

## DEBRİYAJ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DİYAFRAM YAYLARDA FORMUN YORULMA DAYANIMI VE MEKANİK KARAKTERİSTİĞE OLAN ETKİSİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

*Samet KABACAOĞLU\**,\*\* 

*Mahmut PEKEDİS\*\*\** 

*Hasan YILDIZ\*\*\** 

Alınma: 20.05.2021; düzeltme:01.11.2021; kabul:16.11.2021

**Öz:** Kuru kavramalı debriyaj sistemlerinde yer alan debriyaj baskısının alt bileşeni olan diyafram yay formu, performans ve ömür parametreleri açısından büyük bir role sahiptir. Bu çalışmanın amacı, diyafram yay geometrik formunu ömür parametresi açısından optimize etmektir. Önce, diyafram yayı kuvvet-yer değiştirme ilişkisi deneysel, teorik ve sonlu elemanlar yaklaşımıyla incelenmiştir. Sonra mekanik özellikleri karakterize etmek için diyaframda kullanılan 50CrV4 malzemesine sahip numuneler için çekme ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler sonlu elemanlar yönteminde kullanılarak simülasyon ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmalarında diyafram yaya etki eden gerilme değerlerini düşürmek ve yorulma ömrünü arttırabilmek için deney tasarımı yöntemiyle 149 adet dizayn noktası oluşturulmuştur. Yanıt yüzeyi metoduyla optimum diyafram yay tasarımı belirlenmiş ve nihai tasarım belirlenen amaç optimizasyonu ile doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Debriyaj, Sonlu elemanlar yöntemi, Diyafram yayı, Yorulma, Optimizasyon

### Theoretical and Experimental Improvement of the Effect of the Diaphragm Springs Form Used in the Clutch System on the Fatigue Strength and Mechanical Characteristics

**Abstract:** Diaphragm spring which is a subcomponent of the clutch cover in dry clutch systems has an important role in performance and life parameters. The main aim of this study is to optimize the geometrical form of this diaphragm spring in terms of life parameter. Initially, the force-displacement relationship has been investigated using the experimental, theoretical and computational approaches. Then, tensile and fatigue tests have been performed for the 50CrV4 specimens used in diaphragm spring to characterize the mechanical properties. The characterized results have been used in the finite element method to perform simulation and optimization tasks. In order to reduce the stress values affecting the diaphragm spring and increase the fatigue life, 149 design points have been created with the design of experiment method. The optimum diaphragm spring design has been determined using the response surface method, and its ultimate design was verified by the specified goal optimization.

**Keywords:** Clutch, The finite element method, Diaphragm spring, Fatigue, Optimization.

\* Dönmez Debriyaj A.Ş, 10039 Sk. No:2 AOSB, 35620 Çiğli, İzmir, Türkiye

\*\* Lemförder Aks Modülleri A.Ş, 10003 sokak No: 13, AOSB, 35620 Çiğli, İzmir, Türkiye

\*\*\* Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova, 35100, İzmir, Türkiye  
İletişim Yazarı: Mahmut PEKEDİS (mahmut.pekedis@ege.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Debriyaj sistemi, motor ve şanzıman arasında yer alan mekanik bir sistem olup görevleri: *i)* araç hareket halindeyken vites değiştirmeye izin vermek, *ii)* aktarma organlarına tork aktarmak, *iii)* motordan gelen burulma titreşimlerini ve düzensizlikleri azaltarak sorunsuz bir çalışma sağlamak, *iv)* tork akışını düzenleyerek motor ve şanzıman çıkış hızlarını eşitlemek şeklindedir.

Trotea vd. (2020) tarafından yayınlanan çalışmada mekanik kavramaya sahip bir sistemde yer alan diyafram yayı, konik disk yayı ve mesnet lamaları ele alınmıştır. Diyafram yay tasarlandıktan sonra yapısal analizler uygulanmış ve 4 tasarım değişkenli optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon ile debriyaj sisteminin ayırma miktarının iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Umesh ve Sahu (2020) tarafından standart bir belleville yayının yüksekliği iki katına çıkarılarak analizler yapılmıştır. Sonuçlar literatürde yer alan diğer çalışmalar ile kıyaslanmış ve bunların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra kuvvet-yer değiştirme eğrileri analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bir başka çalışmada üretim sürecinden kaynaklanan artık gerilmeleri belirlemek ve yorulma tahmini için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Krishnasamy vd. (2017)). Bunun yanında yorulma performansının bir çok üretim yönteminden etkilendiğinden bahsedilmiştir.

Simeonov vd. (2017) tarafından kuru kavramalı bir debriyaj sisteminde diyafram yay üzerinde oluşan gerilmeler Almen-Laszlo ifadeleriyle teorik olarak elde edilmiştir. Daha sonra diyafram yayda ortaya çıkan gerilme dağılımı simülasyon programı vasıtasıyla bulunmuştur. Aynı zamanda diyafram yayın bir parmağı üzerine şekil değiştirme sensörleri bağlanarak birim şekil değişimleri ölçülmüştür ve çıkan sonuçlar diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarının fiziki ölçümlerle uyumlu olduğu ancak bazı durumlarda sapmaların olduğu belirtilmiştir. Sapmanın nedeni sonlu elemanlar yönteminde uygulanan eleman sayısı, malzeme modeli ve üretim sırasında değişken faktörlerin analize dahil edilememesi gibi bir çok faktörden kaynaklanabileceği şeklinde vurgulanmıştır.

Rupnar vd. (2016), çalışmalarında debriyaj sisteminin genel çalışma prensibinden bahsedilmiş ve buna yönelik bazı simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Bu simülasyon çalışmalarında debriyaj sisteminin ayırma esnasında ihtiyaç duyduğu yük belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarla tasarımın güvenli olup olmadığı hakkında çıkarımlarda bulunulmuş ve teorik hesaplamalarla da karşılaştırılmıştır.

Ozansoy (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada debriyaj sistemi dinamik olarak ele alınmıştır. Ayrıca bu sisteme çift kütleli volan da dahil edilmiştir. Debriyaj sistemi ve çift kütleli volanın sistemde meydana getirdiği burulma titreşimleri incelenmiş ve buna ek olarak eksenel titreşimler prosese dahil edilmiştir. Daha sonraki bölümlerde ise bu titreşimlerin sönümlenmesi için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Titreşime sebep olan fiziksel durumlar matematiksel olarak modeli hazırlanmış ve bu modele ait titreşim denklemleri oluşturulmuştur. Elde edilen optimum tasarım verileri için fiziksel olarak parça üretilip araç üstünde denenmiş ve titreşimin büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

Doman vd. (2003) tarafından otomotiv sektöründe kullanılan debriyaj sisteminde yer alan diyafram yayın bilyalı dövme operasyonundan dolayı üzerinde artık gerilmelerin olduğu bahsedilmiştir. Bu operasyonun kuvvet-şekil değiştirme eğrisine olan etkisi incelenmiş ve bu eğriyi nasıl etkilediği gösterilmiştir. Diyafram yayın hem geometrik hem de malzeme olarak lineer olmayan davranış sergilemesi de göz önüne alınarak analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda eğrinin tutarlılığı gözlemlenmiş ve operasyon varlığının bu eğriye olan etkisi belirtilmiştir.

Nam vd. (2000) çalışmalarında diyafram yayın servis ortamında çok yüksek yüklere maruz kaldığından bahsedilmiştir. Bunun yanında diyafram yayın karakteristiği sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş ve hangi parametrenin ne kadar hassasiyet gösterdiği belirlenmiştir.

Bu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan debriyaj sistemlerinde yer alan diyafram yayın formu ile ilgili optimizasyon çalışmaları ele alınmıştır. Önceki çalışmalardan farklı olarak geometrik tasarımda bir kaç parametreye değinmek yerine, tüm tasarım parametrik modellenerek optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve duyarlılık analizleriyle her parametrenin tasarım kriterlerine olan etkileri belirlenmiştir. Çalışmanın akışı şu şekildedir. Önce diyafram yayının üretimi/karakteristikliği ve buna ilişkin kuvvet testinden bahsedilir. Sonra mekanik testlerde ve sayısal analizlerde izlenilen teknikler açıklanır. Bir sonraki aşamada simülasyon ve testlerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılır. En sonunda diyafram yay formuna yönelik optimizasyonun uygulanması sonucu elde edilen en uygun parametreler değerlendirilir.

## 2. MATERYAL VE METODLAR

### 2.1. Diyafram Yay Üretimi

Bu çalışma kapsamında kullanılan diyafram yayları Dönmez Debriyaj bünyesinde üretilmiştir. Bunlara ilişkin üretim süreçleri kısaca şu şekildedir. Öncelikle pres tezgahında belirli bir kalınlıkta tedarik edilen 50CrV4 malzemeye sahip levhaların dış çapı kesilir. Ayrıca oluşan çemberin merkezinde de bir figür oluşturulur. Sonra pres tezgahına slot kesme ve yarma operasyonu için farklı kalıp ve pul kesme operasyonunu tamamlamış diyafram yay yerleştirilir ve operasyon başlatılır. Diyafram yayın slot pencere formu ve parmaklar arası mesafeler bu operasyonla ortaya çıkarılır. Sonra iç çap kesme operasyonları uygulanır. Bu aşamada diyafram yayın iç çapını nihai ölçüye getirmek amacıyla pres tezgahıyla gerekli kalıp ve aparatlar bağlanarak iç çap kesme operasyonu başlatılır. En sonunda ısıl işlemler uygulanarak nihai üretimi tamamlanır (Şekil 1).



a.



b.

**Şekil 1:**

*Diyafram yay üretim süreçleri a. İç çap kesme operasyonu sonrası parça b. Isıl işlem ve kumlama operasyonu sonrası diyafram yay yüzey görüntüsü*

### 2.2. Diyafram Yay Karakteristikliği

Debriyaj rulmanıyla bağlantılı olarak çalışan diyafram yayı kendine has karakteristiği ile baskı plakası ve volan arasında çalışan diskin boşa çıkmasını dolayısıyla ayırmayı sağlar. Bu yayların avantajı, düşük yer değiştirmeyle yüksek kuvvet üretilebilmesidir.

Deplasmana karşılık gelen kuvvet değerleri aşağıda verilen bağıntıyla teorik olarak hesaplanmaktadır (Schnorr, 2003).



### 2.3. Diyafram Yay Kuvveti Testi

Üretilen diyafram yaylar, ısıl işlem operasyonu sonrası performans ölçümü için kuvvet testine tâbi tutulur. Bu testte diyafram yayın debriyaj baskısına montajlıymış gibi ayırma durumu test edilir. Ölçüm tezgahında kullanılan aparatlar her diyafram yaya özel olarak seçilir. Seçilen diyafram yayın çekmeli tip debriyaja ait olması ve tezgahın sadece bası yönünde çalışmasından dolayı, diyafram yay tezgaha ters şekilde konulur ve ölçüm başlatılır. Diyafram yay düz konuma gelene kadar üst hareketli plaka ile belirli bir deplasmanda yük uygulanıp kuvvet-yer değiştirme verileri alınır (Şekil 3).



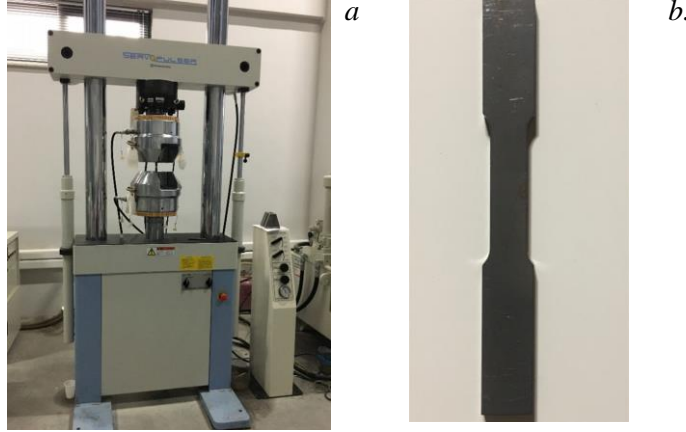
**Şekil 3:**

*Zwick Roell 50kN Basma Test Cihazı (Dönmez Debriyaj, 2011)*

### 2.4. Diyafram Yay Malzemesinin Mekanik Karakterizasyonu

#### 2.4.1. Çekme Testi

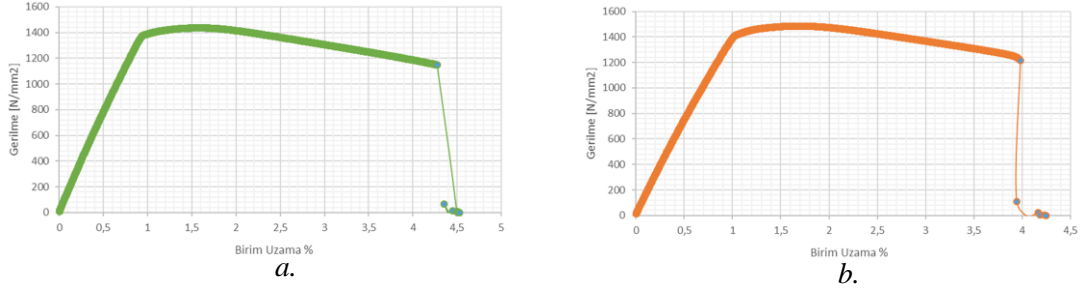
Kullanılacak olan 50CrV4 malzemenin mekanik özelliklerine literatürde sıklıkla rastlanabilmektedir. Ancak üretilen bu diyafram yaylarda ısıl işlem prosedürleri uygulanmaktadır. Uygulanan ısıl işlem operasyonları sebebiyle malzemenin mekanik özellikleri de değişmektedir. Bu özelliklerin tam tayini için levha olarak tedarik edilen 50CrV4 malzemesine diyafram yayla aynı ısıl işlem prosedürleri uygulanmıştır ve daha sonra çekme numunesi oluşturmak için levha kesilmiştir. Levha kesilirken numunenin dış kontüründe aşırı ısınmadan dolayı malzeme iç yapısı değişiklik gösterebileceğinden dolayı, levha kesme işlemi hem lazer kesim tezgahı ile hem de tel erezyon tezgahında gerçekleştirilmiş ve ikişer adet olmak üzere toplam 4 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Testler TS EN ISO 6892-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan bir çekme testi numunesi örneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4:**

*Çekme testi a. Çekme test düzeneği b. Hazırlanan çekme testi numunesi örneği*

Yapılan testler sonucunda 4 farklı numune için de akma gerilmesi, maksimum çekme gerilmesi, kopma gerilmesi ve elastisite modülü gibi simülasyon için gerekli olan mekanik özellikler belirlenmiştir (Kabacaoğlu, 2021). Elde edilen grafikler tel erozyon tezgahı ve lazer kesim tezgahı ile hazırlanan numuneler arasında bariz bir fark oluşmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 5). Bu sebeple iki yöntemle de hazırlanan numuneler kullanılabilir olarak kabul edilmiştir. Yapılan dört adet çekme testinden elde edilen mekanik özellikler Tablo 1’de belirtilmiştir.



**Şekil 5:**

*Çekme testi sonuçları a. Tel erozyon numunesi b. Lazer kesim numunesi*

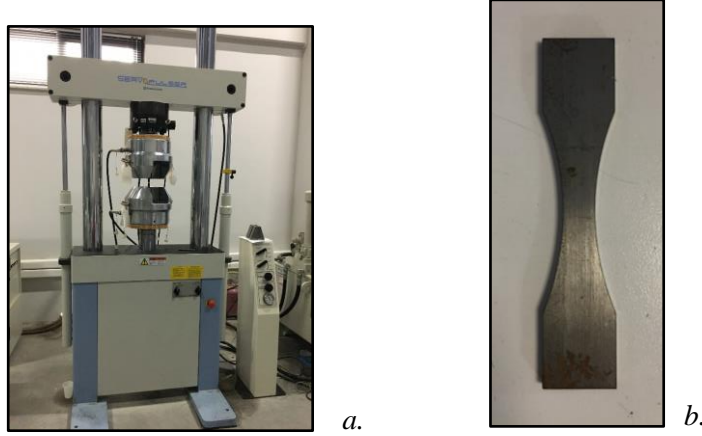
**Tablo 1. Çekme testi sonucu elde edilen mekanik özellikler**

Numune adı	Akma Gerilmesi (Mpa)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)
1 - Tel Erozyon	1403,1	1435,7	1147,6
2 - Tel Erozyon	1442,9	1474,4	1204,5
3 - Lazer Kesim	1446,4	1484,8	1213,6
4 - Lazer Kesim	1421,1	1459,4	1183,9

#### 2.4.2. Yorulma Testi

Yorulma testleri ASTM E466-15 standardına göre, 12 adet numune için gerçekleştirilmiştir. Kullanılan numune malzemesi olan 50CrV4, levha şeklinde olduğu için standartta yer alan silindirik numuneler için gerekli kalınlıkta tedarik edilememektedir. Bu sebeple kalınlık-kesit oranını yakalamak için ASTM E466-15 standardında yer alan devamlı radyüs formu numuneler şeklinde hazırlanmıştır (Şekil 6).





**Şekil 6:**

*Yorulma testi a. Yorulma test düzeneği b. Hazırlanan numune örneği*

Yüklemeye olarak tek ekseninde sadece çeki gerilmesi şeklinde tekrarlı yük uygulanmıştır. Yorulma testinden önce yapılan çekme testlerinden elde edilen akma gerilmesinin yüksek yüzdeleriyle başlayıp, daha sonra her numune için farklı bir akma gerilmesi yüzdesi alınarak gerilme değerleri düşürülmüş ve tekrarlı yük olarak uygulanmıştır. Bu numuneler için sonsuz ömür sınırı  $1,5 \times 10^6$  olarak belirlenmiş ve yüklemeye frekansı 1 ile 5 Hz arasında seçilmiştir. Yüklemeye frekansının düşük seçilmesinin sebebi numunelerin makine çenelerinden sıyrılmalarını engellemektir. Yorulma testlerinin sonucunda S-N eğrisi elde edilmiştir.

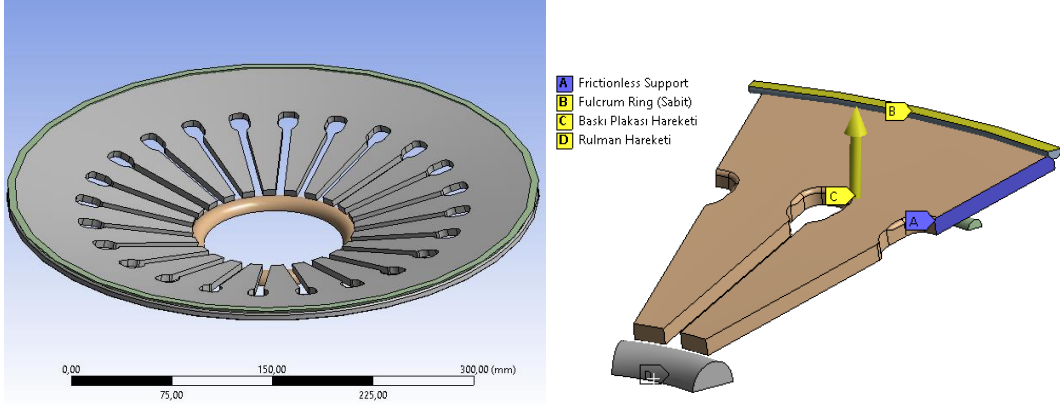
### 2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Diyafram yayın mekanik özellikleri belirlendikten sonra, Unigraphics NX 9.0 programı ile modellenen diyafram yayın kuvvet, gerilme ve yorulma analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir. Çözümlenmelerde Ansys Workbench 19 paketi kullanılmıştır. Mekanik karakterizasyon sonucu elde edilen veriler malzeme girdileri olarak analizlerde kullanılmıştır.

Debriyaj baskısı modellendikten sonra analiz süresini kısaltmak amacıyla modelde sadeleştirilmeler yapılmıştır. Kullanılan diyafram yay 24 adet dilimden oluşmaktadır. Her dilim birbiriyle aynı ölçülerdedir ve aynı radyal eksen etrafında  $15^\circ$  açıyla oluşturulmuştur. Bu sebeple model sadeleştirilerek 1:12 hale getirilmiştir (Şekil 7).

Yüklemeye ve sınır şartları belirlenirken sistemin çalışma mantığı göz önünde bulundurulmuştur. Debriyaj baskısının alt bileşeni olan kafes, volana civatalar yardımıyla sabitlendiği için, üzerinde bulunan fulcrum ring mesnet noktası da sabit olacaktır. Bu sebeple Şekil 7b'de verilen B noktasındaki mesnetin hareketi sabitlenmiştir.

İlk adımda baskı kuvveti ölçülürken, baskı plakasının altına sıkı disk kalınlığı kadar kalınlık yerleştirilir ve debriyaj baskısı volana sabitlenir. Sıkı disk yerleştirildiğinde baskı plakası, mesnet noktasından diyafram yayı iter ve konumunu yatay hale getirir. Bu pozisyonda baskı kuvveti ölçülmektedir. Bu sebeple C noktasında baskı plakası görevi gören noktasal mesnete diyafram yayını düz hale getirecek kadar 7,2 mm deplasman hareketi verilir. İkinci adımda ise rulman kuvveti ölçmek için debriyaj baskısı, debriyaj diskiyle birlikte volan üzerine sabitlenip kurulduktan sonra, aracın debriyaj pedal stroke mesafesi kadar rulman hareketi verilmektedir ve ayırma meydana gelmektedir. İlk adımda düz konuma gelen diyafram yayın parmak uçlarından rulman hareketi verilir ve rulman kuvveti okunur. Bu sebeple D mesnetine diyafram yay düz konuma geldikten sonra 12 mm hareket verilmiştir. Diyafram yay simetrik bir parça olduğu için kesilen bölgelerine “sürtünmesiz destek (frictionless support)” tanımlanarak tam model hareketi sağlanmıştır.



**Şekil 7:**

*Debriyaj baskı modeli a. Sadeleştirilmiş b. 1:12 oranında kesilmiş (Harfler sınır koşullarını göstermektedir.)*

Başlangıçta model 3905 piramit elemanla örülüp analiz koşturulduğunda elde edilen maksimum asal gerilme değeri 1144.35 MPa dır. Aynı şekilde model sırasıyla 4005 ile 4103 adet elemanla örüldüğünde asal gerilmeler 1139.6 MPa ile 1137.2 MPa şeklinde görülmüştür. Maksimum asal gerilmedeki değişimin özellikle 4100 elemandan sonra çok az olduğu ve dolayısıyla yakınsamanın olduğu görülmüştür. Nihai model 4103 adet üç boyutlu piramit (quadratic tetrahedral) eleman ve 8347 adet düğüm sayısından oluşmaktadır. Yorulma analizinde gerilme ömür tabanlı teknik kullanılmıştır. Gerilme değerleri maksimum asal gerilmeler açısından değerlendirilmiştir. Parça için sonsuz ömür sınırı 106 çevrim olarak kabul edilmiştir.

## 2.6. Optimizasyon

Doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Atalan, 2020).

Girdi parametreleri;

$$x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (7)$$

olup n değişken adetini ifade etmektedir.

Optimizasyon yapılırken tasarım uzayında sınır koşulları belirlenmesi gerekmektedir. Sınır koşulları;

$$g_i(x) = 0; i = 1, 2, 3, \dots, j \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Amaç fonksiyonu ise sınır koşulları dahilinde belirlenen değişkenler göz önüne alınarak tasarımda ulaşılması istenen noktadır.

Amaç fonksiyonu;

$$\text{Maksimum/Minimum} = f(x) = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \quad (9)$$

şeklinde belirtilebilir (Karataş, 2019). Optimizasyon için ilk olarak girdi ve yanıt parametreleri belirlenir. Daha sonra deney tasarımı (Design of experiment [DOE]) yöntemiyle girdilere karşılık gelen çıktı varyasyonları saptanır ve örnek tasarım noktaları belirlenir. Daha sonra bu dizayn noktaları ile bir dizayn eğrisi oluşturulur. Her ne kadar yapılan yapısal analizler sonucunda maksimum asal gerilme değerinin malzemenin akma gerilmesinin altında olduğu gözlemlenmiş olsa bile, yorulma ömrünü artırmak için optimizasyon yapılması gereği duyulmuştur.



Burada amaç diyafram yayın üzerindeki gerilmeleri minimuma indirgeyip parçanın ömrünü uzatmaktır.

### 2.6.1. Deneysel Tasarım

Deneysel tasarımı (DT, design of experiment [DOE]) yönteminin amacı, hangi girdi faktörlerinin veya parametrelerinin sürecin çıktısı üzerinde ne derecede önemli bir etkiye sahip olacağı ve istenen çıktı sonucunu elde etmek için bu girdilerin ne kadarının kullanılması gerektiğidir. Deneysel tasarımı ve analizi, farklı değişkenlerin diğer değişkenler üzerindeki etkilerinin belirlenmesine dayanır (Alanbay, 2015). DT üretimin amacı, girdi faktörleri veya parametreler aralığını belirli bir modele göre minimum değerden maksimum değere kadar uniform olarak farklı değerlere bölmektir. Bu değerlere tasarım noktaları adı verilir. Oluşturulan tasarım noktalarının sayısı ne kadar büyükse, çözüm süreci o kadar uzun ve hesaplama maliyeti o kadar yüksek olacaktır. Fakat diğer yandan da, optimizasyon sürecinin doğruluğunu artırabilir.

Çalışmada DT için optimum boşluk doldurma tasarım modeli uygulanmıştır. Optimum boşluk doldurma tasarım modeli, her girdi parametresini birkaç parçaya böler. Bu tasarım modeli, örnek noktalarının sayısına göre bölünmüştür ve bu örnek noktaların değerleri farklı türleri içerir. Ayrıca, her modeldeki girdi parametrelerinin veya değişkenlerinin sayısı bölünmüş noktaların sayısını belirler. Bu tasarım modelinde, tasarım noktalarını tasarım alanı içinde eşit olarak dağıtabilir ve modelin amacı, en az sayıda tasarım noktası kullanarak maksimum sonuç elde etmektir. Tasarım noktalarının tasarım alanı içerisine yerleştirilmesi heterojendir, bu da diğer modelden farklı olarak tasarım noktalarının köşelere veya orta noktalara yerleştirilmesine gerek olmadığı anlamına gelir.

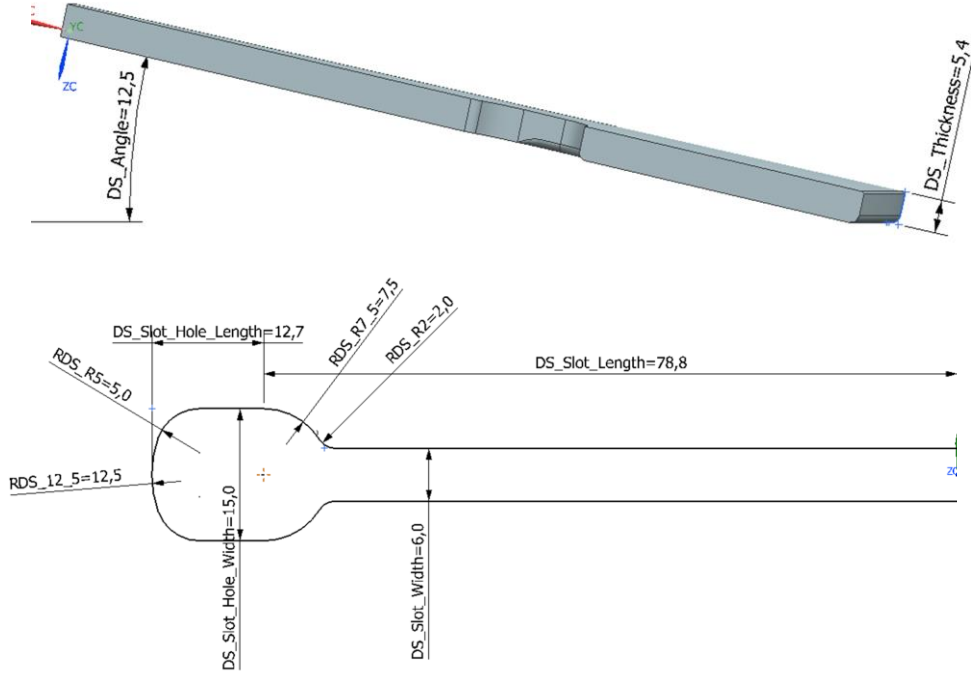
Deneysel tasarımı yöntemi olarak bu çalışmada optimum boşluk doldurma yöntemi kullanılarak örneklemelerin orta yada köşe noktalarda yoğunlaşması engellenerek heterojen bir dağılım sağlanmış ve 149 tasarım noktası oluşturulmuştur.

### 2.6.2. Sınır Koşulları

Sınır koşulları belirlenirken diyafram yayın çalışma koşulları göz önüne alınmıştır ve kavrama performansının değişmemesi için baskı kuvveti değerinin 29000 ile 35000 N arasında olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca rulman kuvveti artar ise konfor açısından sorun yaratacağı bilinmektedir. Bu sebeple rulman kuvveti için de maksimum ve minimum değer aralığı belirlenmiştir. Rulman kuvveti ise çalışabileceği sınırlar aralığında olacak şekilde (2500 ile 4500 N arası) seçilmiştir.

### 2.6.3. Girdi Parametreleri

Diyafram yay slot formu, kalınlık ve açı gibi değişkenler girdi olarak tanımlanmıştır (Şekil 8). Bunun için diyafram yayı Unigraphics 9 programı ile parametrik olarak modellenmiştir. Girdilerin alt ve üst değerleri belirlenirken üretilebilirlik ve malzeme tedariki gibi konular göz önünde bulundurulmuştur. Tablo 2’de girdi parametrelerine ait nominal, alt ve üst değerler yer almaktadır. Deneysel tasarımı yöntemi olarak bu çalışmada optimum boşluk doldurma yöntemi kullanılmıştır. Örneklemelerin orta yada köşe noktalarda yoğunlaşması engellenmiş ve 149 tasarım noktası oluşturulmuştur.



**Şekil 8:**  
Girdi parametreleri

**Tablo 2. Girdi parametreleri**

Parametre	Değer (mm)	Alt Limit (mm)	Üst Limit (mm)
P1 - DS_Slot_Width	6	5	7
P2 - DS_R7_5	7,5	5	9
P3 - DS_Slot_Hole_Length	12,7	10	16
P4 - DS_Slot_Length	78,8	65	90
P5 - DS_Thickness	5,4	5	5,7
P6 - DS_12_5	12,5	10	14
P7 - DS_Slot_Hole_Width	15	12	18
P8 - DS_Angle	12,5	11	14
P9 - DS_R2	2	1	3
P10 - DS_R5	5	3	7

#### 2.6.4. Amaç Fonksiyonu

Bu optimizasyon çalışmasında diyafram yayın çalıştığı koşullar göz önüne alınarak tasarım ömrünün artırılması hedeflenmiştir. Bu sebeple maksimum asal gerilmelerinin minimize edilmesi ve buna bağlı olarak da emniyet katsayısının maksimize edilmesi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

#### 2.6.5. Yanıt Yüzey Metodu

Yanıt yüzeyi metodunun (YYM) amacı, önceden belirlenmiş tasarım noktaları için sayısal analizlere dayalı bir dizi deney gerçekleştirmek ve tasarım alanı üzerinde ölçülen niceliği belirlemektir. YYM oluşturmanın nedeni optimum bir yanıt veren girdi parametreleri kümesini tahmin edebilmektir (Lopez-Tapia, 2019). Diğer bir deyişle, yanıt yüzeyleri, o noktada tam bir

çözüm süreci gerçekleştirilmeden, analiz edilen tasarım uzayındaki herhangi bir noktada istenen değişkenin veya çıktı parametresinin yaklaşık değerlerini elde edebilir.

Amaç fonksiyonu yada yanıt yüzeyi değişkeni  $r$  ve  $p_i$  girdi parametrelerinin bilinmeyenli fonksiyonudur. Yanıt yüzeyi  $\hat{r}$  ise bunun yaklaşık değeridir.  $\epsilon(p_i)$  yaklaşık hatayı belirtir.

$$r = f(p_i) = \hat{f}(p_i) + \epsilon(p_i) \Rightarrow \hat{r} = \hat{f}(p_i) \quad (10)$$

DT sonuçları, tahmini bir yanıt yüzeyi oluşturmak için kullanılır. Ansys Design Exploration programında yanıt yüzey oluşturmak için parametrik olmayan Kriging metodu kullanılmıştır. Kriging metodu, tasarım noktalarına en yakın noktalardan aldığı verileri kullanarak diğer noktalardaki verilerin optimum değerlerini tahmin eden bir yöntemdir. Eğer çıktı parametrelerinde yüksek nonlinearite mevcutsa, standart bir yanıt yüzeyi yönteminden daha iyi bir yakınsama sonucu vermektedir.

Yanıt yüzeyi oluşturulduktan sonra, oluşturulan yüzeyin kalitesinin kontrol edilmesi gereklidir. Yüzeyin kalitesi Tablo 3'te verilen kriterlere göre belirlenmiştir. Oluşturulan yanıt yüzeyi cevabında ölçütlerin en iyi değere yakın olması beklenir.

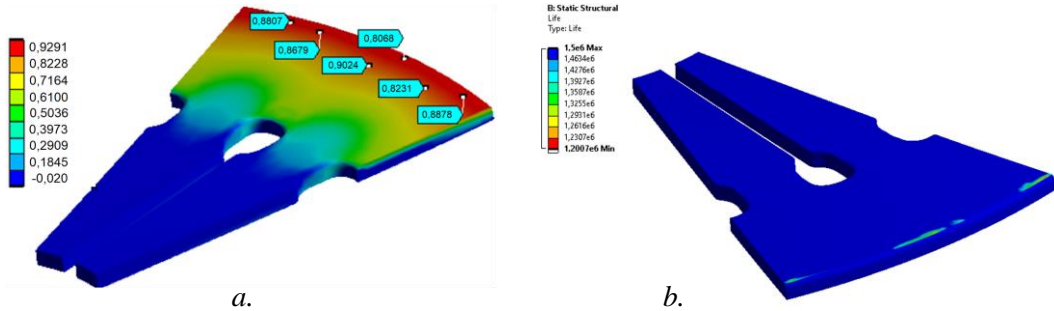
**Tablo 3. Yanıt yüzeyi kalite ölçütleri**

En İyi Değer	Kalite Ölçütü
1	Determinasyon katsayısı
0%	Ortalama karesel hata
0%	Bağıl maksimum mutlak hata

### 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

#### 3.1. Analiz Sonuçları

Debriyaj sisteminde kullanılan diyafram yaylar yüksek kuvvetler altında çalıştığından dolayı yüksek gerilmelere maruz kalırlar. Bu sebeple malzeme olarak yüksek dayanımlı yay çeliğinden imal edilirler. Gerçekçi simülasyonlar elde etmek için 50CrV4 malzemesi için çekme ve yorulma testleri uygulanmış ve elde edilen veriler analizlerde girdi olarak kullanılmıştır. Diyafram yay üzerindeki maksimum asal gerilmelerin dış çapa yakın bölgede olduğu gözlemlenmiştir. Malzemenin akma gerilmesi 1428 MPa'dır. Analiz sonucundan elde edilen maksimum asal gerilme değeri 1327.2 MPa olup akma gerilmesinin altında olduğu görülmüştür. Bu gerilmeler akma gerilmesine göre normalize edilip dağılımları Şekil 9a'da verilmiştir. Görüldüğü üzere normalize edilmiş maksimum asal gerilme değerleri (NEMAG) 1'den düşük olduğundan parçanın hasara uğramadığı anlaşılır. Bunun yanında yorulma ömrü açısından değerlendirildiğinde parçanın  $1,2 \times 10^6$  çevrime kadar dayandığı gözlemlenmiştir (Şekil 9b).

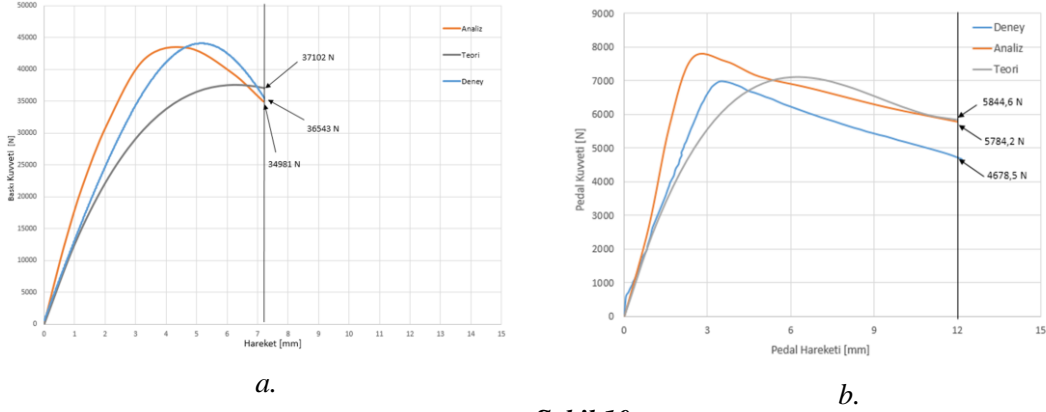


**Şekil 9:**

Analiz sonuçları **a.** NEMAG dağılımı **b.** Yorulma çevrim dağılımı

### 3.2. Deneysel, Teorik ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan testler sonucunda ölçülen baskı kuvveti- yer değiştirme eğrisi, teorik ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Diyafram yayın düz konuma geldiği 7,2 mm, pedal kuvvet için ise 12 mm yer değiştirme (stroke) göz önüne alınarak baskı kuvveti bulunmuştur. Veriler incelendiğinde fiziki test sonuçları, yapısal analiz sonuçları ve teorik hesaplamaların birbirlerine yakın oldukları görülmüştür (Şekil 10). Yapılan fiziki testlerin teorik hesaplamalar ve analiz sonuçlarıyla ufak farklılık göstermesinin sebebi, sistemin tamamının test edilmesi ve diğer faktörlerin (debriyaj sac kafesinin ölçüm esnasında esnemesi, tolerans yığılmaları, vb.) eğri üzerinde değişikliğe sebep olmasıdır.



Şekil 10:

Analiz, teori ve deney sonucu grafikleri a. Baskı kuvveti-hareket b. Pedal kuvveti- hareket

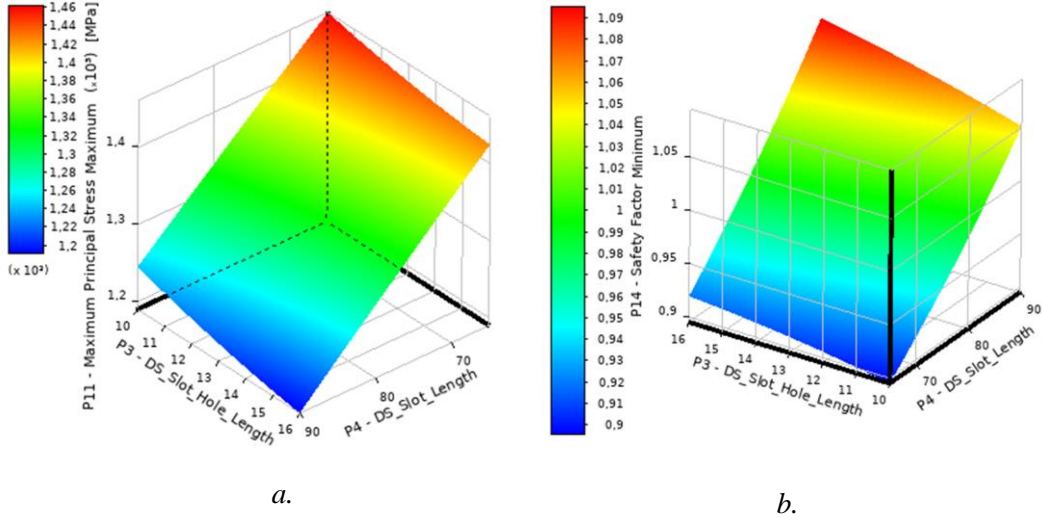
### 3.3. Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon sürecinde başta yüzeyin kalitesi kontrol edilmiştir. Tablo 4'te verildiği üzere ölçüt değerlerinin uygun olduğu görülmüştür. Bunun yanında oluşturulan yanıt yüzeyinde hangi girdi parametresinin amaç fonksiyonları üzerinde ne kadar etkisi olduğunu incelemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır ve bu analiz sonucunda slot uzunluğu, slot konumu, kalınlık ve açının amaç fonksiyonunu diğer girdi parametrelerine göre yüzde olarak daha çok etkilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 4. Yanıt yüzeyi kalite değerleri

Kalite Ölçütü	Maksimum Çeki Gerilmesi	Rulman Kuvveti	Baskı Kuvveti	Yorulma Emniyet Katsayısı
Determinasyon katsayısı	1	1	1	1
Ortalama karesel hata	$1,2603 \times 10^{-6}$	$5,341 \times 10^{-6}$	$5,8119 \times 10^{-6}$	$8,386 \times 10^{-10}$
Bağlı maksimum mutlak hata	0	0	0	0

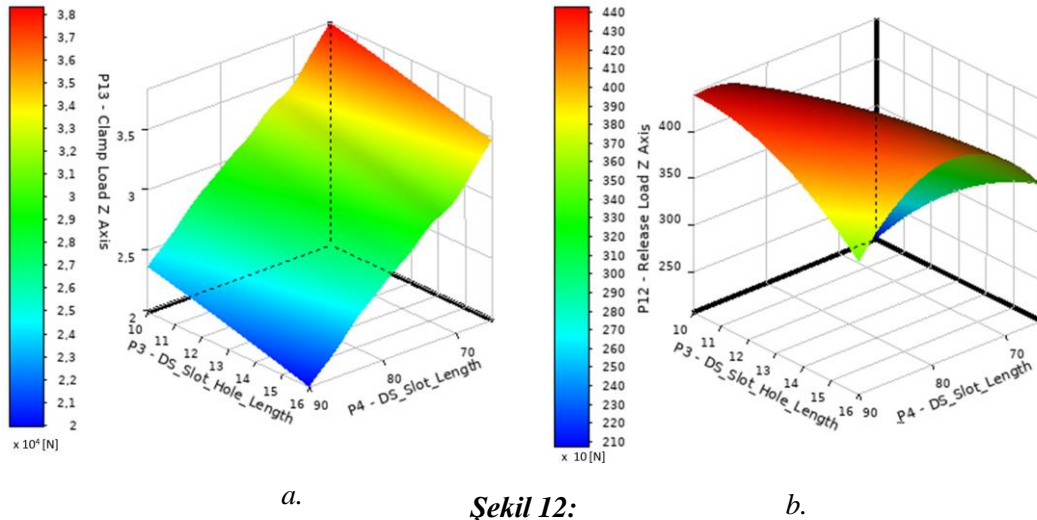
Amaç fonksiyonlarını en çok etkileyen girdi parametrelerin yanıt yüzeyleri 3 boyutlu olarak incelenmiştir. Şekil 11 incelendiğinde slot konumu ve slot uzunluğunun maksimum asal gerilme ve yorulma emniyet katsayısına olan etkisi gözlemlenmektedir. Diyafram slotun uzunluğu yay merkezine yaklaştıkça maksimum asal gerilme ve yorulma emniyet katsayısında artış gerçekleşir.



Şekil 11:

Slot mesafesi ve delik genişliğinin a. maksimum asal gerilmesi ve b. yorulma emniyet katsayısına olan etkisinin yüzey yanıt metoduyla gösterimi

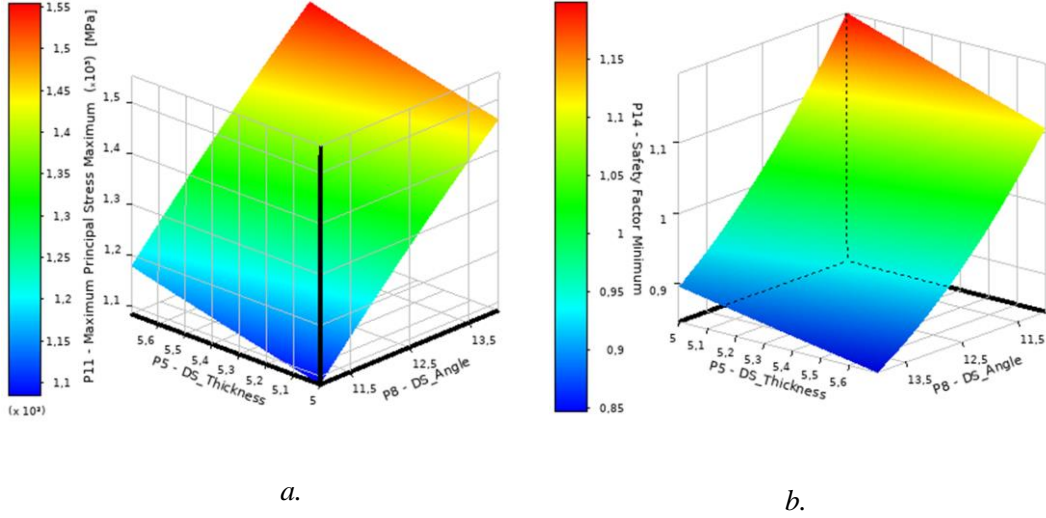
Şekil 12'de slot konumu ve slot uzunluğunun baskı kuvveti ve rulman kuvvetine olan etkisi verilmiştir. Slot konumu diyafram yay merkezine yaklaştıkça (mesafe azaldıkça) ve slot uzunluğu azaldıkça baskı kuvveti artış göstermektedir. Slot uzunluğu azaldıkça rulman kuvveti artış göstermekte, fakat slot konumu diyafram yay merkezinden uzaklaştıkça rulman kuvveti artış yada azalış göstermektedir.



Şekil 12:

Slot mesafesi ve delik genişliğinin maksimum a. baskı kuvveti b. rulman kuvvetine olan etkisinin yüzey yanıt metoduyla gösterimi

Şekil 13 kalınlık ve diyafram yay açısının maksimum asal gerilmesi ve yorulma emniyet katsayısına olan etkisini gösterir. Kalınlık ve açı arttıkça maksimum asal gerilmesinde artış emniyet katsayısında ise azalış olmaktadır.



**Şekil 13:**  
Kalınlık ve açının a. maksimum asal gerilmesi b. yorulma emniyet katsayısı olan etkisinin yüzey yanıt metoduyla üç boyutlu gösterimi

Yanıt yüzey yöntemi ile elde edilen dizayn eğrileri doğrultusunda amaçlanan koşullara göre “Hedefe dayalı optimizasyon (Goal Driven Optimization)” yaklaşımıyla dizayn için belirlenen sınırlar ve hedefler dahilinde dizayn değişkenlerinin optimum duruma göre değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada tasarım noktalarından “Aday tasarım 1” tasarım parametreleri tercih edilmiştir (Tablo 5). Bunun sebebi ise kalınlık parametresinin 5,5126 mm olarak önerilmesi ve malzeme olarak kolay tedarik edilebilen 5,5 mm kalınlığa yakın bir değer olmasındandır. Ayrıca diğer amaç fonksiyonları da iyileşmiş durumdadır.

**Tablo 5. Baskı ve rulman kuvveti değerleri**

Parametre	Aday tasarım 1	Aday tasarım 2	Aday tasarım 3
P1 - DS_Slot_Width (mm)	5,7722	5,7678	5,1797
P2 - DS_R7_5 (mm)	7,7063	8,5793	6,2246
P3 - DS_Slot_Hole_Length (mm)	10,333	14,854	10,276
P4 - DS_Slot_Length (mm)	73,855	74,153	72,214
P5 - DS_Thickness (mm)	5,5126	5,4734	5,4905
P6 - DS_12_5 (mm)	10,166	13,849	12,637
P7 - DS_Slot_Hole_Width (mm)	15,146	14,173	14,006
P8 - DS_Angle (mm)	11,12	11,353	11,199
P9 - DS_R2 (mm)	1,5511	2,9429	1,0043
P10 - DS_R5 (mm)	3,7689	6,368	4,6082
Maksimum Asal Gerilmesi (MPa)	1209,1	1217	1217,6
Rulman Kuvveti (N)	4476.7	4461.8	4687.8
Baskı Kuvveti (N)	28883	28998	29051
Yorulma Emniyet Katsayısı	1,0778	1,0751	1,0685



#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan debriyaj sistemlerinde yer alan diyafram yayla ilgili optimizasyon çalışmaları ele alınmıştır. Optimizasyon çalışmalarında amaç, parçanın yorulma ömrünün uzatılması ve mekanik karakteristiğinin iyileştirilmesidir. Bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmalara ek olarak yorulma deneyleri de yapılmıştır. Tasarımda bir kaç parametreye değinmek yerine, neredeyse tüm tasarım parametrik modellenerek optimizasyon çalışması yapılmış ve duyarlılık analizleriyle hangi parametrenin tasarım kriterlerinde nasıl rol oynadığı saptanmıştır.

Optimizasyon çalışmaları esnasında parçanın kendisinden beklenen mekanik özelliklerini karşılayabilmesi, üretilebilir olması, hammadde temininin kolaylığı ve maliyet açısından rekabet edebilmesi gibi kriterler göz önüne alınarak tasarım sınırları belirlenmiştir. Bu çalışmada deney tasarımı yöntemlerinin kullanılması, herhangi bir maliyet kaybı yaşanmadan ürünün iyileştirilmesi açısından önemlidir.

Kullanılan malzeme ısıl işleme tabi tutulduğu için mekanik özellikleri, literatürde bulunan malzemelere göre değişiklik göstermektedir. Bu sebeple, ilgili malzemenin numuneleri üretilmiş, daha sonra laboratuvar koşulları altında çekme ve yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilen ışığında bilgisayar destekli analiz çalışmaları yapılmıştır. Yapısal analiz çalışmaları için diyafram yay Siemens Unigraphics 9 programında parametrik olarak modellenmiş ve ürünün mukavemet değerleri ve karakteristiği elde edilmiştir. Aynı zamanda bu parametreler deney tasarımı yönteminde girdi parametreleri olarak belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda diyafram yay mekanik ömründe iyileştirmeler sağlanmıştır. Tablo 6'da mevcut tasarım ve optimizasyon sonrası tasarıma ait mekanik özelliklerdeki değer ve değişim miktarları belirtilmiştir.

**Tablo 6. Optimizasyon sonrası diyafram yay mekanik özelliklerindeki değişimler**

Parametre	Mevcut Değer	Optimum Tasarım Değeri	Değişim (%)
Maksimum asal gerilme (MPa)	1327,2	1217,6	8,32
Yorulma emniyet katsayısı	0,986	1,068	7,67
Baskı kuvveti (N)	34981	34861	0,34
Rulman kuvveti (N)	5784	5625	2,82

Elde edilen sonuçlara göre diyafram yayın işlevselliğinde etkili olan baskı kuvveti değerinin sabit tutulması hedeflenmiştir. Ayrıca yorulma ömründe etkisi olan maksimum asal gerilmede %8,32 düşüş gerçekleşmiş ve bu da dolaylı olarak yorulma emniyet katsayısının %7,67 miktarda artmasını sağlamıştır. Optimizasyon çalışması sonrası yeni tasarıma ait diyafram yayın boyutsal ölçüleri Tablo 7'te belirtilmiştir. Seçilen tasarım noktasına göre üretilebilirliği de göz önüne alınarak optimum değerler en yakın ondalıklı sayıya yuvarlama yapılarak belirtilmiştir.

Bu çalışmaya ek olarak, daha sonraki adımlarda optimizasyon sonuçlarına göre belirlenen tasarım üretilip dinamik yükleme koşulları altında dayanımı incelenebilir. Bunun yanında tüm debriyaj sisteminin bileşenleri ele alınıp diyafram yayın diğer parçalarla etkileşimi inceleyen farklı bir çalışma da ele alınabilir.

**Tablo 7. Optimizasyon sonrası diyafram yay mekanik özelliklerindeki değişimler**

Parametre	Mevcut Değer (mm)	Optimum Değer (mm)
P1 - DS_Slot_Width	6	5,8
P2 - DS_R7_5	7,5	7,7
P3 - DS_Slot_Hole_Length	12,7	10,3
P4 - DS_Slot_Length	78,8	73,8
P5 - DS_Thickness	5,4	5,5
P6 - DS_12_5	12,5	10,1
P7 - DS_Slot_Hole_Width	15	15,1
P8 - DS_Angle	12,5	11,1
P9 - DS_R2	2	1,5
P10 - DS_R5	5	3,8

### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

### YAZAR KATKISI

Samet Kabacaoğlu, Mahmut Pekedis, Hasan Yıldız, çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi/yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesinde katkı sağlamıştır. Samet Kabacaoğlu ayrıca veri toplama aşamasında katkı sağlamıştır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu tüm yazarlar üstlenmektedir.

### TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmanın gerçekleştirilmesinde sağladıkları destekten dolayı Dönmez Debriyaj Anonim Şirketine teşekkür eder.

### KAYNAKLAR

1. Alanbay, B. (2015). Aero-structural design and analysis of a joined-wing kit, *M.Sc. Thesis*, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
2. ASTM E466-15 (2015). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken.
3. Atalan, AY. (2020) Developing optimization models for wind energy using design of experiment, *Ph.D. Thesis*, Marmara University, Institute for Graduate Studies in Pure And Applied Sciences, İstanbul.
4. Doman, Y., Fujii, T., Okubo, K. and He, H. (2003) Influence of residual stress on the load–deflection curve of diaphragm springs for automobile clutches, *JSAE Review*, 24(2), 197-203. doi:10.1016/S0389-4304(02)00299-0
5. Dönmez Debriyaj, 2011, *Debr-i Alem Dergisi*, 17, İzmir.

6. Kabacaoğlu, S. (2021). Debriyaj sistemlerinde kullanılan diyafram yaylarda formun yorulma dayanımı ve mekanik karakteristiğe olan etkisinin teorik ve deneysel olarak iyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
7. Karataş, A. (2019). Katlanmış çelik plağın Ansys programı ile geometrik bakımın lineer ve lineer olmayan optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
8. Krishnasamy, K., Masse, F. and Simon, O. (2018) Fatigue analysis of diaphragm spring in double dry clutch including manufacturing process, *Procedia Engineering*, 213, 606–612. doi:10.1016/j.proeng.2018.02.056.
9. Lopez-Tapia, AC. (2019) Optimization of the geometry of domestic gas burner injectors by using the design exploration process, *M.Sc Thesis*, University of Cantabria, Faculty of Science.
10. Nam, W., Lee, C., Chai, Y.S. and Kwon, J. (2000) Finite element analysis and optimal design of automobile clutch diaphragm spring, *Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*, Korea.
11. Ozansoy, O. (2015). Multi-objective optimization of dynamic behaviour of automotive clutch system and power transmission, *Ph.D. Thesis*, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
12. Rupnar, A., Babar, A., Karale, A. and Gundawar S. (2016) Design and analysis of diaphragm spring of a single plate dry clutch, *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2 (12): 26-30.
13. Schnorr, C. (2003) *Handbook for Disc Springs*, Schnorr Corp., Michigan, USA.
14. Simeonov S., Simonovski P., Avramovski N., Mirakovski, D., Milev, S. and Cekerovska, M., (2017), Finite element analysis of stress of vehicles friction clutch diaphragm, 14th *International Congress Machines Technologies. Materials*, Bulgaria, 358-362.
15. Trotea, M., Constantinescu, A. and Simniceanu, L. (2020) Analytical calculation, numerical structural analysis and design optimization of the diaphragm spring of a mechanical clutch, *Applied Mechanics and Materials*, 896, 151-162. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.896.151.
16. Umesh, P. and Sahu P.K., 2020, Analysis and designing of diaphragm spring washers, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(2):1842-1852.

