



## ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN MENZİL SORUNU ÇÖZÜMÜNDE ÖNEMLİ BİR TASARIM: ELEKTROMEKANİK REJENERATİF SÜSPANSİYON SİSTEMİ

Doğukan TUNCER<sup>1</sup>, Eylem YILMAZ ULU<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Denizli,  
ORCID No : <http://orcid.org/00000-0001-8860-1377>

<sup>2</sup> Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Denizli  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-6257-9845>

### Anahtar kelimeler

### Öz

*Rejeneratif, süspansiyon, enerji, menzil, elektrikli araç, hibrit, batarya*

*Binek otomobillerde kullanılan pasif süspansiyon sistemleri eski bir teknoloji olmasına karşın maliyet, hafiflik, basitlik ve verimlilik faktörleri göz önüne alındığında tercih edilmeye devam etmektedir. Elektrikli ve hibrit araçların teknolojileri, batarya ve şarj teknolojileriyle doğrudan bağlantılı olan menzil parametresi odaklı geliştirilmektedir. Rejeneratif fren sistemleri ile, menzil az da olsa artırılabilirken süspansiyon sistemini rejeneratif sisteme dönüştürerek menzil artışına daha fazla katkı sağlanabilmektedir. Bu makalede pasif süspansiyon sistemine ek olarak monte edilecek bir elektromekanik rejeneratif mekanizma ile motordan rejeneratif DC (doğru akım) elektrik enerjisi elde edebilen bir modül tasarlanmış ve hazırlanan prototip teorik olarak incelenmiştir. Tasarlanan süspansiyon modülü; lineer hareketi, mekanik tip dönüşüm ve hız artırma mekanizmaları ile tek yönlü dönel harekete dönüştürerek bir kaplin vasıtasıyla 12V 72W DC motora aktarma yoluyla motordan rejeneratif DC elektrik enerjisi elde edilmesini sağlamıştır. Prototip için ABS 740 High Impact malzeme tercih edilmiş ve 3D yazıcı ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, taşıt süspansiyon sistemlerini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmeye yönelik inovatif bir yaklaşım sunarak, ulaşım ihtiyaçlarını daha uzun menzille ve enerji verimliliği ile karşılamayı amaçlamaktadır.*

\* [eyilmaz@pau.edu.tr](mailto:eyilmaz@pau.edu.tr)  
doi : 10.46399/muhendismakina.1343067

---

## A CRUCIAL DESIGN FOR SOLVING THE RANGE ISSUE IN ELECTRIC VEHICLES: ELECTROMECHANICAL REGENERATIVE SUSPENSION SYSTEM

---

---

### Keywords

*Regenerative, suspension, energy, range, electric vehicle, hybrid, battery*

### Abstract

*Despite being based on older technology, passive suspension systems used in passenger cars continue to be preferred due to factors such as cost, lightweight design, simplicity, and efficiency. The technologies of electric and hybrid vehicles are being developed with a direct focus on battery and charging technologies, specifically centered around the parameter of range. While regenerative braking systems can contribute to a minor increase in range, the conversion of the suspension system into a regenerative system can provide even greater contributions to extending the range. In this article, a module has been designed that can obtain regenerative DC (direct current) electrical energy from a motor through the integration of an electromechanical regenerative mechanism, in addition to the passive suspension system. The designed suspension module converts the linear motion into unidirectional rotary motion with mechanical type conversion and speed increase mechanisms and transfers it to a 12V 72W DC motor via a coupling to obtain regenerative DC electrical energy from the motor. ABS 740 High Impact material was preferred for the prototype and production was carried out with a 3D printer. A prototype has been prepared and theoretically examined. This study presents an innovative approach to making vehicle suspension systems more efficient and sustainable, aiming to meet transportation needs with an extended range and improved energy efficiency.*

---

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 14.08.2023

Kabul Tarihi : 15.09.2023

Research Article

Submission Date : 14.08.2023

Accepted Date : 15.09.2023

---

## **Extended Abstract**

### **Introduction/Background**

In today's automotive industry, passive suspension systems, despite being based on older technology, are still preferred and considered successful structures due to factors such as cost, lightweight design, simplicity, and efficiency. These systems have gained significance in the context of the development of electric and hybrid vehicles, as they play a crucial role in the parameter of range, which is closely tied to battery and charging technologies. Regenerative braking systems contribute to range improvement, and there is potential in converting the suspension system into a regenerative structure to achieve greater energy recovery. In this context, the article aims to design a regenerative mechanism to convert the kinetic energy of the suspension system into electrical energy from mechanical energy. This approach offers the potential to enhance range and energy efficiency by effectively utilizing energy obtained from vehicles. The research's objective is to explore this important aspect of vehicle technology as a means to promote sustainable transportation. This innovative approach stands out as a promising step towards enhancing the performance and sustainability of electric and hybrid vehicles.

### **Objectives/Research Purpose**

The conducted study encompasses the integration of a regenerative suspension module into passive suspension systems, followed by an exploration of its advantages and disadvantages, and subsequently delves into the theoretical and practical investigation of the conversion of mechanical energy to electrical energy. Additionally, the study examines critical factors such as the range and charging efficiency of electric and hybrid vehicles to assess the contributions of regenerative systems in this realm. Supported by theoretical calculations and equations, as well as a review of relevant literature, the design provides insights into the effects of the regenerative module components on the system. In this context, this research presents an innovative approach to making vehicle suspension systems more efficient and sustainable, with the aim of addressing the transportation needs of the future.

### **Methods/Methodology**

The methodology employed in this article commences with a comprehensive design and production process of an electromechanical regenerative suspension module, grounded in a literature review and an examination of existing designs. In the design phase, a novel approach is adopted, utilizing gear mechanisms for motion-type conversion. The linear motion of the suspension is converted into rotary motion using a rack-and-pinion mechanism, and this motion is further transformed through a circular mechanism to obtain electrical power from a motor. To assess the design's physical feasibility and performance, a prototype is manufactured using 3D printing technology. Material selection and weight measurements provide crucial insights into the structural integrity and efficiency of the prototype. Furthermore, regenerative power generation is achieved by employing the motor as a generator. This study comprehensively covers the process from the theoretical design of the electromechanical regenerative suspension module to prototype production. The obtained results illuminate how the design functions in the real world and shed light on potential application areas.

## Results/Findings

This study comprehensively addresses the design of a regenerative suspension module developed based on the commonly used MacPherson suspension structure in the modern automotive industry. Nowadays, vehicle suspension systems are designed to adapt to road surfaces, enhance driving comfort, and optimize road grip. According to the results of the literature review, such suspension systems typically operate within the frequency range of 0-12 Hz and displacement range of 0-25 mm. The assembly during the prototype phase confirmed that the forward and backward movement of the rack-and-pinion gear smoothly corresponds to the same direction of movement of the motor connection coupling. However, when the DC motor is used as a generator, it was found that energy production based on bidirectional motor movement reduces efficiency.

Through literature review and theoretical calculations, it was concluded that unidirectional and constant-speed movement provides higher efficiency in terms of electricity generation. The motor chosen in the design theoretically generates 72W of electrical power based on calculations under maximum operating conditions. The designed regenerative suspension module is aimed at maximizing the mechanical efficiency of the DC motor by providing continuous unidirectional movement. This approach enhances energy production efficiency of the motor while minimizing the energy loss caused by bidirectional movement. Unlike other studies in the literature, this design supports continuous energy generation and utilization.

In conclusion, this study stands out by emphasizing the provision of unique unidirectional movement specific to the suspension module, highlighting the transformation of traditional automotive suspension systems into an innovative approach that contributes to energy conversion and utilization. The design can be seen as an important step in achieving energy efficiency and sustainability goals in the future of the automotive industry.

## Discussion and Conclusions

To accurately calculate the real electrical power generated by the design and the actual system efficiency values, an experimental setup should be established for conducting measurements and tests on a physical quarter-scale vehicle model. Mechanical analyses and experiments are necessary to ensure the system's strength and its ability to operate under maximum conditions with an appropriate safety factor. Additionally, conducting mechanical analyses and experiments is essential for the system's strength and its ability to function effectively under maximum conditions while maintaining an appropriate safety factor.

## 1. Giriş

Küresel ısınma problemi her geçen gün tüm dünyada artmakta olan büyük bir sorun halindedir. Bu sorunun kaynağının araştırılması ve çözüm önerileri her geçen gün yoğunlaşmaktadır. Küresel ısınmanın başlıca sebeplerinden birisi olarak enerji üretimi ve kara taşıtlarının kullanılmasından kaynaklı karbondioksit emisyonları gösterilmektedir. Her geçen gün artan insan nüfusu dolayısıyla enerji ihtiyacı artmakta ve ulaşım sorunları oluşmaktadır. Ulaşım sektöründe karayolu taşımacılığı, en yoğun karbondioksit emisyonunun olduğu sektör olarak belirlenmiştir (Soruşbay, 2007).

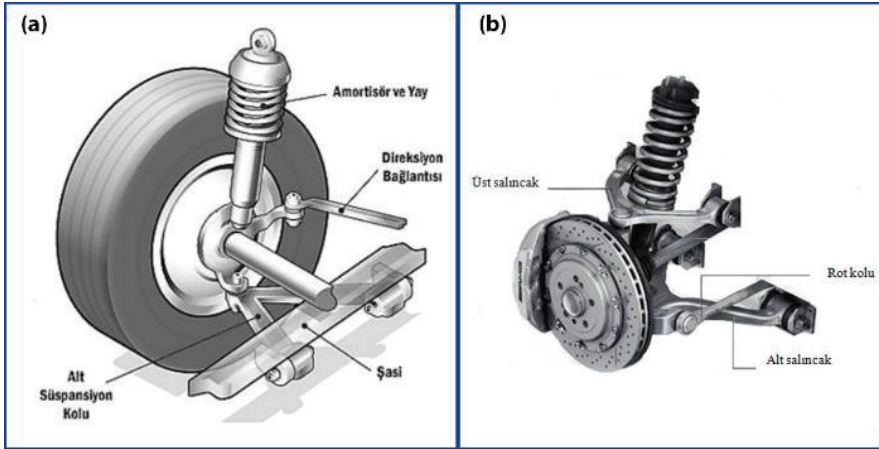
Giderek artan küresel ısınma, fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi ve iklim değişikliklerinin gözle görülür şekilde yaşanmasından dolayı tüm gelişmiş dünya ülkeleri elektrikli ve hibrit araçların üretimine büyük yatırımlar yaparak 2025 hedefi belirlemişlerdir. Belirlenen hedefe ulaşılabilirse, 2025 yılında tüm otomobil segmentlerinde en az bir adet elektrikli veya hibrit araç üretiminin gerçekleştirilmiş olması ve piyasaya sürülmüş olması sağlanacaktır. İçten yanmalı motora sahip taşıtların gün geçtikçe yasaklanması ve elektrikli veya hibrit sistemli taşıtların üretiminin artması sayesinde kara ulaşımındaki karbondioksit emisyonları hatırı sayılır şekilde azalma göstermiştir (Singh S., Kulshrestha, M.J., Rani, N., Kumar, K., Sharma, C. & Aswal, D.K., 2023) (Uçarol ve diğ., 2007).

“Enerji yoktan var edilemez varken yok edilemez, ancak bir formdan başka bir forma dönüştürülebilir.” yasası, Termodinamiğin 1’inci yasasıdır. Buradan hareketle bir sistemde harcanan enerji, bazı yardımcı sistemlerle geri kazanılabilmektedir. Bu sistemlere rejeneratif, enerji geri kazanım sistemleri veya enerji hasadı sistemleri isimlendirmeleri yapılmaktadır. Taşıtlarda rejeneratif enerji üretim sistemi olarak en popüler, rejeneratif fren sistemi örnek olarak gösterilebilmektedir (Çengel ve Boles, 2014; Mehta ve Sukhadia, 2020).

Gelişen teknoloji ile atık enerjilerin dönüştürülerek verimli halde kullanılmasına yönelik sistemler geliştirilmektedir. Bu sistemlerden bir tanesi de rejeneratif süspansiyon sistemidir. Taşıtların tekerleği yol durumundan kaynaklı sürekli kinetik enerjiye sahiptir. Bu kinetik enerji frekans ile ilişkilendirilerek Hz cinsinden ifade edilmekte ve süspansiyon sistemine aktarılmaktadır. Süspansiyon sistemine aktarılan enerji damper ve yay üzerinde absorbe edilerek (süspansiyon parçaları üzerinde ısı enerjisine dönüştürülerek) taşıtların şasesine azaltılmış kinetik enerji olarak iletilmektedir. Kinetik enerji azaltma işlemi asıl olarak enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi sayesinde gerçekleşmektedir. Termodinamiğin 1’inci yasasında belirtildiği gibi, söz konusu sistemde enerji yok edilmemekte, dönüştürülmektedir. Fakat süspansiyon sistemi parçaları üzerinde ısıya dönüştürülen ve taşıtların veriminde olumsuz etki yapan ısı enerjisi, faydalı kinetik enerji olarak dönüştürüldüğünde rejeneratif enerji olarak kullanılabilir (Okuturlar, 2018).

Süspansiyon sistemine ek bir modül ile veya direkt olarak süspansiyon sistemi olarak kullanılacak şekilde tasarlanan rejeneratif süspansiyon sistemleri mevcuttur. Otomotiv mühendisliğinin zor aşılacak kısımlarından olan ağırlık sorunu bu sistemde de karşımıza çıkmaktadır (Cao, Song ve Ahmadian, 2011).

Şekil 1.1'de yapısını gördüğümüz süspansiyon sistemi, taşıtlar için vazgeçilmez bir sistemdir. Özellikle firmalar arası rekabetin arttığı ve konfor parametresinin her geçen gün daha önemli hale geldiği otomotiv sektöründe süspansiyon sistemleri büyük rol oynamaktadır. Ayrıca yol tutuşu, tekerleklerin zemin ile araç şasesi arasında mükemmel bir dengede çalışabilmesi, yol durumundan kaynaklı titreşimlerin hızlı cevaplanarak ve absorbe edilerek yolculara ve taşıt askı donanım sistemlerine aktarılmaması süspansiyon sisteminin en önemli görevlerindedir (Okuturlar, 2018).



Şekil 1.1. Macpherson Süspansiyon Yapısı (a) (Okuturlar, 2018). Çift Salıncaklı (Double Wishbone) Süspansiyon Yapısı (b) (Putgül ve Altıparmak, 2015)

Yapılan araştırmalara göre, elektrikli araçlar için menzil ve şarj verimliliği önemli parametrelerdir. Günümüz teknolojisi ile üretilebilen bataryalar ve sistemler ile belli bir menzil ve şarj verimliliği değeri elde edilmekte, fakat alışılmış trafik kültürüne adaptasyonu sağlanamamaktadır. Bunun için rejeneratif sistemler üzerinde yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu makaledeki sistem, harici bir modül ile konvansiyonel süspansiyonlara takılabilecek şekilde tasarlanan rejeneratif süspansiyon modülüdür ve yol durumundan kaynaklı tekerleğe ve oradan da süspansiyona aktarılan kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Bu sayede, rejeneratif süspansiyon modülü ile menzil ve şarj verimliliğinin artırılması, tasarımın çeyrek taşıt modeli üzerinde hesaplama ve analizlerinin yapılması ve test düzenekleri ile doğrulanması amaçlanmaktadır.

Elektromekanik rejeneratif süspansiyon modülü tasarımı çalışması (araştırma ve yayın etiğine uygun olarak); menzil ve şarj verimliliği parametrelerini arttırmaya yönelik A segment, B ve HB Hatchback, sedan, lüks spor, SUV, minivan ve hafif ticari segmentlerindeki elektrikli ve hibrit otomobil modelleri üzerinde kullanılmak üzere tasarım yapılmasını kapsamaktadır.

Rejeneratif süspansiyon sistemleri ile ilgili olarak yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların birçoğu elektromekanik bazlı sistemler olup elektrohidrolik ve elektro pnömatik olarak tasarlanan sistemler de bulunmaktadır.

Elektromanyetik motorlar öncelikle sönümleyici olarak kullanılmış daha sonra elektromanyetik damperler üzerine birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır. Temel prensipte lineer hareket eden mıknatıs veya bobinden oluşan bir milin etrafında indükleme sağlayacak sabit bobin veya mıknatıs çiftinden oluşan elektromanyetik damperler, mekanik kayıpların az olması sebebiyle yüksek verimli sistemler olarak görülmüştür. Fakat daha sonra ağırlık parametresi göz önünde bulundurulduğunda, sistem veriminin düşük olduğu keşfedilmiştir. Lineer elektromanyetik motorlar, titreşimden kaynaklı kinetik enerjiyi indükleme yoluyla elektrik enerjisine dönüştüren basit ve etkili sistemlerdir (Abdelkareem ve diğ., 2018).

Suda ve Shiiba (2007), lineer hareketi döner harekete çevirerek DC motoru tahrik eden ve DC motordaki manyetik alan zorlanmasını kullanarak aktif bir süspansiyon sistemi üzerinde çalışmışlardır.

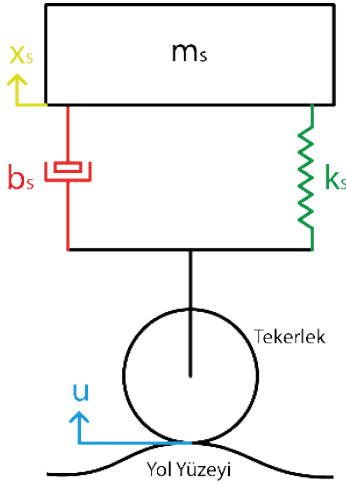
Zuo ve diğ. (2010) lineer elektromanyetik rejeneratif süspansiyon sistemi prototipi geliştirerek test sonuçlarını yayınlamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre sabit bobinden 0,25-0,5m/s süspansiyon hızlarında 16-64W güç değeri elde edilmiştir.

Sapinski ve Krupa'nın (2013) yaptığı bir çalışmada, doğrusal bir manyetik sönümleyici tasarımı görülmektedir. Zuo ve diğ.(2010)'nin yaptığı tasarıma benzer bir tasarım mevcut olup, 3 fazlı bobin yapısı ile rejeneratif enerji kazanımı sağlanmaktadır. Daha çok teorik analizlere yer verilen çalışmada neodyum mıknatıslar kullanılmış ve indüksiyon verimi arttırılmıştır.

Yüksek frekanslarda çalışma verimi düşük olan vidalı mil mekanizmasına sahip elektromekanik rejeneratif sistemlerin verimini arttırmak amacıyla bir model geliştiren Zhang ve diğ.(2016), tek yönlü rulmanlar, kremayer dişli ve mil grupları ile 2 Hz frekansta 6 mm'lik bir strokta yaklaşık %55,5 verim değeri hesaplamışlar ve bu değer verimde büyük ölçüde artış sağlamıştır. Yapılmış olan çalışma tren raylarındaki titreşimden rejeneratif enerji elde etmek amacıyla tasarlanan bir sistem olmasına karşın, boyutları binek otomobillerde kullanıma uygun olmaya yakındır.

### 1.1 Çeyrek Taşıt Modeli

Süspansiyon sistemleri tasarımı genel olarak çeyrek taşıt modeli üzerinden yapılarak, yarım taşıt modeli ve tam taşıt modeline adapte edilmektedir. Çeyrek taşıt modeli, süspansiyon karakteristiğinin matematiksel olarak ifade edilebileceği en basit ve efektif modeldir (Ulukapı 2005; Khoshnoud ve diğ., 2013). Makaledeki yapılan çalışmaların tümü çeyrek taşıt modeli üzerinden yapılmıştır. Şekil 2'de basit konvansiyonel süspansiyon sistemlerinin bir serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli görülmektedir.



Şekil 2. Bir Serbestlik Dereceli Çeyrek Taşıt Modeli

- $m_s$  : Çeyrek taşıt modeli için araç asılı kütlelerinin çeyrek noktadaki kütlesi (kg)
- $x_s$  : Çeyrek taşıt modeli için araç asılı kütlelerinin yer değiştirmesi (m)
- $k_s$  : Süspansiyon yay katsayısı (N/m)
- $b_s$  : Damper katsayısı (N\*s/m)
- $u$  : Yol girişi (m)

Bir serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli için aşağıdaki denklem oluşturulmuştur:

$$m_s \ddot{x}_s + b_s (\dot{x}_s - \dot{u}) + k_s (x_s - u) = 0 \quad (1)$$

Bir serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinden yola çıkarak iki serbestlik dereceli taşıt modeli oluşturulacak ve model üzerine rejeneratif modül elemanı eklenecektir. Sistem matematik modellerinin rejeneratif modül ile birlikte oluş-



turulabilmesi için bir serbestlik dereceli çeyrek taşıt modeli denklemi üzerinde değişiklik yapılması gerekmektedir ve yol düzgünlüğüne  $u$  bağlı olarak taşıt asılı kütesinin  $x_s$  yer değiştirme miktarının hesaplanması gerekmektedir. Denklem (1)'de zamana göre laplace fonksiyonu uygulanırsa Denklem (2) ve (3) elde edilmektedir (Ulukapı, 2005);

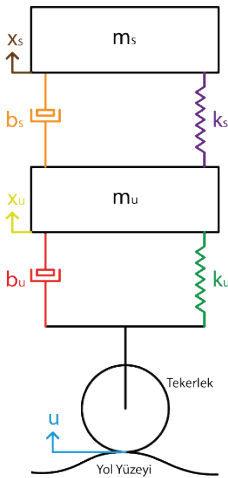
$$m_s s^2 X_s(s) + b_s s X_s(s) + k_s X_s(s) = b_s s U(s) + k_s U(s) \quad (2)$$

$$\frac{X_s(s)}{U(s)} = \frac{b_s s + k_s}{m_s s^2 + b_s s + k_s} \quad (3)$$

(3)'de elde edilen denklemin ifade ettiği durum;  $u$  yol girişine bağlı yol durum frekansına göre yer değiştirme değerinin,  $x_s$  çeyrek araç asılı olmayan kütesinin frekansa bağlı yer değiştirmesine olan oranıdır.  $s$  değişkeni yol durum frekansını (Hz) belirtmektedir.

Bir serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinden hareketle türetilen denklemler, iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinde geliştirilecektir. İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinde taşıt kütesi ve süspansiyon katsayılarına ek olarak tekerlek değişkenleri de ele alınmaktadır. Taşıt asılı kütesini temsil etmekte olan kısım asılı kütle olarak isimlendirilmektedir. Tekerlek ve aks kütesini temsil eden kısım ise asılı olmayan kütle olarak isimlendirilmektedir (Ulukapı 2005).

Şekil 3 üzerinden çıkarılan (1), (2) ve (3) denklemlerinden hareketle Şekil 4 için iki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinin denklemleri çıkartılabilmektedir:



Şekil 3 İki Serbestlik Dereceli Çeyrek Taşıt Modeli

- $m_s$  : Çeyrek taşıt modeli için araç asılı kütlelerinin çeyrek noktadaki kütlesi (kg)
- $x_s$  : Çeyrek taşıt modeli için araç asılı kütlelerinin yer değiştirmesi (m)
- $x_u$  : Asılı olmayan kütle konumu (m)
- $k_s$  : Süspansiyon yay katsayısı (N/m)
- $b_s$  : Damper katsayısı (N\*s/m)
- $u$  : Yol girişi (m)
- $m_u$  : Asılı olmayan kütle (kg)
- $b_u$  : Tekerlek damper katsayısı (N\*s/m)
- $k_u$  : Tekerlek yay katsayısı (N/m)

$$m_s \ddot{x}_s = -k_s(x_s - x_u) - b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \quad (4)$$

$$m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + k_s x_s = b_s \dot{x}_u + k_s x_u \quad (5)$$

$$m_u \ddot{x}_u - k_s(x_s - x_u) - b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) = -k_u(x_u - u) - b_u(\dot{x}_u - \dot{u}) \quad (6)$$

$$m_u \ddot{x}_u + (b_s + b_u)\dot{x}_u + (k_u + k_s)x_u = k_u u + b_u \dot{u} + b_s \dot{x}_s + k_s x_s \quad (7)$$

Başlangıç şartları sıfır kabul edilerek Denklem (5) ve (7) için zamana bağlı laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$L\{(2.5)\} \rightarrow X_s(s)(m_s s^2 + b_s s + k_s) = X_u(s)(b_s s + k_s) \quad (8)$$

$$L\{(2.7)\} \rightarrow X_u(s)(m_u s^2 + (b_u + b_s)s + (k_u + k_s)) = X_s(s)(b_s s + k_s) + U(s)(b_u s + k_u) \quad (9)$$

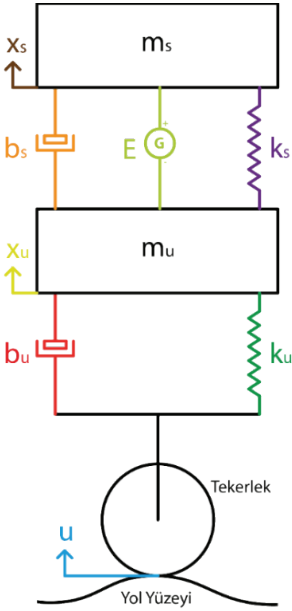
Denklem (8) ve (9)'dan hareketle araç asılı kütlelerinin yer değiştirmesinin yol düzgünlüğüne (frekansa bağlı) oranı olacak şekilde transfer fonksiyonu yazılırsa;

$$\frac{X_s(s)}{U(s)} = \frac{b_u b_s s^2 + b_s k_u s + k_s k_u}{m_u m_s s^4 + (m_u b_s + m_s b_u + m_s b_s) s^3 + (m_u k_s + m_s k_u + m_s k_s + b_s b_u) s^2 + (k_s b_u + b_s k_u) s + k_s k_u} \quad (10)$$

Denklem (9) da; frekansa bağlı yol durumu yer değiştirmesi ile araç asılı kütlelerinin frekansa bağlı yer değiştirmesi oranı elde edilmektedir. Buna göre yol durumu giriş parametresi ve araç asılı kütle çıkış parametresi olacak şekilde sisteme rejeneratif modül parametreleri de dahil edilecektir.

İki serbestlik dereceli çeyrek taşıt modelinden hareketle çıkartılan denklemler

sayesinde yol durumuna göre çeyrek araç asılı kütesinin yer değiştirmesi bulunabilmektedir. Oluşturulan modelde elektromekanik rejeneratif süspansiyon modülü sisteme dahil edilerek; giriş parametresi yol düzgünlüğü ve çıkış parametresi rejeneratif modülden üretilen enerji miktarı olacak şekilde transfer fonksiyonu yazılacaktır.

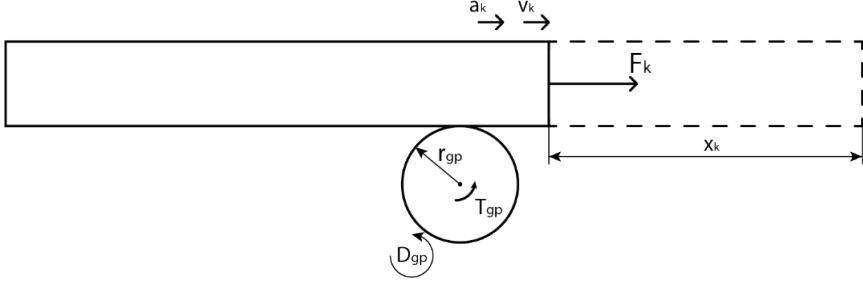


Şekil 4. İki Serbestlik Dereceli Rejeneratif Süspansiyon Modülüne Sahip Çeyrek Taşıt Modeli

Şekil 3'te asılı olmayan kütle ile asılı kütle arasındaki "G" ile sembolize edilmiş kısım rejeneratif süspansiyon modülüdür ve elektrik jeneratörünü ifade etmektedir. + ve - sembolleri ise bu jeneratörün DC bir jeneratör olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda diğer bölümlerde bahsedilecek olan rejeneratif süspansiyon modülünün damper katsayısında artışa sebep olacağı faktörü de göz önünde bulundurulursa "G" ile ifade edilen kısım damper olarak hesaplamalara dahil edilmelidir.

Araç asılı olmayan kütle ile araç asılı kütle arasındaki lineer hareket girişi; rejeneratif süspansiyon modülü iç mekanizmasına aktarılarak DC elektrik motoru döndürülmektedir. Akabinde ise DC elektrik motoru jeneratör görevi görerek DC elektrik enerjisi üretmektedir. Dolayısıyla rejeneratif süspansiyon modülünde, lineer hareketin hızı ve kuvveti giriş parametresi olarak ve DC elektrik motorundan üretilen elektrik enerjisi çıkış parametresi olarak değerlendirilirse; Watt cinsinden elektrik enerjisi gücü elde edilebilecektir.

Rejeneratif süspansiyon modülünün giriş elemanı kremayer dişlidir. Kremayer dişli lineer hareketini, giriş pinyon dişlisine aktarmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi kremayer dişlisine etki eden  $F_k$  kuvveti ile, giriş pinyon dişlisine  $T_{gp}$  torku etkimektedir. Sistemdeki kuvvetler, kremayer dişlinin  $v_k$  hızı ve ak ivmesiyle birlikte etkimektedir.



Şekil 5. Kremayer Dişli Pinyon İkili Durum Görseli

- $a_k$  : Kremayer dişlinin hareket ivmesi ( $m/s^2$ )
- $v_k$  : Kremayer dişlinin hareket hızı ( $m/s$ )
- $F_k$  : Kremayer dişliye uygulanan kuvvet (N)
- $x_k$  : Kremayer dişlinin yer değiştirmesi (m)
- $r_{gp}$  : Giriş pinyon dişlisinin bölüm dairesi yarıçapı (m)
- $T_{gp}$  : Giriş pinyon dişlisine etkiyen tork (Nm)
- $D_{gp}$  : Giriş pinyon dişlisinin dakikadaki devir sayısı (dev/dk)

Zhang ve diğ.nin (2007) yaptığı araştırmaya göre, taşıt süspansiyonlarına yol durumuna bağlı olarak 3-12 Hz frekans bandında zamana bağlı yer değiştirme uygulanmaktadır. Süspansiyon üreticilerinin belirlediği nominal çalışma frekans aralığı da 0-10 Hz bandında olmaktadır. Buradan hareketle; Denklem (10) dan frekansa bağlı bir sonuç elde edilmekle birlikte, 3-12 Hz aralığındaki frekanstaki lineer hareket hızı sistemin fiziksel boyutlarına ve tasarımına göre yüksek seviyelerdedir.

Sistem fiziksel boyutlarına göre yüksek seviyelerde olan hız değişimleri; ihmal edilebilecek süre aralıklarında ivmeler oluşturacaktır. Sistemin maksimum çalışma sınır değerleri ele alınarak analiz yapılacağından dolayı 12 Hz maksimum çalışma frekansındaki değerler dikkate alındığında; 12 Hz aralığındaki lineer hızlarda oluşan ivmeler ihmal edilecektir. Bununla birlikte, sistem davranışları analizinde de frekansa (dolayısıyla hıza) bağlı teorik analiz gerçekleştirilmiştir. Sistem parçalarının mukavemet hesaplamaları ise hız-yer değiştirme analizi pa-

raleinde yapılmıştır. Şekil 3.4 incelendiğinde Denklem (11) - (14) yazılabilmektedir.

$$T_{gp} = F_k * r_{gp} \quad (11)$$

Giriş pinyon dişlisi modülü 1mm olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca diş sayısı da 16'dır. Bu değerler göz önünde bulundurularak giriş pinyon dişlisi bölüm dairesi çapı 16 mm olmaktadır. Bölüm dairesi yarıçapı ise 8 mm olacak şekilde Denklem (11) de yerine yazılırsa;

$$T_{gp} = F_k * 0,008 \quad (12)$$

Kremayer dişlinin hareket hızı değeri (ivme ihmal edilerek) incelendiğinde Denklem (13) yazılabilmektedir.

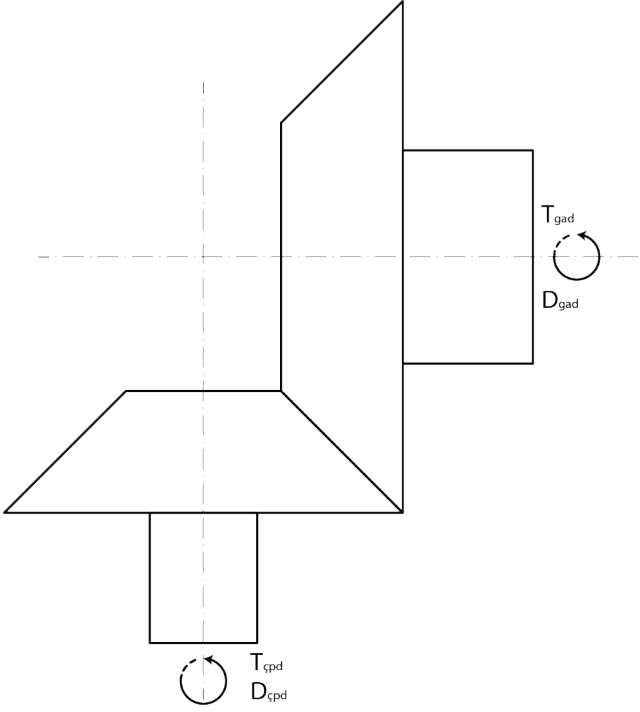
$$D_{gp} = \frac{v_k}{2 * \pi * r_{gp}} * 60 \quad (13)$$

Denklem (13) de  $D_{gp}$  değişkeninin birimi (dev/dk)'dır. Fakat hız değişkeninin birimi (m/s)'dir. Kesrin 60 ile çarpılmasının sebebi saniyeyi dakikaya çevirme işleminin gerekliliğinden dolayıdır. Denklem (13) ün sadeleştirilmiş hali Denklem (14)'de ifade edilmiştir.

$$D_{gp} = v_k * 1193,66 \quad (14)$$

Rejeneratif süspansiyon modülü tasarımında; Şekil 3.4'te görülen pinyon dişlisi, bir shaft yardımıyla Şekil 3.5'teki ayna dişlisine tek yönlü rulmanlar vasıtasıyla bağlanmıştır. Dolayısıyla rejeneratif süspansiyon modülü giriş shaftına ve shafta mesnetlenmiş elemanlara etkileyen tork, Şekil 3.4'teki pinyon dişlisine etkileyen giriş tork değerine eşittir. Denklem (15) de söz konusu durum matematiksel olarak ifade edilmiştir.

- $T_{gad}$  : Giriş ayna dişlisine etkileyen tork değeri (Nm)
- $D_{gad}$  : Giriş ayna dişlisinin dakikadaki devir sayısı (dev/dk)
- $T_{çpd}$  : Çıkış pinyon dişlisine etkileyen tork değeri (Nm)
- $D_{çpd}$  : Çıkış pinyon dişlisinin dakikadaki devir sayısı (dev/dk)



Şekil 3.5. Giriş Ayna Dişlisi Ve Çıkış Pinyon Dişlisi İkili Durum Görseli

$$T_{gad} = T_{gp} = F_k * 0,008 \quad (15)$$

Birbirine mesnetleniş eş merkezli şafta bağlı güç aktarma elemanlarının devir sayıları eşit olacağından dolayı Denklem (16) ile ifade edilmiş olan durumda; rejeneratif süspansiyon modülü giriş şaftı ve şafta mesnetlenmiş elemanların dakikadaki devir sayıları, Şekil 3.4'teki pinyon dişlisinin dakikadaki devir sayısına eşittir:

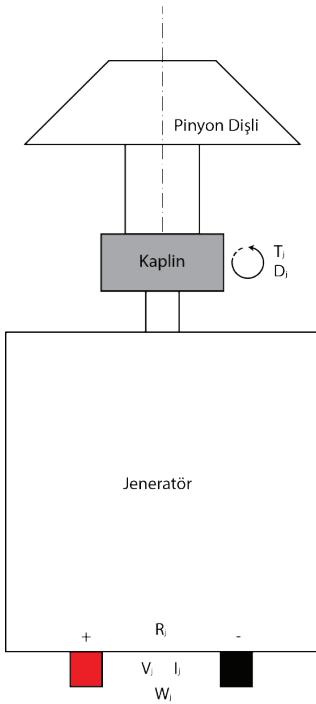
$$D_{gad} = D_{gp} = v_k * 1193,66 \quad (16)$$

Rejeneratif süspansiyon modülü tasarımındaki ayna-pinyon güç aktarma mekanizmasında dişli modülleri 1,5 mm olarak seçilmiştir. Giriş ayna dişlisinin diş sayısı, çıkış pinyon dişlisinin diş sayısının 2 katı kadardır. Dolayısıyla giriş ve çıkış arasında 1:2 redüksiyon oranı vardır. Denklem (17) de ifade edilen durumda; giriş ayna dişlisine etkiyen tork değeri, çıkış pinyon dişlisinde yarıya düşmektedir; buna karşın dakikadaki devir sayısı da iki kat artmaktadır. Hız ve tork ters orantılı kavramlar olduğu için çıkış pinyon dişlisindeki tork azalırken dakikadaki devir sayısı (veya açılal hız değeri) artmaktadır.

$$T_{\text{çpd}} = T_{\text{gad}} / 2 \quad (17)$$

$$D_{\text{çpd}} = D_{\text{gad}} * 2 = v_k * 2387,32 \quad (18)$$

Kremayer dişli giriş hızına bağlı olarak çıkış pinyon dişlisinin dakikadaki devir sayısı Denklem (16) dan hareketle, Denklem (18) elde edilmiştir. Çıkış pinyon dişlisi ise Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bir kaplin vasıtasıyla rejeneratif elektrik üreten motorun miline bağlanmıştır. Böylece çıkış pinyon dişlisinin devir sayısı direk olarak motorun giriş devir sayısına eşittir.



Şekil 3.6. Jeneratör (DC Motor) ve Kaplin Pinyon Dişli Bağlantısı Görseli

Rejeneratif süspansiyon modülü içerisinde bulunan ve rejeneratif enerjiyi üreten elektrik motoru, üzerinden akım çekilmesi esnasında zorlanma torku üretmektedir. Üretilen zorlanma torku Denklem (19) ile ifade edilmektedir. Zorlanma torku, sisteme ters yönde etki etmektedir ve Kremayer dişliye uygulanan giriş torkunu azaltıcı etki göstermektedir. Dolayısıyla çeyrek taşıt modelindeki G ile sembolize edilmiş kısımda damper etkisi oluşturmaktadır. Oluşacak olan damper kuvveti asılı olmayan kütle ile asılı kütle arasında bulunan damper kuvvetine eklenecektir.

$$T_{mz} = \frac{W}{D_{\text{çpd}}} * 9,55 \quad (19)$$

$$T_{gadz} = T_{mz} * 2 \quad (20)$$

$$F_m = \frac{T_{gadz}}{0,008} \quad (21)$$

Denklem (19)'da elde edilen zorlanma torku, çıkış pinyon dişlisine 1:1 oranında etki etmektedir. Çıkış pinyon dişlisine etki eden tork, Denklem (20) de ifade edildiği gibi giriş ayna dişlisine (diş sayısından dolayı) 2 kat etki etmektedir. Giriş ayna dişlisine etki eden tork Denklem (21) de görüldüğü gibi giriş pinyon dişlisine, oradan da direk olarak kremayer dişliye etki etmektedir.

Elektrik motorunda çekilen akıma göre, kremayer dişliye ters bir zorlanma kuvveti etki etmektedir. Etki eden bu zorlanma kuvveti de asılı olmayan kütle ile asılı kütle arasında damper etkisi yapmaktadır.

Şekil 3.3'te asılı olmayan kütle ile asılı kütle arasındaki "G" ile sembolize edilmiş rejeneratif süspansiyon modülü kısmı içerisinde bulunan mekanizmanın kuvvet ve tork aktarım analizleri (11)-(21) arasındaki denklemler ile yapılmıştır. Çeyrek taşıt modeline rejeneratif süspansiyon modülü dahil edildiğinde, rejeneratif süspansiyon modülü mekanizmalarının kuvvet ve tork denklemleri Denklem (10) a eklenerek; asılı ve asılı olmayan kütle yer değişimlerine göre rejeneratif süspansiyon modülünün ürettiği rejeneratif elektrik enerjisinin gücü (Watt) elde edilebilecektir.

Şekil 3.2'den tekrar yola çıkarak sistem iki parçada incelenmiştir. Yol ve asılı olmayan kütle arasındaki kuvvet dengesi denklemleriyle, yol durumuna göre asılı olmayan kütlelerin yer değişim denklemi; asılı kütle ve asılı olmayan kütle arasındaki kuvvet denklemleriyle, asılı olmayan kütle yer değişimine göre asılı kütle yer değişimi denklemi çıkarılacaktır. Asılı olmayan kütle ile asılı kütle arasında yazılacak olan kuvvet dengesi denklemine rejeneratif süspansiyon modülü kuvvet denklemleri eklenerek, asılı olmayan kütle ve asılı kütle arasına Şekil 3.3'te "G" ile sembolize edilmiş rejeneratif süspansiyon modülü damper kuvvetleri dahil edilmiş olacaktır. Denklemler birleştirilerek; yol durumuna göre asılı kütlelerin yer değişimi ve aynı zamanda yol durumunun frekansına göre asılı kütle yer değiştirme hızına bağlı olarak rejeneratif süspansiyon modülünden elde edilecek olan elektrik enerjisi gücü (Watt) genel sistem denklemi olarak elde edilecektir.

$$m_u * \ddot{x}_u = [k_u * (x_u - u)] + [b_u * (\dot{x}_u - \dot{u})] \quad (22)$$

$$m_u * a_u = [k_u * (x_u - u)] + [b_u * (v_{xu} - v_u)] \quad (23)$$



Sistem teorik hesaplamalarında, hız değişimleri sistem fiziksel ölçülerine göre çok kısa zaman aralıklarında meydana geleceğinden, oluşacak olan ivmeler ihmal edilebilir zaman aralıklarında meydana gelecektir. İhmal edilecek olan hız değişimi zamanından sonra yer değiştirme hızları sabit kabul edilecektir. Dolayısıyla sabit hızlarda ivme değeri sıfır olacaktır. Bu durumda Denklem (23) den hareketle yol durumu değişimine göre asılı olmayan kütle yer değişimi denklemi elde edilebilecektir.

$$x_u = u + \frac{b_u * (v_{xu} - v_u)}{k_u} \quad (24)$$

Denklem (23) de ivme sıfır olacak şekilde düzenleme yapıldığında Denklem (24) elde edilmiştir. Şekil 3.3'te tekerlek ve asılı olmayan kütle arasında yer değişim denklemi Denklem (24) de elde edilmiştir. Asılı olmayan kütle ve asılı kütle arasında, rejeneratif süspansiyon modülü eklenerek yer değişim denklemi yazılacak olursa;

$$m_s * \ddot{x}_s = [k_s * (x_s - x_u)] + [b_s * (\dot{x}_s - \dot{x}_u)] + F_m \quad (25)$$

Bu durumda Denklem (25) den hareketle asılı olmayan kütle yer değişimine göre asılı kütle yer değişimi denklemi elde edilebilecektir. Rejeneratif süspansiyon modülünün damper kuvveti  $F_m$  ile ifade edilmiştir. Denklem (21) de  $F_m$  değeri elde edilmiştir.

Rejeneratif elektrik enerjisini üreten elektrik motorundan elde edilecek olan elektrik enerjisi gücü ile  $F_m$  arasında bağlantı kurulursa, asılı olmayan kütle ile asılı kütle arasındaki yer değiştirme miktarına bağlı olarak üretilecek olan rejeneratif elektrik enerjisi gücü (Watt) hesaplanabilecektir. (14)-(21) arasındaki denklemler ele alındığında;

$$F_m = \frac{W_{m*} * 9,55 * 2}{D_{cpd} * 0,008} \quad (26)$$

$$F_m = \frac{V * I * 2387,5}{2400 * v_k} \quad (27)$$

Denklemler, birleştirilerek sadeleştirildiğinde Denklem (27) elde edilmektedir. Bu denklemde kremayer dişli giriş hızına ve üretilecek rejeneratif elektrik enerjisi gücüne göre, rejeneratif süspansiyon modülünün üreteceği damper kuvveti hesaplanabilmektedir. Elde edilen  $F_m$  damper kuvveti Denklem (25) de yerine yazılarak sadeleştirilirse Denklem (28) elde edilmektedir.

$$x_s = \frac{[b_s*(v_{xs}-v_{xu})]+[\frac{V*I*0,995}{v_k}]}{k_s} + x_u \quad (28)$$

Asılı olmayan kütle yer değiştirmesi ve yer değiştirme hızıyla birlikte, Asılı ve asılı olmayan kütle arasındaki yer değiştirme miktarına bağlı olarak rejeneratif süspansiyon modülünden elde edilen rejeneratif elektrik enerjisi gücü arasındaki bağıntı Denklem (28) de elde edilmiştir.

Yol durumuna göre asılı olmayan kütle yer değişim denklemi Denklem (24) ve asılı ve asılı olmayan kütle arasındaki yer değiştirmeyi veren Denklem (28) birleştirildiğinde, rejeneratif süspansiyon modülüne sahip çeyrek taşıt süspansiyon modeli sistem Denklem (29)'da elde edilmiştir.

$$x_s = \frac{[b_s*(v_{xs}-v_{xu})]+[\frac{V*I*0,995}{v_k}]}{k_s} + \frac{b_u*(v_{xu}-v_u)}{k_u} + u \quad (29)$$

Rejeneratif süspansiyon modülüne sahip çeyrek taşıt modelinin genel sistem denklemi (29)'da elde edilmiştir. Sistemin kinematik değerlerinin bilinmesi durumunda elde edilecek olan teorik rejeneratif elektrik enerjisi gücü  $V*I$  değeri olup birimi Watt'dır.

Frekans, birim zamandaki titreşim sayısı olarak tanımlanmaktadır ve birimi Hz'dir. Süspansiyon sistemleri de yol düzgünlüğünden dolayı belirli frekanslarda titreşim kuvvetleri etkisi altında çalışmaktadır. Yol düzgünlüğünün süspansiyon ve askı donanım parçaları için önemi büyüktür. Bağlantı parçalarının tasarımı ve malzeme seçimi, sistem üzerine gelen titreşim kuvvetleri doğrultusunda şekillendirilmektedir. Rejeneratif süspansiyon modülünün tasarımında süspansiyon sisteminin hangi frekans aralığında çalıştığı araştırılması da büyük önem arz etmektedir.

Rejeneratif süspansiyon modülü içerisindeki mekanizmanın mukavemet ve dinamik yük altındaki cevabının analizinde giriş parametresi frekansa bağlı değişkenler olmaktadır. Frekans değerlerine ve mekanizma üzerine gelen kuvvetlere göre dinamik analizler gerçekleştirilmiş, bu kriterlere göre malzeme seçimleri yapılmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## 1.2 Elektromekanik Rejeneratif Süspansiyon Modülü Parametreleri

Tasarımı yapılan rejeneratif süspansiyon modülünün enerji dönüşümünü sağlayan parçası fırçalı tip DC Motordur. DC Motorlar elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren sistemler olduğu gibi aynı zamanda mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştürebilen enerji makineleridir. Bu karakteristiklerinden

dolayı DC elektrik motorunu, süspansiyon sisteminin yol durumundan kaynaklı titreşimlerini (mekanik enerjiyi) doğru tasarlanmış ara mekanik dönüşüm sistemleriyle rejeneratif enerji kazanım sistemi olarak kullanmak oldukça verimli sonuçlar doğurabilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar göstermiştir ki, binek otomobillerde kullanılan konvansiyonel pasif süspansiyonlar genellikle (yol durumuna göre değişiklik göstermekle birlikte) 0-12 Hz aralığındaki frekanslarda 0-25 mm yer değiştirme ile çalışmaktadırlar.

Tasarlanan rejeneratif süspansiyon modülü, hız arttırma mekanizmasına sahiptir. Bunun sebebi, DC motordan yüksek verimlilikte enerji üretilmek istendiğinde, DC motor karakteristiğine göre motor milinin maksimum motor verim devrinde döndürülmesi zorunluluğudur. Genellikle 100-200 W enerji üreten DC motorların ortalama maksimum verim devirleri 1500-3000 devir/dk değerindedir. Bu sebeple rejeneratif süspansiyon modülü tasarımında hız arttırım sistemi kullanılmak zorundadır. Fakat hız arttırma mekanizmaları giriş torkunda düşüşe sebep olacağından, mekanizmada bulunan parçalar yüksek kuvvetlere maruz kalmaktadır. Süspansiyon sisteminin de 0-12 Hz aralığında çalıştığı göz önünde bulundurulduğunda, rejeneratif modül içerisindeki mekanik parçalar için mekanik yorgunluğun hızlı olması öngörülmektedir. Dolayısıyla tasarım kriterlerinin yorulma dayanımı yüksek malzemeler için tercih edilmesi ve mekanizmanın bu koşullara göre en uygun yapıda modellenmesi gerekmektedir.

Süspansiyon sistemi lineer hareketinin, DC motorun miline dönel hareket olarak aktarılması gerekmektedir. Ayrıca hız arttırma mekanizması ile (DC motor karakteristiğine göre değişmekle birlikte) DC motordan güç elde edebilmek için süspansiyonun lineer hareketinin en az 1:3 – 1:10 arasında redüksiyon oranıyla DC motor miline dönel hareket olarak aktarılması gerekmektedir. Rejeneratif modüldeki söz konusu sistemler süspansiyon üzerinde damperleme etkisi oluşturacaktır. Oluşacak olan etki ise süspansiyon damper katsayısında artışa sebep olacaktır.

Binek otomobil süspansiyonlarının strok tasarımında belirlenen damper ve yay katsayıları birbirleri arasında belirli bir orandadır. Fakat rejeneratif süspansiyon modülü pasif süspansiyona takıldığında damper katsayısı artacağından, yay ve damper katsayısı arasındaki oran değişecektir. Bu sebeple süspansiyon sertleşecek ve taşıtın konfor parametresinde azalma meydana gelecektir. Konfor parametresinin düşüşü akabinde aracın yol tutuş ve viraj alma performansı artacaktır. Tüm bu öngörüler matematiksel olarak ifade edilen denklemlerle ifade edilmiştir.

## **2. Tasarım, Analiz ve Metot**

Elektromekanik Rejeneratif süspansiyon modülü, adından da anlaşılacağı üze-

re mekanik bir sistemdir. Yapısal olarak, hareket tipi dönüşümü ve redüksiyon düşüşü ile hız artışı sağlayan mekanik dişli sisteminden ve elektrik motorundan oluşmaktadır. Sistem tasarımına başlarken literatür taraması detaylı olarak yapılmış ve mevcut yapılmış tüm çalışmaların tasarımları incelenerek çıktılar değerlendirilmiştir. Mevcut çalışmalarda tercih edilen (elektromekanik sistemlerde) mekanizmaların çoğunun vidalı mil ve bilyeli somun ikilisinden oluşan mekanizmalar olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bu sistemlerin yorulma dayanımlarının düşük olduğu ve yüksek frekanslı titreşime sebep olan yol durumlarında düşük verimlerde çalıştıkları gözlemlenmiştir. Diğer tasarımların çoğunda çeyrek taşıt modelinde bir süspansiyondan 100-200W arası enerji elde edildiği gözlemlenmiştir. Fakat yapılmış olan tasarımlar mevcut konvansiyonel süspansiyonlara göre ağır ve verimsiz yapıdadır. Vidalı mil-bilyeli somun ikilisi, iki kollu mafsal dönüşüm mekanizması veya benzer tipteki mevcut çalışmaların aksine söz konusu çalışmada dişliler yardımıyla dönüşüm ve iletim mekanizmaları kullanılmıştır.

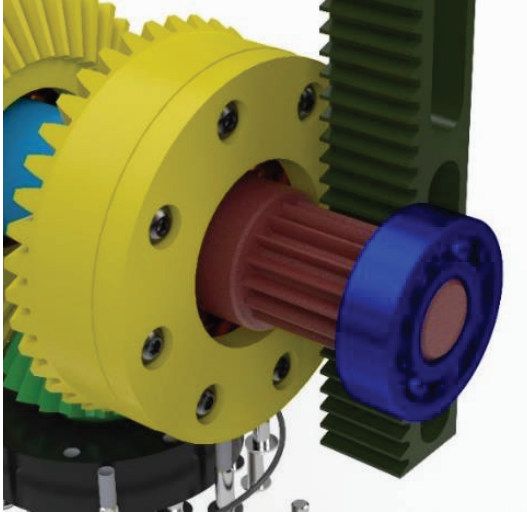
Rejeneratif süspansiyon modülü prototip tasarımı ve imalatı yapılarak prototipleme işlemleri 3D yazıcı vasıtasıyla yapılmıştır. Yapılmış olan çalışmada elektromekanik rejeneratif süspansiyon modülü prototip tasarımının izometrik görüntüsü Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Elektromekanik Rejeneratif Süspansiyon Modülü Prototip Tasarımının İzometrik Görüntüsü

Yapılmış olan tasarımda ilk olarak süspansiyonun lineer hareketi kremayer dişli mekanizması ile dönel harekete çevrilmiştir. Pinyon dişlisi olabildiğince küçük ve yol durumundan kaynaklı oluşacak olan vuruntu kuvvetlerine göre mukavemetli diş yapısına sahip şekilde tasarlanmıştır. Yapılan tasarımda 16 diş sayısına sahip dişli tercih edilmiştir. Kremayer dişli ve pinyon dişli kısmının görüntüsü Şekil

4.2'de görülmektedir. Kremayer dişli sistemlerinde dişli oranı; döndüren dişli (kremayer) için lineer stroğa göre, döndürülen dişlinin tur sayısına eşit olmaktadır. Denklem (30) da; 1mm modül ile tasarlanmış 16mm diş sayısına sahip pinyon dişlisinin kremayer stroğuna göre tur sayısını veren formül görülmektedir.



Şekil 4.2 Elektromekanik Rejeneratif Süspansiyon Modülünün Hareket Tipi Dönüşüm Mekanizması Olan Kremayer-Pinyon İkilisinin Görüntüsü

Yapılan tasarımda 1mm modüle sahip kremayer-pinyon ikilisi arasındaki hareket ilişkileri Denklem (30) ile hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla pinyon dişlisinin 1 tur dönebilmesi için kremayer dişlinin Denklem (31) de elde edildiği gibi 50,265 mm hareket etmesi gerekmektedir.

$$1 = \frac{x_1}{2\pi \cdot 8} \quad (30)$$

$$x_1 = 50,265 \text{ mm} \quad (31)$$

Formülde görüleceği üzere pinyon dişli yarıçapı ne kadar az olursa süspansiyonun pinyonu bir tur döndürebilmesi için gerek duyacağı lineer yer değiştirme miktarı o kadar az olacaktır. Kremayerin lineer hareket miktarının az olması, süspansiyonun düşük frekanslarda çalışırken pinyonda yüksek devir sayılarına ulaşmasını sağlayacaktır ve böylece jeneratöre yüksek hızlı hareket aktarılmış olacak akabinde de rejener edilen enerji miktarı artacaktır. Fakat dişli boyutları küçüldükçe taşıyabileceği maksimum kuvvet değerleri düşmektedir.

Kremayer-pinyon ikilisi ile hareket tipi lineerden dairesele çevrilmiştir. Fakat süspansiyon sistemi ileri ve geri yönlü olmak üzere çift yönde lineer hareket yaparak çalışmaktadır. Dolayısıyla hareket tipi dönüştürüldüğünde pinyonda saat yönünde ve saat yönünün tersi olacak şekilde dönel bir hareket elde edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar göstermektedir ki, çift yönde elde edilen enerjinin; tek yönlü rulmanlar ile yapılan çalışmada çift yönlü hareketin tek yönlü harekete çevrilerek DC motora aktarılması işlemiyle elde edilen enerjiden daha düşük olduğudur (Eriksson ve Piroti, 2016). Motor verimi, mekanizma verimi, atalet kuvvetlerinin yoğunluğu gibi parametreler oldukça etkilidir. Fakat verim değerlerine bakıldığında, DC motorun tek yönde sürekli döndürülmesi çift yönlü döndürülmesinden daha verimli olduğunu kanıtlamaktadır (Eriksson ve Piroti, 2016).

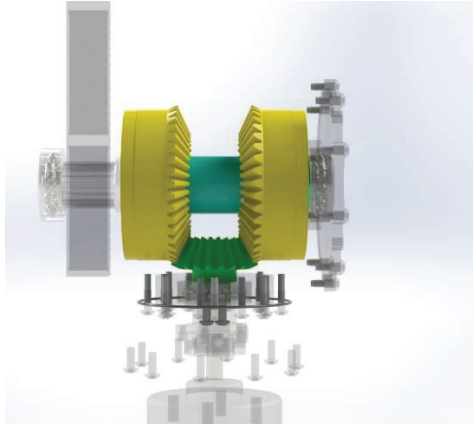
Belirli bir hareket yönünde sabit hızda yüksüz çalışan bir DC motor belirli bir zıt EMK(Elektromotor kuvveti) üreterek (motorun iletken tellerinde tork indükleyerek) motorun hareketinin devamlı olmasına yardımcı olmaktadır. Motor aniden yüke bindiğinde zıt EMK değeri düşerek motorun anma akımının artmasına sebep olmakta ve motorun güç üretmesini sağlamaktadır.

$$I_a = \frac{V_m - E_{EMK}}{R_a} \quad (32)$$

Motor yüksüz halde iken zıt EMK değeri motor gerilim değerine çok yakın bir değerdedir. Pratikte, motorun dönüş yönü anlık olarak değiştirilmek istendiğinde mekanik olarak motor milinin ivmesi ve mil üzerinde bulunan yüke bağlı olarak motorun çektiği akım anlık olarak yön değiştirecektir. Bu sebeple zıt EMK değeri de anlık olarak yön değiştirecektir. Motor sargılarındaki manyetik alan yönü anlık olarak yön değiştirdiğinde, yük direnci ve zıt EMK etkisinden dolayı ısı meydana gelecektir. Meydana gelen ısı sargılardaki iç direncin düşmesine sebep olacaktır. Dolayısıyla motorun anma akımı artacaktır ve akımın artması sonucunda sargılardaki ısı miktarı artmaya devam edecektir. Buradan hareketle anlık olarak sürekli yön değiştiren yük altındaki motor sürekli ısınarak veriminin düşmesine sebep olacaktır. Ayrıca motor kontrol devrelerindeki yarı iletken anahtarlama malzemeleri, zıt EMK'nın sürekli yön değiştirmesinden dolayı ters voltajlara maruz kalarak ısınacaktır. Sürekli yön değişimi; hem motorun hem de elektronik sistemlerin verimini azaltacak, sistemin çalışma verimine olumsuz etki edecektir (Damodharan ve Vasudevan. 2010). Bunu önlemek için Rejeneratif süspansiyon modülü tasarımı; motorun yön değiştirmeden çalışabilmesi için uygun mekanizmalarla donatılmıştır.

Süspansiyonun çift yönlü lineer hareketinin ve dolayısıyla Rejeneratif süspansiyon modülü içerisindeki giriş (kremayer) pinyonunun, çift yönlü dairesel ha-

reketini tek yönlü dairesel harekete dönüştürmek için tek yönlü rulmanlar ve ayna-pinyon dişlisi mekanizması tercih edilmiştir. Kremayer-pinyon ikilisinde pinyon dişlisinin bağlı olduğu shaft üzerine iki adet tek yönlü rulman ters şekilde bağlanarak ve tek yönlü rulmanların dış halkasına ayna dişlileri bağlanarak söz konusu yapı elde edilmiştir. Tek yönlü rulmanlar ve ayna dişlileri ile tasarlanmış yapı Şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3 Tek Yönlü Rulmanlar ve Ayna Dişlileri

Ayna-pinyon dişli sistemindeki pinyon dişli çıkışı, bir kaplin yardımıyla DC motorun miline bağlanmıştır. Bu sayede süspansiyonun çift yönlü lineer hareketi tek yönlü dönele harekete 2:1 oranında dönüştürülerek motora aktarılmıştır. Denklem (33) ile süspansiyonun lineer hareketinin teorik olarak DC motor milindeki eşdeğer tur sayısı hesaplanabilmektedir.

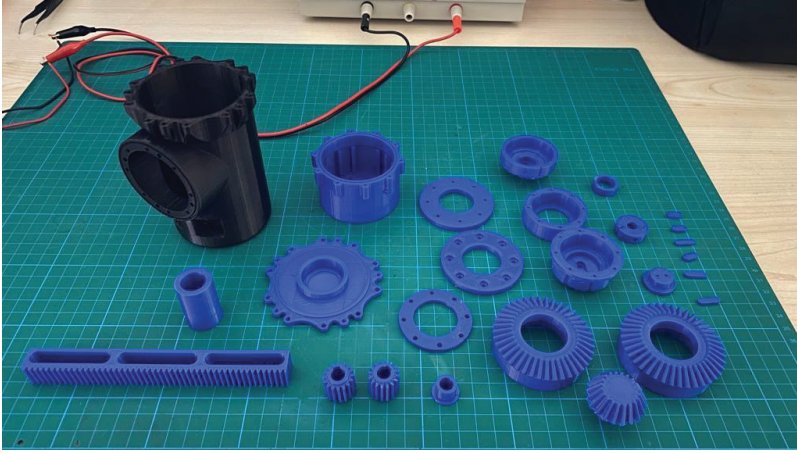
$$Devir_{dc\ motor} = \frac{x_1}{(2.\pi.r_1).2} \quad (33)$$

Tasarlanan mekanizma sayesinde hız artışı sağlanarak DC motorun dönüşü hızlandırılmış olmaktadır. Fakat aynı orana yakın değerlerde kremayer dişlinin lineer hareket etmesi zorlaşmaktadır. Bu durum süspansiyon üzerinde damper katsayısının artmasına yol açan durumdur. Dolayısıyla sistem parçaları üzerine gelecek olan kuvvetler damperlemeden dolayı artacaktır. Bunun için dişli diş profili ve yataklama elemanlarının boyutları seçilirken bu durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Tasarımı tamamlanan rejeneratif süspansiyon modülünün prototiplenmesi için ABS 740 High Impact malzeme ile 3D yazıcı yardımıyla parçalar basılmıştır. Bası-

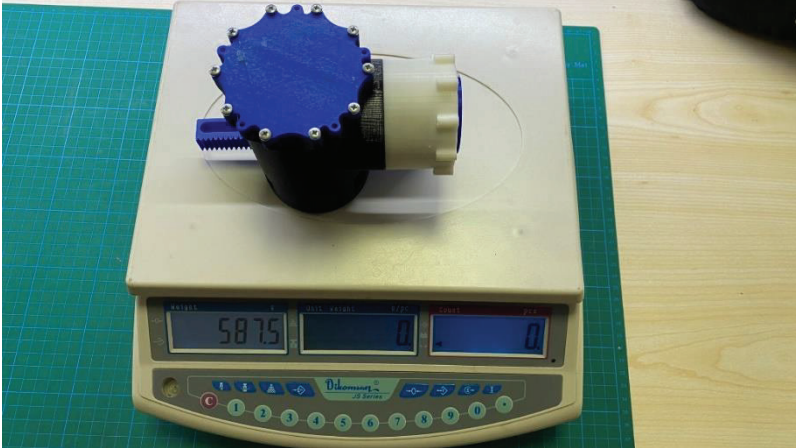
lan parçaların baskı kalitesini artırmak için katman yüksekliği ve parça yoğunluğu hassaslaştırılarak baskılar alınmıştır.

Rejeneratif süspansiyon modülü parçaları birleştirildikten sonra ağırlık ölçümü için hassas terazide ölçüm yapılmıştır. Parçalar montajlanmadan önce 3D yazıcıdan alınan baskının görseli Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. 3D Yazıcı İle ABS Malzemeden Basılmış Parçaların Görseli

DC elektrik motoru takılmadan, vidalar ve rulmanların da bulunduğu Rejeneratif süspansiyon modülünün toplam ağırlığı Şekil 4.5'te görüldüğü gibi 587,5g olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.5. Rejeneratif Süspansiyon Modülü Ağırlık Ölçümü

Tasarımda kullanılan DC elektrik motoru 467,2 g ağırlığında, 12 V 72 W Fırça-



lı tip motordur. Ölçümler sonucunda motor ve Rejeneratif süspansiyon modülü toplam ağırlığı vidalar ve rulmanlar dahil, 1054,7 g olarak ölçülmüştür.

DC motorun yüksüz durumda 12.3 V gerilim altında 2507 d/dk ile döndüğü takometre ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda elde edilen bilgi, rejeneratif süspansiyon modülünün 2500 d/dk çıkış hızına ulaşması esnasında motorun tüm üretim kapasitesine ulaşılacağı bilgisidir. Burada elde edilmesi beklenen DC elektrik enerjisi gücü teorik olarak 72 W seviyesindedir.

Rejeneratif süspansiyon modülünde kullanılan motor, fırçalı tip DC motordur ve jeneratör olarak kullanılmaktadır. Motorun jeneratör olarak kullanılması, motora dışardan tahrik vererek elektrik enerjisi üretilmesini sağlamaktadır. Bunun etkisi olarak elektro motor kuvveti gerilimi üretilmektedir. Üretilen bu elektro motor kuvveti gerilimiyle motor bobinine bağlanacak olan yük sayesinde Rejeneratif elektrik enerjisi elde edilmektedir. Motor yüksüz durumdayken, miline verilen tahrik sonucunda elektro motor gerilimi oluşmakta ve bobin uçlarından akım çekilmediği için motor tarafından güç üretilmemektedir.

$$I = \frac{V_{uygulanan} - V_{Zıt EMK}}{R_{endüvi}} \quad (34)$$

Eğer motor jeneratör olarak kullanılınsaydı ve bobin uçlarına DC gerilim verilerek motor milinden mekanik tahrik kuvveti elde edilmiş olsaydı Denklem (34) deki eşitlik sağlanmış olacaktı ve motor yüksüz durumdayken elektro motor kuvveti maksimum seviyede olacaktı ve motor çok düşük akım çekerek çalışacaktı. Motor miline yüklenen yük arttıkça da elektro motor kuvveti gerilimi azalarak motorun güç üretmesi sağlanmış olacaktı. Dolayısıyla elektro motor kuvveti motorun dönüş yönüne vektörel olarak ters bir etki oluşturacaktır.

Motorun jeneratör olarak kullanılması durumunda, üretilen gerilim değeri sabit kalacaktır. Eğer motor sargıları üzerine herhangi bir yük bağlanmazsa  $R_{yük}$  direnci sıfır olduğundan dolayı motor sargıları üzerinden akım geçmeyecektir. Motor sargılarına yük bağlanması durumunda Denklem (35) deki  $R_{endüvi}$  ve  $R_{yük}$  dirençleri sisteme eklenmektedir. Devreyi tamamlayan endüvi bobini de bir iç dirence sahiptir. Dolayısıyla endüvi bobin direnci de sisteme eklenmektedir. Eklenen yük direnci, üretilen  $V_{EMK}$  değeri ile ohm kanununa göre devreden  $I$  akımının akmasını ve Rejeneratif elektrik enerjisinin üretilmesini sağlayacaktır.

$$I = \frac{V_{EMK}}{R_{endüvi} + R_{yük}} \quad (35)$$

Multimetre ölçümleri sonucunda  $R_{endüvi}$  direnci  $2 \Omega$  olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla kısa devre durumunda ölçülen akım değeri Denklem (35) de hesaplandığında

Denklem (36) daki sonuca ulaşılmaktadır. Motorun teorik olarak 12 V gerilim ürettiği varsayılarak hesaplama yapıldığında 6 A akım akması gerektiği sonucu çıkmaktadır.

$$\frac{12}{2+0} \Rightarrow I = 6A \quad (36)$$

Denklem (37)'de teorik rejeneratif güç değeri 72W olarak hesaplanmıştır.

$$W_R = V_t * I_t \Rightarrow W_R = 12 * 6 = 72W \quad (37)$$

### 3. Sonuç ve Öneriler

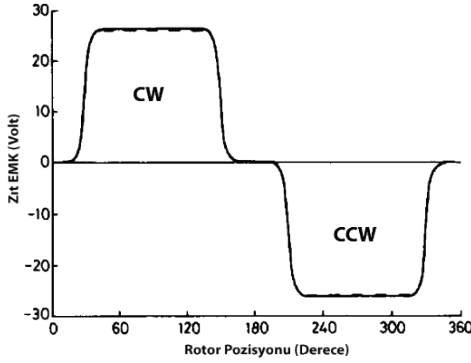
İklim değişikliği, büyük ölçüde insan kaynaklı aktivitelerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının artması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu aktivitelerden bir tanesi de ulaşımdır. Ulaşım sektöründe tercih edilen içten yanmalı motorlu taşıtlar, önemli bir sera gazı kaynağıdır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması gerekliliği ve artan petrol fiyatlarının etkisi elektrikli/hibrit taşıtların tercih edilmesine neden olmuştur. Sürdürülebilir araçlar olarak da isimlendirilen elektrikli/hibrit araçlara olan talebi etkileyen en önemli kriter menzildir. Menzili artırmak için sürekli gelişen teknolojiden faydalanarak çözümler üretilmektedir. Bu makalede elektrikli araçlarda menzil artırmayı sağlayacak bir tasarım geliştirilmiştir.

Rejeneratif süspansiyon modülü tasarımı, mevcut Macpherson yapıdaki binek otomobil süspansiyon boyutları baz alınarak tasarlanmıştır. Yapılan tasarımda teorik değerler ve denklemler ile hesaplamalar yapılarak sistem yorumlanmıştır. Süspansiyon sistemleri hakkında yapılan literatür taraması ve yapılmış çalışmalar incelendiğinde rejeneratif modül parçalarına etkiyecek olan kuvvetler hakkında bilgi edinilmiş ve bu kapsamda tasarım geliştirilmiştir.

Literatür taramasında elde edilen verilere göre taşıt süspansiyonları yol durumuna bağlı olarak genellikle 0-12 Hz frekans aralığında 0-25 mm yer değiştirmede çalışmaktadırlar. Yapılan çalışmada prototip montajı yapıldıktan sonra kremayer dişlinin ileri ve geri yönlü hareketi sonucunda motor bağlantı kaplininin (çıkış mili) sorunsuz şekilde aynı yönde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Makalede anlatılmış olan zıt EMK prensiplerinden dolayı DC motorun jeneratör olarak kullanılması durumunda, motora uygulanan çift yönlü hareketin motor enerji üretim veriminin düşük olmasına sebep olmaktadır. Bu durumun önüne geçilmesi için, aynı hızda ve süreklilikte DC motora uygulanacak olan tek yönlü harekette üretilen elektrik enerjisi veriminin daha yüksek olacağı da yapılan literatür taraması ve teorik hesaplamalarda kanıtlanmıştır.

Denklem (35)'de bulunan  $V_{EMK}$  voltajı, motor hızına bağlı olarak değişen bir voltaj değeridir. Ayrıca vektörel olarak düşünüldüğünde motor yönüne göre işaret değiştirmektedir. Dolayısıyla çift yönlü uygulanan mekanik hareketin  $V_{EMK}$  değişke-

ninin, değerini zamana bağlı olarak negatif ve pozitif sınır değerleri arasında sıfır değerine uğrayarak değiştireceğinden dolayı sürekli kaybolan bir miktar elektrik enerjisinin olduğu Şekil 5.1'deki grafikte açıklanabilmektedir.



Şekil 5.1 DC Motor Zıt EMK Voltaj-Derece Grafiği

Tasarımı yapılan rejeneratif süspansiyon modülünde bu durum ortadan kaldırılmaktadır. DC motora uygulanan hareket her zaman aynı yönde olduğu için motor tarafından üretilen elektrik enerjisi sıfıra yaklaşmakta fakat sıfır olmamaktadır ve vektörel olarak yer değiştirmedeği için voltaj işareti her zaman pozitif olmaktadır.

Tasarlanan rejeneratif süspansiyon modülü, sürekli olarak tek yönlü hareket sağlayarak DC motordan maksimum mekanik verim elde edilmektedir. Bu yaklaşım, motorun enerji üretim verimini artırırken, çift yönlü hareketin yol açtığı enerji kaybını en aza indirmektedir. Literatürde yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak, bu tasarım sürekli enerji üretimini ve enerji dönüşümünü destekleyerek menzil artışı sağlamaktadır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynakça

- Soruşbay, C. (2007). Karayolu ulaşımından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının çevreye etkisi ve kontrolü. *Mühendis ve Makina*, 48(564), 23-25.
- Singh, S., Kulshrestha, M.J., Rani, N., Kumar, K., Sharma, C. & Aswal, D.K. (2023). An overview of vehicular emission standards. *Journal of Metrology Society of India*, MAPAN 38, 241-263. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12647-022-00555-4>.

- Uçarol, H., Kural E., Bahar, M.D., Özsu, E., Elcik, E., Çimen, M.A., Demirci, M., Güler, M., Ararat, Ö., Bilirođlu, A.Ö., Kütük, O., Solak, Y., Ergin, C., ve Tırıs, M. (2007). Hibrid ve elektrikli araçlar ulaşımında enerji verimliliği için bir alternatif. *TÜ-BİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü*, 170-174. Erişim adresi: [https://www.emo.org.tr/ekler/29ffd3b980b5b35\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/29ffd3b980b5b35_ek.pdf).
- Çengel, Y., Boles, M. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach, 8<sup>th</sup> Edition*, McGraw-Hill Education:1024, ISBN 10 9780073398174.
- Mehta, H., Sukhadia, R. (2020). Regenerative system and it's application. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 07 (02), 1238-1243.
- Okuturlar, H. (2018). *Bir Binek Araç Süspansiyon Sisteminin Nümerik ve Deneysel Dinamik Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Cao, D., Song, X. and Ahmadian, M. (2011). Editors' perspectives: roadvehicle suspension design, dynamics, and control, Vehicle System Dynamics. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 49 (1-2), 3-28. Doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.532223>.
- Putgöl, Y., Altıparmak, D. (2015). Taşıt süspansiyon sistemi çeşitleri ve ön düzen geometrisine etkileri. *Politeknik Dergisi*. 19 (2), 195-202. Doi: 10.2339/2016.19.2 195-202.
- Abdelkareem, A.A.M., Xu, L., Ali, M.K.A., Elagouz, A., Mi, J., Guo, S., Liu, Y. & Zuo, L. (2018). Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review. *Applied Energy. Taipei Taiwan*, 229, 672-699. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.030,
- Suda, Y., Shiiba, T. (2007). A new hybrid suspension system with active control and energy regeneration. Vehicle System Dynamics: *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 25, 641-654. Doi: <https://doi.org/10.1080/00423119608969226>.
- Zuo, L., Scully, B., Shestani, J., Zhou, Y. (2010). Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions. *Smart Materials and Structures*, 19, 4. Doi: 10.1088/0964-1726/19/4/045003.
- Sapinski, B., Krupa, S. (2013). Efficiency improvement in a vibration power generator for a linear MR damper: numerical study. *Smart Materials and Structures*. 22, 4. Doi: 10.1088/0964-1726/22/4/045011.
- Zhang, Z., Zhang, X., Chen, W., Rasim, Y., Salman, W., Pan, H., Yuan, Y. & Wang, C. (2016). A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric

vehicle. *Applied Energy*, 178, 177-188. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.054>.

Ulukapı, M. (2005). *Aktif ve Yarı Aktif Süspansiyon Sistemlerinin Simülasyon Ortamında İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Khoshnoud, K., Sundar, D.B., Badi, M.N.M., Chen, K.Y., Calay, R.K. & Silva, C.W. (2013). Energy harvesting from suspension systems using regenerative force actuators. *Int. J. Vehicle Noise and Vibration*. 9, 294-311.

Eriksson, J., Piroti, S. (2016). *Review of Methods for Energy Harvesting from a Vehicle Suspension System*. (M.Sc. Thesis). Kandidatexamensarbete Med Inriktning Fordonsteknik, Stockholm.

Damodharan, P., Vasudevan, K. (2010). Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference. *IEEE Transactions On Energy Conversion*. 25, 661-668. Doi: 10.1109/TEC.2010.2041781.