

Bir Hidrolik Motor Takozunun Taguchi Yöntemi ile Deneysel Olarak İncelenmesi

Zeliha KAMIŞ KOCABIÇAK^{1*} 

Öz

Bu çalışmada hidrolik motor takoz kuvvetini etkileyen dört parametre ve bu parametrelerin her biri için iki seviye belirlenerek Taguchi L16 ortogonal dizisine göre deney tasarımı (DoE) oluşturulmuştur. Deney tasarımına göre montajı yapılan her bir takoz 0-30 Hz frekans aralığında ± 1.5 mm titreşim genliğinde test edilmiş ve bu testlerden elde edilen dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri kullanılarak her bir takoz için frekansa bağlı takoz kuvvet eğrileri elde edilmiştir. 0-30 Hz frekans aralığında ortaya çıkan titreşimler yol ve rölanti kaynaklı titreşimler olduğu için bu frekans aralığında kuvvetin mümkün olduğu kadar büyük olması istenir. Bu nedenle elde edilen kuvvet eğrilerinden her bir takoz kombinasyonu için en büyük kuvvet değeri belirlenmiş ve deney tasarımına eklenmiştir. S/N analizi uygulanarak en büyük kuvvet için deney tasarımındaki en uygun parametre kombinasyonu ve ANOVA analizi ile de parametrelerin etki yüzdeleri hesaplanmıştır. Sonrasında regresyon analizi ile parametrelere bağlı bir analitik denklem önerilmiştir. Bu denklem yardımı ile deney tasarımında bulunmayan kesit alanı daha büyük olan bir takoz için maksimum kuvvet hesaplanmış, hesaplanan kuvvet deney verilerinden elde edilen kuvvet ile karşılaştırılarak sonucun birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik motor takozu, Takoz kuvveti, Taguchi, ANOVA.

Experimental Investigation of a Hydraulic Engine Mount by Taguchi Method

Abstract

In this study, four parameters affecting the hydraulic engine mount force and two levels for each were determined, and a design of experiment (DoE) was created according to the Taguchi L16 orthogonal array. Each mount assembled according to the DoE was tested at a vibration amplitude of ± 1.5 mm in the frequency range of 0-30 Hz, and the dynamic stiffness and phase angle values obtained from these tests were used to obtain frequency-dependent mount force curves for each mount. Since the vibrations occurring in the frequency range of 0-30 Hz are road and idle induced vibrations, it is desired that the force is as large as possible in this frequency range. Therefore, the maximum force value for each mount combination was determined from the obtained force curves and added to the DoE. S/N analysis was applied, and the most suitable parameter combination in the DoE for the maximum force was obtained. The effect percentages of the parameters were calculated using ANOVA analysis. Then, an analytical equation, depending on the parameters, was proposed by regression analysis. With the equation, the maximum force was calculated for a mount with a larger cross-sectional area that was not included in the DoE, and the calculated force was compared with the force obtained from the experimental data, and it was determined that the results were close to each other.

Keywords: Hydraulic engine mount, Mount force, Taguchi, ANOVA.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, zkamis@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Taşıtlar sürüş sırasında yol ve motordan kaynaklanan titreşimlere maruz kalırlar. Taşıtlarda kullanılan motor takozları motoru şasiye sabitler, titreşimleri sönümleyerek gürültüyü azaltır, motor etrafındaki yapıları ve parçaları korur ve konforu artırır. Motor takozları genellikle kauçuk-metal birleşimi şeklindedir ve farklı motor tipleri ve uygulamaları için farklı tasarımlara sahiptir. Kullanım amacına ve sürüş konforuna göre motor takozları kauçuk, hidrolik, yarı aktif ve aktif takozlar olarak sınıflandırılabilir (Marzbani ve ark., 2014; Yu ve ark. 2001).

Hidrolik motor takozları, farklı frekanslarda ayarlanabilen sönümleme özellikleri sayesinde sürüş konforuna katkı sağladığı için taşıtlarda en yaygın kullanılan takoz türüdür. Kauçuk motor takozlarından farklı olarak, hidrolik motor takozlarında alt ve üstte bulunan iki odacık arasında hareket eden hidrolik akışkan yer alır (Şekil 1). İç kanal veya ayırıcı aracılığıyla odacıklar arasında hareket eden hidrolik akışkanın hareketine bağlı olarak farklı frekans aralıklarında farklı sönümleme özellikleri elde edilir (Marzbani ve ark., 2014; Shangguan ve Lu, 2004,). Hidrolik motor takozlarının tasarım yapısına göre kullanılan kauçuk yapısı, takozdaki akışkan hacmi, akışkanın geçtiği iç kanal kesit alanı ve ayırıcı özellikleri takozun sönümleme performansını etkiler. Bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda, aynı dış gövdeye sahip takozun çeşitli üretim alternatifleri olabilir. Hidrolik motor takozu için seçilecek parametre kombinasyonu deney tasarımı (DoE) ile incelenebilir. Hidrolik motor takozlarında yüksek genlikli titreşimlerin ($\pm 1-2$ mm) meydana geldiği düşük frekans aralığında (0-30 Hz) takoz kuvveti mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır (Marzbani ve ark., 2014; Yu ve ark. 2001; Kocabıçak ve Açar, 2024).

Hidrolik motor takozları üzerine literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar iki ana kategoriye ayrılır. Birinci kategori, doğrusal ve doğrusal olmayan model yaklaşımları kullanılarak düşük ve yüksek frekanslarda hidrolik motor takozlarının dinamik davranışının elde edilmesiyle ilgilidir (Christopherson ve Jazar, 2006; Zhang ve ark. 2009; Liu ve ark., 2021). İkinci kategori, hidrolik motor takozlarının araç sürüş konforu üzerindeki etkisinin araştırılması üzerinedir (Hung ve ark., 2021). Her iki kategori de tasarım, modelleme ve optimizasyon çalışmalarını içerir. Tasarım çalışmaları genellikle modelleme ve optimizasyon çalışmaları ile birlikte yürütülmüştür ve bu çalışmalarda ayırıcı (Christopherson ve ark., 2012; Fallahi ve ark. 2021) ve tasarım parametrelerine (Garmaroudi ve Mosayebi 2017) odaklanılmıştır. Aynı zamanda, bazı optimizasyon çalışmaları taşıt sürüş konforunu iyileştirmeyi (Rasekhipour ve Ohadi 2011), bazıları da takozun belirli frekanslardaki davranışını belirlemeyi (Christopherson ve Jazar, 2005; Ahn ve ark., 2005) amaçlamıştır. Hidrolik motor takozu için deney tasarımı (DoE) uygulaması literatürde mevcuttur (Cyril ve Manikandan, 2023; Kocabıçak ve Açar, 2024; Kocabıçak ve Açar, 2025). Taguchi tabanlı deney tasarımı (DoE) uygulamaları, özellikle son yıllarda farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Arslanoğlu ve

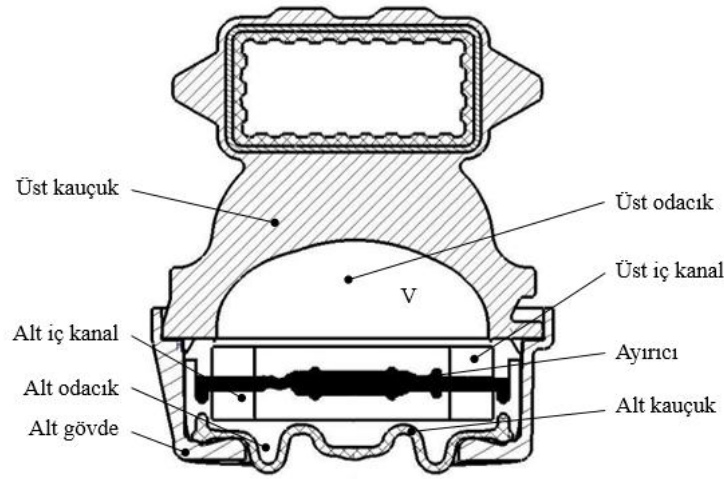
Yiğit, 2016; Kocabıçak ve Demir, 2020; Demir ve Kocabıçak, 2021; Turan ve ark., 2024). Kocabıçak ve Açar, 2024 dinamik direngenlik ve faz açısı değerlerini dikkate alarak en uygun parametreleri belirlemek amacıyla gri ilişki analizi ile birlikte Taguchi deney tasarımını (DoE) hidrolik motor takozlarında uygulamıştır. Ancak hidrolik motor takozları için yüksek takoz kuvveti elde etmek amacıyla deney tasarım uygulaması literatürde yer almamaktadır.

Bu çalışmada hidrolik motor takoz kuvvetini etkileyen iç kanal kesit alanı, kauçuk malzeme sertleşme katsayısı, ayırıcı sertliği ve akışkan hacmi tasarım parametresi olarak belirlenmiş. Aynı dış gövde için takozun üretilebilirliği de dikkate alınarak bu parametreler için iki seviye belirlenmiş ve dört parametre ve iki seviyeye göre Taguchi L16 ortogonal dizisine göre deney tasarımı oluşturulmuştur. Deney tasarımına göre montajı yapılan hidrolik motor takozları 0-30 Hz frekans aralığında ± 1.5 mm titreşim genliğinde test edilmiştir. Testlerden ölçülen dinamik direngenlik ve faz açısı değerlerine göre deneysel olarak belirlenen takoz kuvvetinin tepe değerleri deney tasarımında referans değer olarak belirlenmiştir. Deney tasarımında takoz kuvveti için “daha büyük-daha iyi” performans kriterine göre sinyal/gürültü (S/G) analizi yapılmış ve bu analize göre en uygun parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Sonrasında varyans analizi (ANOVA) ile her bir parametrenin takoz kuvvetine etki oranları tespit edilmiştir. Son bölümde regresyon analizi yapılarak takoz kuvveti için analitik bir denklem önerilmiş ve bu denklemin deney tasarımında bulunmayan farklı takoz için takoz kuvvetini doğru olarak hesapladığı gösterilmiştir.

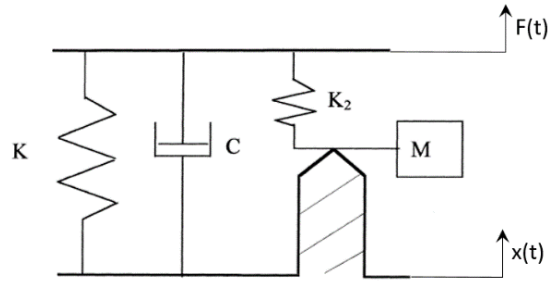
2. Hidrolik Motor Takoza

Hidrolik motor takozlarında kauçuk-metal yapıya ilave olarak hidrolik akışkan yer alır (Şekil 1) ve takozdaki akışkan hareketi nedeniyle farklı frekanslarda farklı sönümlenme özellikleri ortaya çıkar. Hidrolik akışkan takozun uyarılma genliğine bağlı olarak iç kanal yada ayırıcı üzerinden transfer edilir. Ayırıcı üzerinden olan akış daha düşük direnç kuvveti oluştururken, iç kanal üzerinden olan akış daha yüksek direnç kuvveti oluşturur. Bu nedenle hidrolik motor takozlarında düşük frekanslarda ortaya çıkan yüksek genlikli titreşimlerde iç kanal etkisi ile yüksek sönümlenme kuvveti elde edilirken, yüksek frekanslarda oluşan küçük genlikli titreşimlerde ayırıcı ile düşük sönümlenme kuvveti elde edilir. Hidrolik motor takozunun dinamik davranışı takozun yapısal parametrelerine bağlı olarak değişir (Yu ve ark., 2001).

Hidrolik motor takozu mekanik modeli Şekil 2’ de verilmiştir. Hidrolik motor takozlarında ortaya çıkan $x(t)$ yer değiştirmesine karşılık $F(t)$ takoz kuvveti elde edilir. Şekil 2’ den görüldüğü gibi kauçuk malzemenin sönüm, C ve yaylanma, K özelliğine ilave olarak takozun içerisindeki akışkan hareketini dikkate almak için akış yolundaki akışkan kütlesi, M ve kauçuk odacıklardaki hacimsel esnemeyi temsil eden elastomerik bir yay elemanı, K_2 fiziksel modele eklenmiştir (Yu ve ark., 2001).



Şekil 1. Hidrolik motor takozu (Kocabıçak ve Açar, 2024)



Şekil 2. Hidrolik motor takozu mekanik modeli (Yu ve ark., 2001)

Newton' un İkinci Hareket Yasası' na göre hidrolik motor takozuna uygulanan $x(t)$ girişine karşılık elde edilen takoz kuvveti aşağıdaki gibidir:

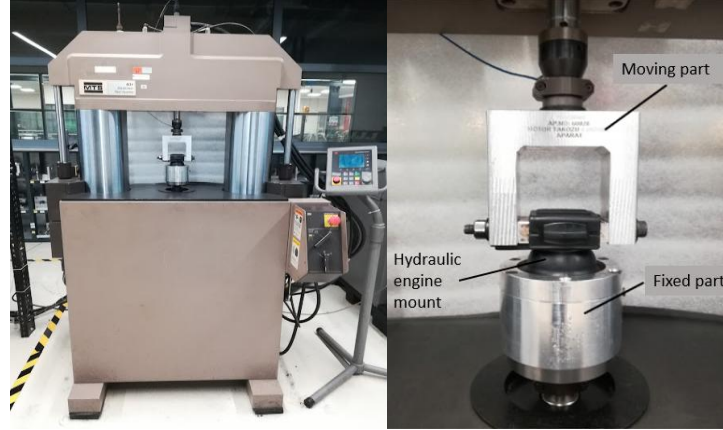
$$F(t) = K_r x(t) + C_r \dot{x}(t) \quad (1)$$

Burada K_r takozun dinamik direngenliği, C_r eşdeğer sönüm katsayısıdır.

Takozun titreşim sönümleme performansını analiz etmek için takozu sinüzoidal bir giriş uygulanarak frekans cevabı analizi yapılmalıdır ($x(t) = X \sin(\omega t)$). Frekans cevabı analizi için 1 nolu denklemin laplace dönüşümü alınıp $s=j\omega$ yerine yazılır. Sisteme sinüzoidal giriş uygulandıktan sonra sistem geçici durum hali ortadan kalkıp kalıcı durum haline ulaştığında belli bir genlik ve faz farkı ile yine sinüzoidal takoz kuvveti elde edilir.

$$F(j\omega) = K_r X(j\omega) + j\omega C_r X(j\omega) \quad (2)$$

Bu çalışmada Şekil 3’ teki 1000 Hz kapasiteli MTS 831.50 servohidrolik elastomer test cihazı kullanılmıştır. 0-30 Hz frekans aralığında, ± 1.5 mm titreşim genliğinde farklı tasarım kombinasyonundaki hidrolik takozlar test edilmiş ve takozların frekansa bağlı dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri elde edilmiştir (Kocabıçak ve Açar, 2025). Bu deneysel sonuçlardan takoz kuvvetleri hesaplanmış ve frekansa bağlı kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerden en büyük kuvvet değerleri belirlenerek deney tasarımında kullanılmıştır.



Şekil 3. MTS 831.50 servohidrolik elastomer test cihazı

3. Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi, ortogonal dizileri kullanan bir deneysel tasarım yöntemidir (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016; Kocabıçak ve Demir, 2020; Demir ve Kocabıçak, 2021; Turan ve ark., 2024; Kocabıçak ve Açar, 2024). Bu çalışmada Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan analiz çalışmaları ile 0-30 Hz frekans aralığında $\pm 1,5$ mm titreşim genliği için en büyük takoz kuvveti sağlayan en uygun parametre kombinasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla takozun sönüm özelliklerine etki eden iç kanal kesit alanı, A, kauçuk malzemenin dinamik sertleşme katsayısı, η , ayırıcı sertliği, HS_d , ve akışkan hacmi, V, olmak üzere dört farklı parametre ve her parametre için takoz bileşenlerinin üretilebilirliği dikkate alınarak iki farklı seviye belirlenmiştir (Tablo 1). Dört parametre ve iki seviye için Taguchi L16 ortogonal dizisine göre oluşturulan deney tasarımı Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 1. Hidrolik motor takozu tasarım parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2
İç kanal kesit alanı, A (mm ²)	37.5	66.5
Dinamik sertleşme katsayısı, η (-)	1.7	2.2
Ayırıcı sertliği, HS_d (shA)	50	58
Akışkan hacmi, V (mm ³)	22256	44512

Tablo 2. Taguchi L16 DoE ortogonal dizisi

Deney No	Parametre			
	A (mm ²)	η (-)	HS _d (shA)	V (mm ³)
1	37.5	1.7	50	22256
2	37.5	1.7	50	44512
3	37.5	1.7	58	22256
4	37.5	1.7	58	44512
5	37.5	2.2	50	22256
6	37.5	2.2	50	44512
7	37.5	2.2	58	22256
8	37.5	2.2	58	44512
9	66.5	1.7	50	22256
10	66.5	1.7	50	44512
11	66.5	1.7	58	22256
12	66.5	1.7	58	44512
13	66.5	2.2	50	22256
14	66.5	2.2	50	44512
15	66.5	2.2	58	22256
16	66.5	2.2	58	44512

Taguchi yönteminde, deneysel sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/G) çevrilerek analiz yapılır. S/G oranını analiz etmek için bir performans kriteri seçilir. “Daha küçük-daha iyi”, “daha büyük-daha iyi” ve “nominal-en iyi” olmak üzere üç tip parametre vardır (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016). Bu çalışmada, takoz kuvveti için “daha büyük-daha iyi” seçilmiş ve bu kriter için S/G oranı aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır:

$$S / G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

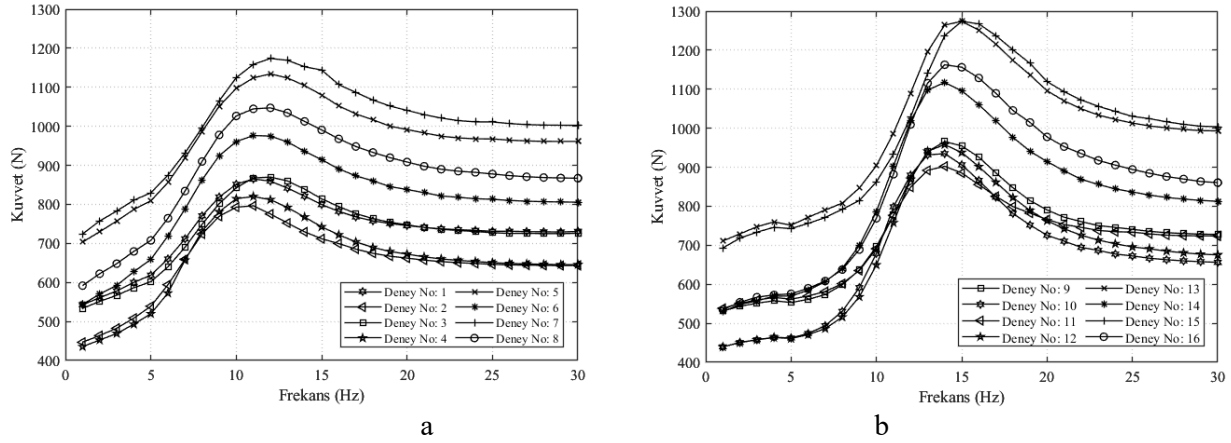
Burada y_i , i. deneydeki deneysel değer, n ise deney sayısıdır (n=16).

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Deneysel Sonuçlar

Hidrolik motor takozlarının Tablo 2’ de verilen deney tasarımına göre aynı dış gövde içerisinde montajı yapılmış ve MTS 831.50 servohidrolik elastomer test cihazı ile 0-30 Hz frekans aralığında, $\pm 1,5$ mm titreşim genliğinde test edilmiştir. Dinamik testlerde frekansa bağlı dinamik direngenlik ve faz açısı eğrileri elde edilmiştir (Kocabıçak ve Açar, 2024; Kocabıçak ve Açar, 2025). Bu çalışmada deneysel olarak ölçülen dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri kullanılarak Şekil 2’ de verilen hidrolik motor takozu mekanik modeline göre her bir deney kombinasyonu için eşdeğer sönümleme

ve yay katsayısı değerleri belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak frekansa bağlı takoz kuvveti eğrileri Şekil 4' teki gibi elde edilmiştir. Şekil 4' ten görüldüğü gibi takoz kuvveti eğrileri frekansla doğrusal olmayan biçimde değişmektedir. Yüksek frekans bölgesinde takozun maruz kaldığı küçük genlikli titreşimlerde elde edilen takoz kuvveti kauçuk malzeme özelliklerine bağlıdır ve frekansla doğrusal olarak değişmektedir (Kocabıçak, 2025).



Şekil 4. Deneysel verilerden hesaplanan takoz kuvvetleri (a: Deney no:1-8, b: Deney no: 9-16)

4.2. Sinyal/Gürültü (S/N) Analizi

Bu çalışmada Şekil 4' te verilen eğrilerinden her bir takoz kombinasyonu için hidrolik motor takoz kuvvetlerinin tepe değerleri (F_{max}) belirlenmiş ve bu değerlere göre deney tasarımının S/G analizi yapılmıştır. Kuvvet tepe değerleri ve hesaplanan S/G oranları Tablo 3' teki gibi elde edilmiştir.

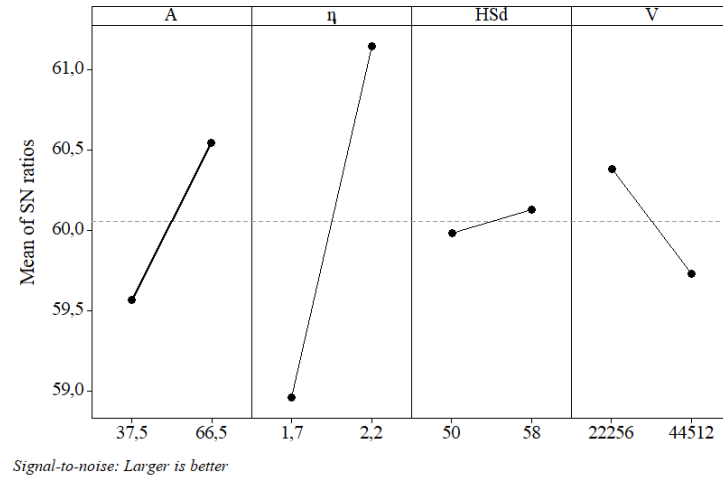
Tablo 3. Maksimum takoz kuvveti ve S/G oranları

Deney No	F_{max} (N)	S/G (dB)
1	865.10	58.7413
2	796.41	58.0227
3	869.85	58.7889
4	820.08	58.2771
5	1134.24	61.0941
6	976.36	59.7922
7	1173.85	61.3923
8	1047.33	60.4017
9	965.90	59.6986
10	934.93	59.4156
11	902.54	59.1093
12	957.91	59.6265
13	1274.11	62.1041
14	1116.98	60.9609
15	1274.06	62.1038
16	1162.79	61.3100

S/G oranlarının ortalama değerleri Şekil 5 ve Tablo 4'te verilmiştir. Parametre seviyelerinde en büyük S/G oranları optimum performansı sağlar (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016). Tablo 4' e göre optimum kombinasyon $A=66.5 \text{ mm}^2$, $\eta=2.2$, $HS_d=58 \text{ shA}$, $V=22256 \text{ mm}^3$ olduğunda elde edilmektedir. Parametrelerin önem sırası ise $\eta>A>V>HS_d$ ' dir. Şekil 5' ten görüldüğü gibi A, η ve HS_d ' yi artırmak takoz kuvvetini artırırken, V' yi artırmak takoz kuvvetini azaltmaktadır.

Table 4. S/G oranları

Seviye	A	η	HS_d	V
1	59.56	58.96	59.98	60.38
2	60.54	61.14	60.13	59.73
Fark	0.98	2.18	0.15	0.65
Sıralama	2	1	4	3



Şekil 5. S/G oranları

4.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi (ANOVA), her parametrenin istenen çıktılarına olan yüzdelik katkısını değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016). Bu çalışmada hidrolik motor takozu tasarım parametrelerinin takoz kuvvetini hangi oranda etkilediğini belirlemek amacıyla ANOVA uygulanmış ve analiz sonuçları Tablo 5' teki gibi elde edilmiştir. Analizin R-Sq değeri %93,98 olarak belirlenmiş olup, bu da sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 5' den görüldüğü gibi ANOVA sonuçları, dinamik sertleşme katsayısının, η , hidrolik motor takoz kuvveti üzerinde %72,25' lik bir katkı oranıyla en etkili parametre olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla hidrolik motor takozunda kullanılan kauçuk malzeme takoz kuvvetini büyük oranda etkilemektedir ve kritik öneme sahiptir. İç kanal kesit alanı, A, %14,15' lik bir katkı oranıyla ikinci, akışkan hacmi, V, %7,22 katkı oranıyla üçüncü etkili parametredir. Ayırıcı sertliğinin, HS_d

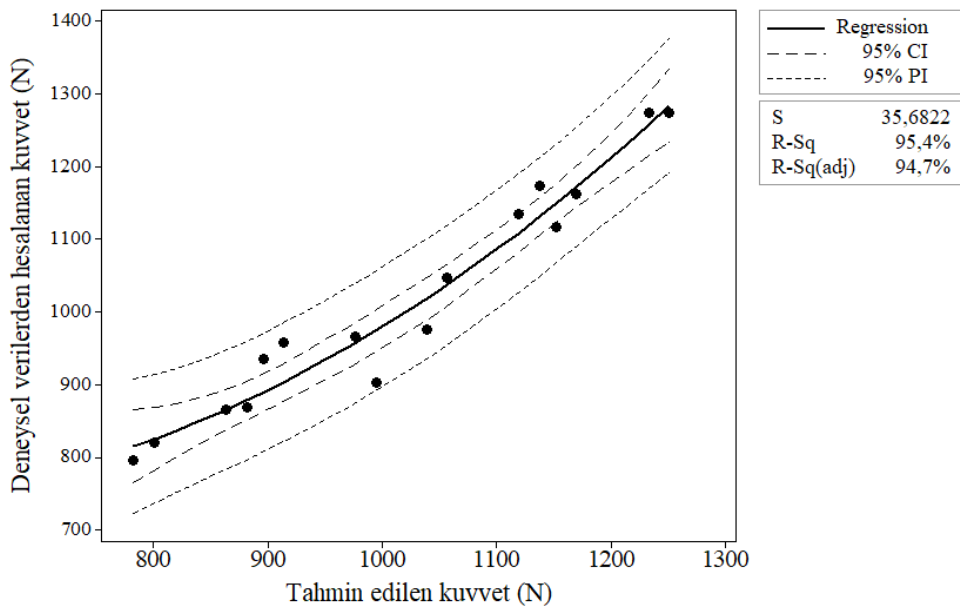
(%0.36) etkisi oldukça düşüktür. Sonuç olarak, hidrolik motor takoz kuvvetinin uygun kauçuk malzeme kullanarak, iç kanal boyutlandırmasını doğru yaparak ve uygun miktarda akışkan kullanarak artırılabilirliği tespit edilmiştir.

Table 5. ANOVA sonuçları

Kaynak	A	η	HS _d	V	Hata	Toplam
Serbestlik	1	1	1	1	11	15
Kareler	51302	261888	1303	26152	21813	362458
Katkı	14.15%	72.25%	0.36%	7.22%	6.02%	100.00%
Kareler ort.	51302	261888	1303	26152	1983	
F-Değer	25.87	132.06	0.66	13.19		
P-Değer	0.000	0.0000	0.435	0.004		

4.4. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri tahmin etmek için kullanılan bir modelleme ve analiz yöntemidir (Nas ve Özbek, 2020). Bu çalışmada, parametrelere bağlı olarak maksimum kuvveti veren bir analitik ifade elde etmek amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır. İlk olarak tahmin edilen takoz kuvveti ile deneysel olarak hesaplanan takoz kuvveti ikinci dereceden regresyon kullanılarak modellenmiştir (Şekil 6). Şekil 6' dan görüldüğü gibi, tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum bulunmaktadır. Örneğin, Deney No: 15'te, hesaplanan kuvvet 1274.06 N iken tahmin edilen kuvvet 1251.04 N' dur. Analizin R-Sq değeri %95.4 olarak belirlenmiştir ve bu da modelin güvenilir ve tahminde başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. İkinci dereceden regresyon modeli

İkinci dereceden regresyon modeline göre tasarım parametrelerine bağlı olarak (A , η , HS_d , V) elde edilen analitik denklem aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$F = -184 + 3.905 A + 511.7 \eta + 2.26 HS_d - 0.00363 V \quad (4)$$

Deney tasarımında bulunmayan daha büyük iç kanal kesit alanına sahip bir takoz için deneysel sonuçlardan hesaplanan takoz kuvveti ile analitik denklemden hesaplanan kuvvet değerleri Tablo 6’da verilmiş ve her iki kuvvetin oldukça yakın değerde olduğu tespit edilmiştir. Önerilen analitik denklemin deney tasarımında olmayan takoz kombinasyonları için de takoz kuvvetini hesaplamak amacıyla kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Tablo 6. Deney tasarımında yer almayan takozun kuvvet değerleri

Takoz Parametreleri	Deneyisel verilerden hesaplanan kuvvet	Analitik denklem ile hesaplanan kuvvet	% Hata
$A=79.5 \text{ mm}^2$ $\eta=2.2$ $HS_d=58 \text{ shA}$ $V=44512 \text{ mm}^3$	1225.3 N	1221.7 N	0.3

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada hidrolik motor takoz kuvvetini etkileyen dört farklı tasarım parametresi ve takozun üretilebilirliği göz önünde bulundurularak bu parametreler için iki farklı seviye belirlenmiştir. Dört parametre ve iki seviye için Taguchi L16 ortogonal dizisine göre deney tasarımı oluşturulmuştur. Aynı dış gövde içiğinde deney tasarımındaki on altı farklı kombinasyondaki takozun montajı yapılarak her biri $\pm 1.5 \text{ mm}$ titreşim genliğinde ve 0-30 Hz frekans aralığında test edilmiştir. Testlerde frekansa bağlı olarak elde edilen dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri kullanılarak takozun ürettiği kuvvet hesaplanmış ve her bir kombinasyon için frekansa bağlı kuvvet eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen kuvvetlerin tepe değerleri deney tasarımı için referans değer olarak belirlenmiştir. 0-30 Hz frekans aralığındaki titreşimler yol ve rölanti kaynaklı yüksek genlikli titreşimler olduğundan bu frekans aralığında takoz kuvvetinin mümkün olduğu kadar büyük olması istenir. Bu nedenle deney tasarımına göre kuvvetin tepe değerlerinin “daha büyük-daha iyi” performans kriterine göre S/G analizi yapılmıştır. Analiz sonucuna göre takoz parametreleri için $A=66,5 \text{ mm}^2$, $\eta=2,2$, $HS_d=58 \text{ shA}$, $V=22256 \text{ mm}^3$ optimum kombinasyon olarak belirlenmiştir. Parametrelerin önem sırası ise $\eta > A > V > HS_d$ olarak tespit edilmiştir. Sonrasında parametrelerin etki yüzdelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA sonucunda, kauçuğun kimyasal yapısına bağlı olan dinamik sertleşme katsayısı, η , %72.25’ lik katkı oranıyla en etkili

parametre olarak belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü etkili parametreler ise %14.15' lik katkı oranıyla iç kanal kesit alanı, A ve %7.22' lik katkı oranıyla akışkan hacmidir, V. Ayırıcı sertliği, HS_d, nin katkı oranı oldukça düşük olup %0.36' dır. Bir sonraki aşamada, regresyon analizi uygulanarak yaklaşık takoz kuvvetini hesaplayabilmek için tasarım parametrelerine bağlı analitik denklem önerilmiştir. Denklemin doğruluğunu göstermek için, deney tasarımında bulunmayan daha büyük iç kanal kesit alanına sahip bir takoz için formül yardımıyla hesaplanan kuvvet deneysel verilerden hesaplanan kuvvet ile karşılaştırılmış ve iki sonucun birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mevcut bir takoz için elde edilen deneysel verilerle yeni takoz kombinasyonları (örneğin, diğer malzeme, diğer alan vb.) için takoz kuvvetinin belirlenebileceği gösterilmiştir. Çalışma hidrolik motor takozunda elde edilen kuvvete bağlı olarak deney tasarımı uygulaması açısından yenilik sunmaktadır. İleriki çalışmalarda farklı takoz tipleri için de analizler genişletilerek deney yapmaksızın hidrolik motor takozu dinamik özelliklerinin belirlenmesi mümkün olabilir.

Teşekkür

Yazar, deneysel çalışmaların yürütüldüğü Bayrak Lastik A.Ş. firmasına katkılarından dolayı teşekkürlerini sunmaktadır.

Yazarların Katkısı

Çalışmanın tüm süreçleri yazar Zeliha Kamış Kocabıçak tarafından yürütülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bilinen herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Ahn, Y. K., Song, J. D., Yang, B., Ahn, K. K., ve Morishita, S., (2005). Optimal Design of Nonlinear Hydraulic Engine Mount. *Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int J)*, 19(3), 768-777. doi:10.1007/BF02916125
- Arslanoğlu, N., ve Yigit, A., (2016). Experimental investigation of radiation effect on human thermal comfort by Taguchi method. *Applied Thermal Engineering*, 92, 18-23. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.070

- Christopherson, J., ve Jazar, G. N., (2005). Optimization of classical hydraulic engine mounts based on RMS method. *Shock and Vibration*, 12(2), 119-147. doi:10.1155/2005/653945
- Christopherson, J., ve Jazar, G. N., (2006). Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 1: Mathematical analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 290 (3-5), 1040-1070. doi:10.1016/j.jsv.2005.05.008
- Christopherson, J., Manifalah, M., ve Jazar R.N., (2012). Suspended Decoupler: A New Design of Hydraulic Engine Mount. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 11. doi:10.1155/2012/826497
- Cyril, S., ve Manikandan, H., (2023). Optimization of engine and transmission mounting system for a V6 front wheel drive vehicle. *Materials Today Proceedings*, 72(4), 2564-2568. doi:10.1016/j.matpr.2022.10.028
- Demir, U., ve Kocacıçak, Z.K., (2021). Performance assessments of the material for the traction motor cores of an electric racing kart. *Materials Testing*, 63(6), 519-528. doi:10.1515/mt-2020-0085
- Fallahi, F., Shabani, R., Rezazadeh, G., ve Tariverdilo, S., (2021). A modified design for hydraulic engine mount to improve its vibrational performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 6724-6736. doi:10.1177/09544062211000081
- Garmaroudi M. A., ve Mosayebi, J., (2017). Design and Optimization of Engine Mount. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 5(4), 112-121. doi:10.15866/irecon.v5i4.13754
- Hung, T. T., Quynh, L. V., Ha, D. V., Huan, C. C., Cuong, B. V., ve Tan, H. A., (2021). A comparison of vehicle ride comfort performance of hydraulic engine mount system with rubber engine mount system. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(23), 2610-2619.
- Kocacıçak, Z.K., ve Demir, U., (2020). Design and optimization of an electromechanical actuator for the latch of a foldable vehicle seat. *Materials Testing*, 62(7), 749-755. doi: 10.3139/120.111539
- Kocacık, Z. K., ve Acar, Z., (2024). Taguchi-based grey relational analysis on multiple damping characteristics of a hydraulic engine mount. *Arabian Journal for Science and Engineering*, doi:10.1007/s13369-024-09510-8
- Kocacık, Z. K., ve Acar, Z., (2025). Optimal hydraulic engine mount parameters using design of experiment (DoE) and response surface methodology. *Materials Testing*, 67(4), 728-736. doi:10.1515/mt-2024-0422
- Kocacık, Z. K., (2025). Experimental investigation of a hydraulic engine mount by Taguchi method. *International of Simulation Modelling*, 24(2), 203-212. doi: 10.2507/IJSIMM24-2-710
- Liu, Y., Guan, X., Lu, P., ve Guo, R., (2021). Simulation research on dynamic characteristics of hydraulic mount. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(49), 1-9. doi:10.1186/s10033-021-00571-6
- Marzbani, H., Jazar, R. N., ve Fard, M., (2014). Hydraulic engine mounts: a survey. *Journal of Vibration and Control*, 20(10), 1439-1463. doi:10.1177/1077546312456724
- Nas, E., ve Özbek, N.A., (2020). Optimization the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools. *Surface Review and Letters*, 27(5), 1950177. doi:10.1142/S0218625X19501774
- Rasekhipour, Y., ve Ohadi, A., (2011). Optimization of hydraulic engine mounts through simplified and full vehicle models, *Proceedings of the World Congress on Engineering-WCE 2011*, London, U.K.
- Shangguan W., ve Lu, Z., (2004). Experimental study and simulation of a hydraulic engine mount with fully coupled fluid-structure interaction finite element analysis model, *Computers and Structures*, 82(22), 1751-1771. doi:10.1016/j.compstruc.2004.05.017
- Turan, M.K., Topçu, E.E., ve Karpat, F., (2024). Modelling and Investigation of a Driver Seat Suspension with Negative Stiffness Structure. *International Journal of Simulation Modelling*, 23(2), 275-286. doi:10.2507/IJSIMM23-2-684
- Yu, Y., Naganathan, N. G., ve Dukkipati, R. V., (2001). A literature review of automotive vehicle engine mounting systems. *Mechanism and Machine Theory*, 36(1), 123-142. doi:10.1016/S0094-114X(00)00023-9
- Zhang, Y., Shangguan, W., ve Fang, Z., (2009). Parameter identifications of the hydraulic mount. *International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)*, Xi'an, China. doi:10.1049/cp.2009.1452.