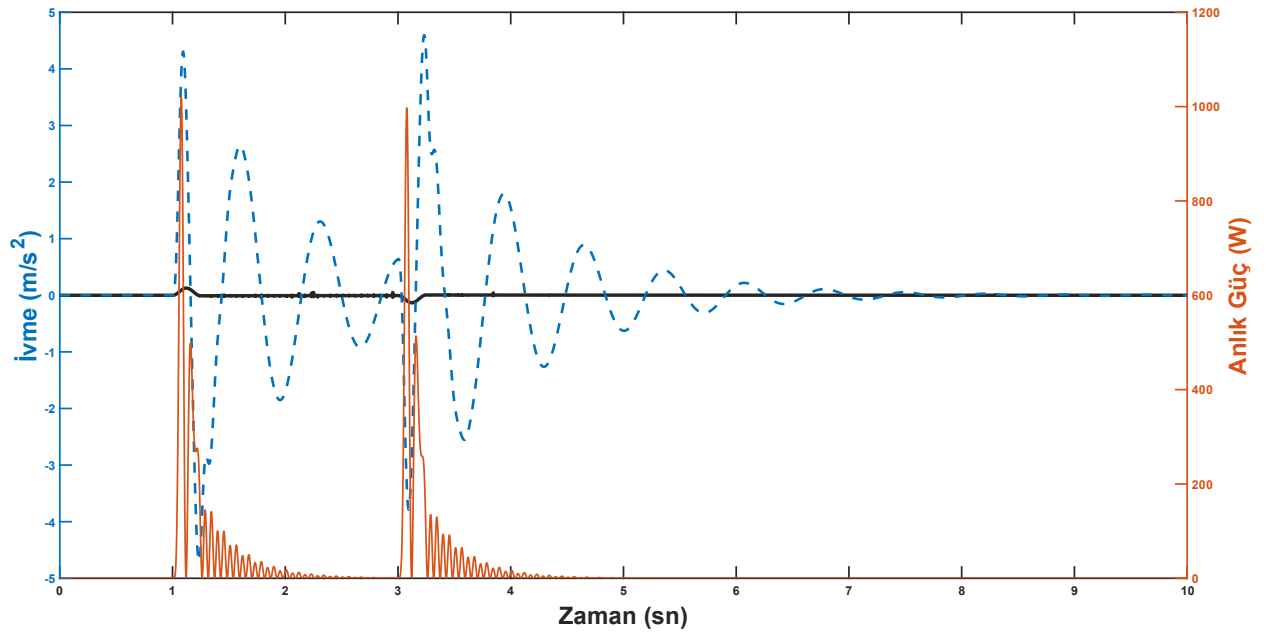
$$S_{\text{PSD}}(v) = S_0 \left( \frac{v}{v_0} \right)^{-\beta} = G_r v^{-\beta}, \left[ \frac{m^3}{\text{devir}} \right] \quad (10)$$

Şeklinde ifade edilmekte olup, burada  $v$  devir/m cinsinden uzamsal frekans,  $v_0 = 1/2\pi$  referans uzamsal frekans,  $S_0$   $v_0$ 'daki yer değiştirme PSD'si olup,  $G_r = S_0/v_0^{-\beta}$  ise yol pürüzlülük katsayısıdır ve  $\beta$  genellikle 2 olarak kabul edilmektedir.  $G_r$  parametresine bağlı olarak 8 farklı (A (en iyi), B (iyi), C (orta), D (kötü), -H) yol pürüzlülüğü literatürde tanımlanmıştır (Hong ve ark., 2002; Zuo & Zhang, 2013; Long ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2020). Sonuç olarak yol profili birinci dereceden bir filtre aracılığıyla beyaz gürültü girişi altında modellenebilir ve Denklem 11'de gösterildiği gibi tanımlanabilir. Bu denklemde  $q$  yol pürüzlülüğünden kaynaklanan dikey yöndeki yer değiştirme,  $V$  araç sürüş hızı,  $f_0 = 0.011V$  alçak geçiren filtrenin kesim frekansı ve  $w$  beyaz gürültü sinyalidir (Zhao ve ark., 2020). Şekil 6'da farklı  $G_r = (4, 16, 64, 256)$  değerlerine bağlı olarak elde edilen yol profilleri gösterilmiştir. Bu çalışmada araç hızı  $V = 20m/s$  olarak kabul edilmiştir.

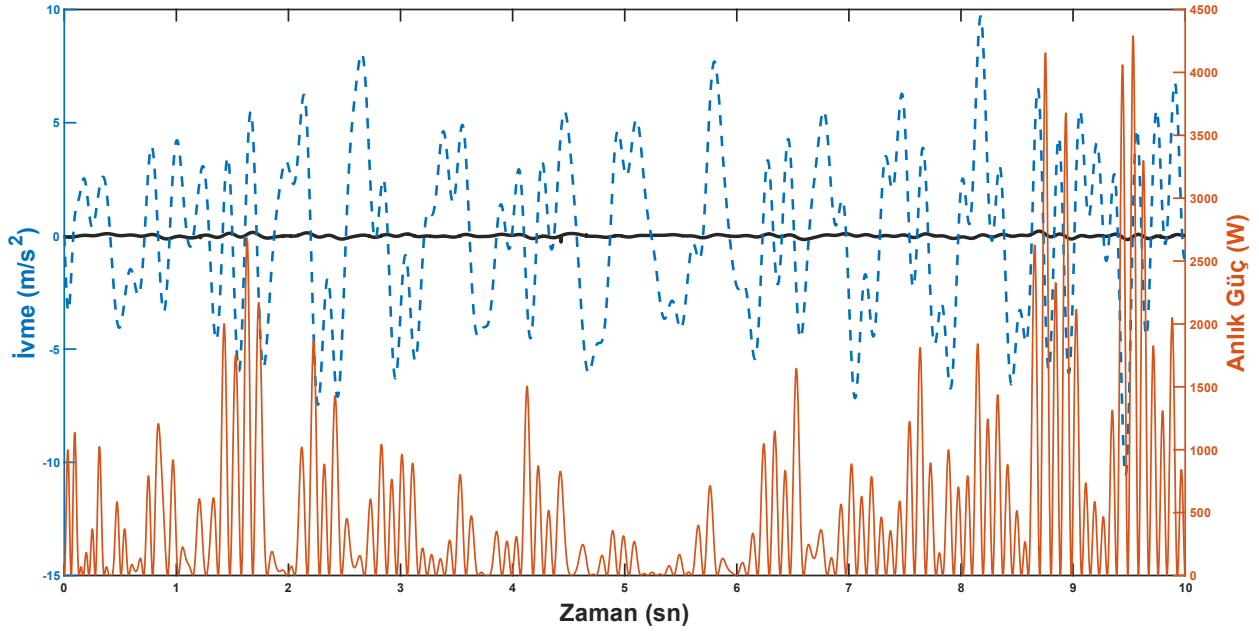
$$\dot{q} = -2\pi f_0 q + 2\pi v_0 w \sqrt{G_r V} \quad (11)$$



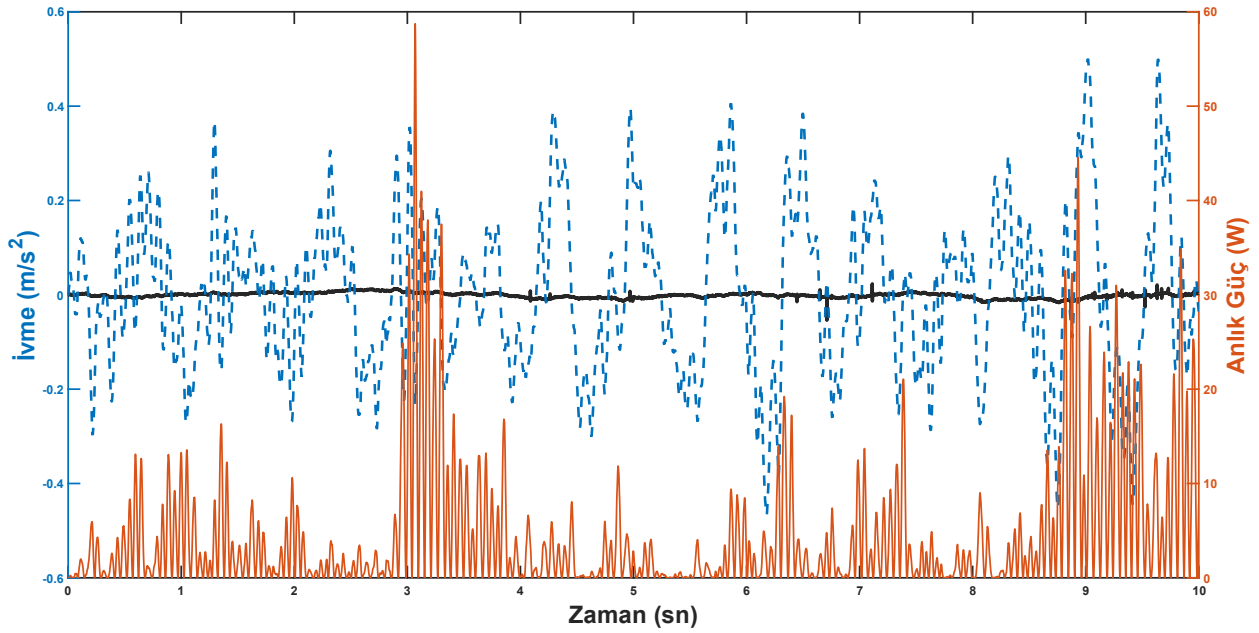
Şekil 6 Farklı  $G_r$  Değerlerinden Elde Edilen Yol Profilleri. Sınıf A-D Tipi Yol Profilleri Sırasıyla, Mavi-Turuncu-Sarı-Mor Renk ile Gösterilmiştir ve Bunlara İlişkin Yer Değiştirmenin RMS Değerleri 1.21, 2.43, 4.86 ve 9.72 mm şeklindedir



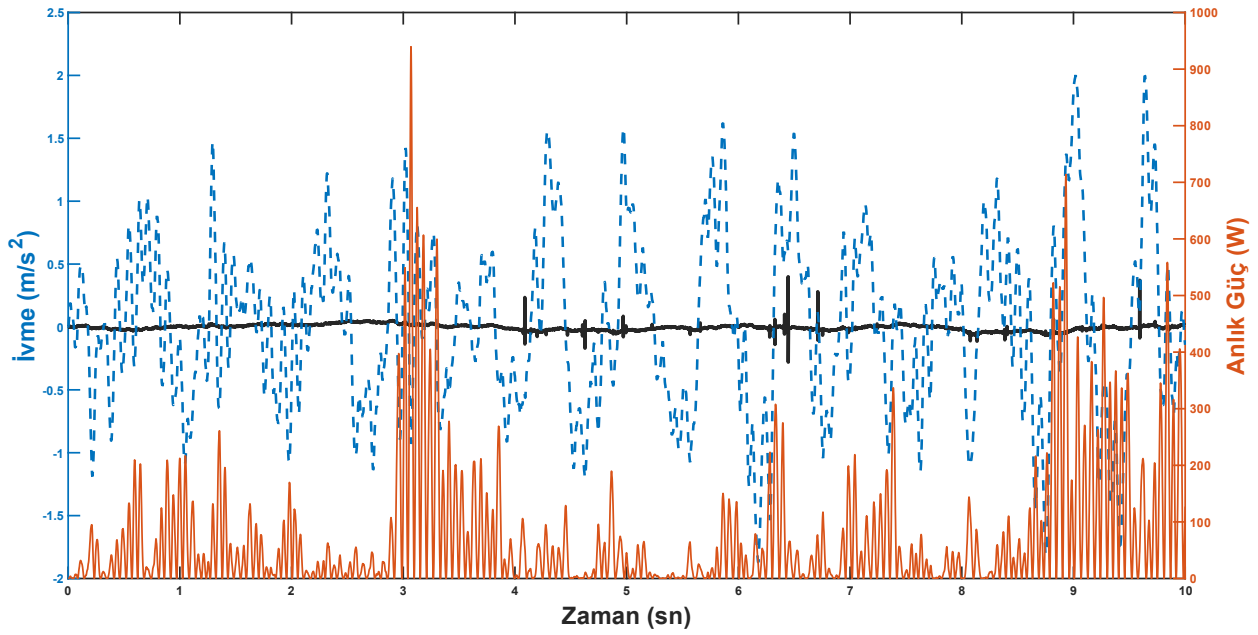
Şekil 7 Binek Otomobil Çeyrek Taşıtlı Süspansiyon Sistemi için  $\mathcal{H}_\infty$  Kontrolcüsü Kullanılarak Elde Edilen Kapalı Çevrim Sistemin (siyah düz çizgi) ve pasif sistemin (mavi kesikli çizgi) Tümsek Tipi Yol Profili Altında İvme Cevabı ile Aktif Sistemde Enerji Dağılım Oranı (turuncu).



Şekil 8 Binek Otomobil Çeyrek Taşıt Süspansiyon Sistemi için  $\mathcal{H}_\infty$  Kontrolcüsü Kullanılarak Elde Edilen Kapalı Çevrim Sistemin (siyah düz çizgi) ve pasif sistemin (mavi kesikli çizgi) Sinüslerin Toplamı Cinsinden Elde Edilen Stokastik Yol Profili Altında İvme Cevabı ile Aktif Sistemde Enerji Dağılım Oranı (turuncu)



Şekil 9 Binek Otomobil Çeyrek Taşıt Süspansiyon Sistemi için  $\mathcal{H}_\infty$  Kontrolcüsü Kullanılarak Elde Edilen Kapalı Çevrim Sistemin (siyah düz çizgi) ve pasif sistemin (mavi kesikli çizgi) Sınıf B Tipi Yol Profili Altında İvme Cevabı ile Aktif Sistemde Enerji Dağılım Oranı (turuncu)



Şekil 10 Binek Otomobil Çeyrek Taşıt Süspansiyon Sistemi için  $\mathcal{H}_\infty$  Kontrolcüsü Kullanılarak Elde Edilen Kapalı Çevrim Sistemin (siyah düz çizgi) ve pasif sistemin (mavi kesikli çizgi) Sınıf D Tipi Yol Profili Altında İvme Cevabı ile Aktif Sistemde Enerji Dağılım Oranı (turuncu)

Tablo 2 Farklı Çeyrek Taşıt Süspansiyon Sistemleri için Kontrolcü Altında Damper Elemanı Tarafından Harcanılan Güç Miktarına İlişkin RMS (W) Değerleri

Yol Tipi	Araç Cinsi		
	Otomobil	Otobüs	Ağır Tonajlı Tır
Sınıf A	1,99	0,54	36,86
Sınıf B	7,98	2,16	147,64
Sınıf C	31,94	8,64	592,97
Sınıf D	127,67	34,59	2337
Stokastik Yol Profili	795,16	2470	15383
Tümsek Tipi Yol Profili	98,10	138,45	1895

Bu çalışmada,  $\mathcal{H}_\infty$  kontrolcüsü, Tablo 1'de verilen üç farklı araç süspansiyon modeli için tasarlanmış ve ilgili sistemlere uygulanmıştır. Kontrolcünün etkinliği, farklı  $G_r$  değerlerinden elde edilen sentetik, sinüslerin toplamı cinsinden elde edilen stokastik ve tümsek tipi yol profilleri altında irdelenmiş, damper elemanı tarafından yönetilen anlık güç dağılımı incelenerek titizlikle değerlendirilmiştir. Ortaya çıkan analiz, kontrolcü altında çeşitli araç senaryoları üzerindeki enerji geri kazanımına ilişkin yetkinliğini derinlemesine göstermektedir. Bu çalışmada araç hızı  $V = 20m/s$  olarak kabul edilmiştir. Benzetim çalışmalarında araç hızı ile geri kazanılabilecek enerjinin doğru orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. Şekil 7-Şekil 10'da otomobil modeli için tasarlanan kontrolcünün, pasif sistem üzerinden etkinliği ve bu amaç doğrultusunda aracın damper elemanı tarafından harcanan enerji gösterilmiştir. Sadeliği korumak adına, sadece bu araç için sonuçlar burada paylaşılmıştır.

Benzetim çalışması kapsamında her bir sistem için tasarlanan kontrolcü altında araç süspansiyon sistemine ait damper elemanı üzerinden harcanan ortalama güç dağılımına ait RMS sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Burada bir binek otomobilin, bir otobüsün ve bir ağır tonajlı tırın süspansiyon sistemlerinin enerji rejeneratif potansiyeli gösterilmektedir. Elde edilen bulgular sonucunda güç değerleri incelendiğinde yeni nesil aktif, enerji kazanımlı süspansiyon sistemlerinde önemli

hedeflerden biri olan, geri kazanılan enerjinin maksimum değere çıkartılması konusunun özellikle elektrikli araçlarda menzilin uzatılması noktasında büyük katkı sağlayacağı görülmektedir. Böylelikle aktif bir kontrolcü altında, rejeneratif süspansiyon sistemlerinin enerji hasadı kabiliyetlerini artırma potansiyelinin altını çizmekte ve böylece sürdürülebilir ve çevre dostu ulaşım çözümlerinin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma, araç süspansiyon sistemlerinin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini daha da artırmayı amaçlayan gelecekteki araştırmalar için örnek bir temel sağlamaktadır. Çalışmanın sonuçlarına ilişkin bütüncül yaklaşım, araç dinamiklerinde enerji yönetimi anlayışımızı zenginleştirmekle kalmıyor, aynı zamanda daha sürdürülebilir ve verimli ulaşım çözümlerinin önünü açıyor. Böylelikle aktif bir kontrolcü altında, rejeneratif süspansiyon sistemlerinin enerji geri kazanımı kabiliyetlerini artırma potansiyelinin altını çizmekte ve böylece sürdürülebilir ve çevre dostu ulaşım çözümlerinin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunulabileceği gösterilmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak geleneksel süspansiyon sistemlerine enerji geri kazanımı için gerçek zamanlı bir optimizasyon algoritması eklenilmesi olumlu sonuçlar doğuracaktır. Bu sistemlerde enerji geri kazanımı ile birlikte güvenlik ve konforu çoklu olarak pareto optimal bölgeye çeken algoritmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Böylelikle sadece sürüş konforunu ve araç sürüş güvenirliliği artırmakla kalmıyız, aynı zamanda enerji verimliliği ve sürdürülebilirliğe de doğrudan katkıda bulunulacaktır. Yolda karşılaşılan bozukluklar, çukur ve titreşimlerden edinilen potansiyel enerji kullanılarak, sistem bu mekanik enerjii elektrik enerjisine dönüştürebilir ve bu elektrik enerjisini de aracın çeşitli bileşenlerini, örneğin sensörlerle donatılmış araçta bu sensörler için kullanılabilir hale getirebilir.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## KAYNAKÇA

- Abdelkareem, M. A., Xu, L., Ali, M. K. A., Elagouz, A., Mi, J., Guo, S., . . . Zuo, L. (2018a). Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review. *Applied energy*, 229, 672–699.
- Abdelkareem, M. A., Xu, L., Guo, X., Ali, M. K. A., Elagouz, A., Hassan, M. A., . . . Zou, J. (2018b). Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the potential power and full car dynamics for different road modes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 110, 307–332.
- Abougarair, A. A., & Mahmoud, M. M. (2017). Design and Simulation Optimal Controller for Quarter Car Active Suspension System. *In 1st Conference of Industrial Technology (CIT2017)*.
- Aly, A. A., & Salem, F. A. (2013). Vehicle suspension systems control: A review. *International journal of control, automation and systems*, 2(2), 46–54.
- Azmi, R., Mirzaei, M., & Habibzadeh-Sharif, A. (2023). A novel optimal control strategy for regenerative active suspension system to enhance energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 291, 117277.

- Bai, S., & Liu, C. (2021). Overview of energy harvesting and emission reduction technologies in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111188.
- Caban, J., Vrabel, J., Górnicka, D., Nowak, R., Jankiewicz, M., Matijošius, J., & Palka, M. (2023). Overview of energy harvesting technologies used in road vehicles. *Energies*, 16(9), 3787.
- Doyle, J., Glover, K., Khargonekar, P., & Francis, B. (1988, June). State-space solutions to standard H<sub>2</sub> and H<sub>∞</sub> control problems. In *1988 American Control Conference* (pp. 1691-1696). IEEE.
- Els, P. S., Theron, N. J., Uys, P. E., & Thoresson, M. J. (2007). The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, 44(4), 303–317.
- Gahinet, P., & Apkarian, P. (1994). A linear matrix inequality approach to H<sub>∞</sub> control. *International journal of robust and nonlinear control*, 4(4), 421-448.
- Galluzzi, R., Circosta, S., Amati, N., & Tonoli, A. (2021). Rotary regenerative shock absorbers for automotive suspensions. *Mechatronics*, 77, 102580.
- Hajdu, F., Szalai, P., Mika, P., & Kuti, R. (2019). Parameter identification of a fire truck suspension for vibration analysis. *Pollack Periodica*, 14(3), 51-62.
- Hamada, A. T., & Orhan, M. F. (2022). An overview of regenerative braking systems. *Journal of Energy Storage*, 52, 105033.
- Hong, K.-S., Sohn, H.-C., & Hedrick, J. K., 2002, “Modified Skyhook Control of Semi-Active Suspensions: A New Model, Gain Scheduling, and Hardware-In-The-Loop Tuning,” *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, 124, pp. 158–167.
- Hosseini, S. M., Soleymani, M., Kelouwani, S., & Amamou, A. (2023). Energy Recovery and Energy Harvesting in Electric and Fuel Cell Vehicles, a Review of Recent Advances. *IEEE Access*.
- Jerrelind, J., Allen, P., Gruber, P., Berg, M., & Drugge, L. (2021). Contributions of vehicle dynamics to the energy efficient operation of road and rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 59(7), 1114-1147.
- Long, L. X., Quynh, L. V., & Cuong, B. V. (2018). Study on the influence of bus suspension parameters on ride comfort. *Vibroengineering Procedia*, 21, 77-82.
- Lv, X., Ji, Y., Zhao, H., Zhang, J., Zhang, G., & Zhang, L. (2020). Research review of a vehicle energy-regenerative suspension system. *Energies*, 13(2), 441.
- Maurya, D., Kumar, P., Khaleghian, S., Sriramdas, R., Kang, M. G., Kishore, R. A., ... & Priya, S. (2018). Energy harvesting and strain sensing in smart tire for next generation autonomous vehicles. *Applied energy*, 232, 312-322.
- Mirzaei, M., & Hassannejad, R. (2007). Application of genetic algorithms to optimum design of elasto-damping elements of a half-car model under random road excitations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 221(4), 515–526.

- Moradi, S. M., Akbari, A., & Mirzaei, M. (2019). An offline lmi-based robust model predictive control of vehicle active suspension system with parameter uncertainty. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1699–1711.
- Mudduluru, S. R., & Chizari, M. (2021). Quarter and full car models optimisation of passive and active suspension system using genetic algorithm. *arXiv preprint arXiv:2101.12629*.
- Pei, J., Guo, F., Zhang, J., Zhou, B., Bi, Y., & Li, R. (2021). Review and analysis of energy harvesting technologies in roadway transportation. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125338.
- Qin, B., Chen, Y., Chen, Z., & Zuo, L. (2022). Modeling, bench test and ride analysis of a novel energy-harvesting hydraulically interconnected suspension system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 166, 108456.
- Savaresi, S. M., Poussot-Vassal, C., Spelta, C., Sename, O., & Dugard, L. (2010). Semi-active suspension control design for vehicles. Elsevier.
- Scherer, C. W. (1990). *The Riccati inequality and state-space  $H_\infty$ -optimal control* [Doctoral dissertation]. Julius Maximilians University Würzburg, Germany.
- Sun, W., Gao, H., & Kaynak, O. (2010). Finite frequency hinf control for vehicle active suspension systems. *IEEE Transactions on control systems technology*, 19(2), 416–422.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2017). Off-road vehicle dynamics. *Studies in Systems, Decision and Control*, 70, 37.
- Wang, R., Ding, R., & Chen, L. (2018). Application of hybrid electromagnetic suspension in vibration energy regeneration and active control. *Journal of Vibration and Control*, 24(1), 223–233.
- Xie, L., Cai, S., Huang, G., Huang, L., Li, J., & Li, X. (2019). On energy harvesting from a vehicle damper. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(1), 108–117.
- Zames, G. (1981). Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses. *IEEE Transactions on automatic control*, 26(2), 301-320.
- Zhang, Y., Guo, K., Wang, D., Chen, C., & Li, X. (2017). Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions. *Energy*, 119, 961–970.
- Zhao, Z. H., Guan, Y. L., & Chen, S. A. (2020). Experimental research on PMSM ball screw actuator and structural design suggestion of featured active suspension. *IEEE access*, 8, 66163-66177.
- Zuo, L., & Zhang, P. S. (2013). Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions. *Journal of Vibration and Acoustics*, 135(1), 011002.