

## Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu

Abdulkadir YAŞAR<sup>1,a</sup>, Yasin AYGÜL<sup>1,b</sup>, Kerimcan ÇELEBİ<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ceyhan/Adana

<sup>a</sup>ORCID: 0000-0002-1548-2386; <sup>b</sup>ORCID: 0009-0008-7064-676X; <sup>c</sup>ORCID: 0000-0001-6294-0872

### Makale Bilgileri

Geliş : 12.11.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605975

### Sorumlu Yazar

Abdulkadir YAŞAR

ayasar@cu.edu.tr

### Anahtar Kelimeler

Sonlu elemanlar analizi

Optimizasyon

Fanlar

Kaplinler

Gerilmeler

**Atf şekli:** YAŞAR, A., AYGÜL, Y., ÇELEBİ, K., (2024). Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 939-950.

### ÖZ

Kapasite bakımından yüksek debi ihtiyacı gerektiren fanlarda, yüksek motor gücünü fan mekanizmasına iletmek için emniyetli aktarma organlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Torsiyonel Rijit Fan Kaplinler çevre koşulları, sınır şartları ve servis ihtiyaçları açısından gerekli özellikleri sağlayan aktarma organlarıdır. Bu çalışmada, bir kaplin üzerinde analiz ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Taguchi parametre tasarım yöntemine göre; İki farklı konik ölçüsü, hammadde kalitesi, keskin köşe radyüsü ve iç çap ölçüleri parametre olarak belirlenmiştir. Montaj sırasında yağlama işlemi, iyi ve kötü duruma etki eden sürtünme katsayısını etkilemektedir. Sekiz farklı geçme toleransında flanş elemanı için sonlu elemanlar analizi yapılarak en büyük, en iyi yaklaşıma göre optimum emniyet katsayısı belirlenmiştir. Aktarma organının nominal tork değerini iletmesi için mekanik hesaplanan hassas alıştırma ölçüleri ile optimum daralma sonucu doğrulanmıştır. Optimize edilen flanş tasarımı, maksimum motor torkunda sonlu elemanlar analizi ile uygun emniyet katsayısında olduğu hesaplanmıştır. Elde edilen veriler çalışmanın sonuç kısmında yorumlanmıştır.

## Design and Optimization of Torsional Rigid Fan Couplings

### Article Info

Received : 12.11.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605975

### Corresponding Author

Abdulkadir YAŞAR

ayasar@cu.edu.tr

### Keywords

Finite element analysis

Optimization

Fans

Couplings

Stress

**How to cite:** YAŞAR, A., AYGÜL, Y., ÇELEBİ, K., (2024). Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin Tasarlanması ve Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 939-950.

### ABSTRACT

In fans that require high flow rates in terms of capacity, safe transmission organs are required to transmit high motor power to the fan mechanism. Torsional Rigid Fan Couplings are transmission components that provide the necessary features in terms of environmental conditions, boundary conditions and service needs. In this study, analysis and optimization studies were implemented on a coupling. According to Taguchi parameter design method; two different taper sizes, raw material quality, sharp corner radius and inner diameter dimensions were determined as parameters. Lubrication during assembly affects the coefficient of friction, which affects both good and bad conditions. Finite element analysis was performed for the flange element with eight different fitting tolerances and the optimum safety coefficient was determined according to the biggest, best approach. The optimum contraction result has been verified with precise running-in measurements calculated mechanically to ensure that the drivetrain transmits the nominal torque value. The data obtained were commented in the conclusion part of the study.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde sanayi kolunda faaliyet gösteren tüm alanlarda mekanik güç aktarımı oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Herhangi bir güç üreten tahrik üzerinden dönüş hareketini fonksiyon elamana güvenli ve şartlara uygun olarak aktaran ekipmanlara verilen genel isim kaplin olarak tanımlanmaktadır. Yüksek Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri ise yüksek hız, yüksek moment, paralel kaçıklık, aksel kaçıklık, paralel ve aksel kaçıklığın bir arada bulunduğu ve de geometrik kısıtlamaların olduğu yerlerde rahatlıkla kullanılmasından dolayı kendisine geniş kullanım alanları bulmaktadır. Rotordaki kaçıklık, dönerek çalışan makinalarda titreşim sorunlarına sebep olan en büyük etmendir. Kaçıklığın olduğu yerlerde rulmanlarda aşınma, millerde deformasyonlar görülmektedir. Kaçıklığa sebep olan birçok durumu gerçek bir sistemde rotorun deformasyonu, üretim ve montaj hataları, yatakların aynı eksende olmaması v.b. şeklinde örnekleyebiliriz. Yüksek Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri; aksel kaçıklık bulunan motor ve fan kanat sistemi arasında daha büyük momenti ve yüklemeyi rahatlıkla aktarabilmektedir [1].

Hava akışının ihtiyaç duyulduğu tüm endüstriyel alanlarda cebri çekme fanları (ID) ve taze hava fanları (FD) kullanılmaktadır [2]. Termik Santraller ve Doğal Gaz Çevrim Santralleri yüksek debide (500-600 m<sup>3</sup>/s) hava akış sistemlerinin en çok ihtiyaç duyduğu enerji tesislerindedir. Kapasite bakımından yüksek debi ihtiyacı gerektiren uygulamalarda sistem yüksek güç ve emniyetli aktarma organları gerekmektedir. Sistemi çalıştırmak için yüksek mekanik güç sağlayan elektrik motoru (1000-2500 kW) dönme hareketini fan kanat mekanizmasına aktarmak için iletim elamanı olan Yüksek Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerine ihtiyaç duymaktadır. Kaplinler çevre koşulları, sınır şartları ve servis ihtiyaçları açısından gerekli özellikleri sağlamalıdır. Kaplinler, tasarım aşamasında dikkatli davranılmadığında monte edildiği makinanın sık durmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek debili ID, FD Fanların kullanıldığı endüstriyel alanlarda Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin mekanik ve geometrik özelliklerinin incelenmesi ve Taguchi yöntemi vasıtasıyla uygun geçme toleransının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için tasarımları tamamlanan modeller, Ansys Workbench 2020 R2 programında Sonlu Elemanlar Analizine (SEA) tabi tutulmuştur [3].

Bir deneysel tasarım metodu olan Taguchi metodu, kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçmektedir. Bu suretle, ürün ve prosesteki değişkenlik en aza indirilmeye çalışılmaktadır [4]. Bu metod sayesinde ürünlerin kalitesinin iyileşmesinin yanı sıra, kalite geliştirmede daha az deneme sayısı ile daha doğru sonuç alma imkânını vermektedir [4,5]. Bu yöntemde, kontrol edilebilen faktörler esas alınırken kontrol edilemeyen faktörlere karşı da avantaj sağlanmaktadır [6]. Esas olarak kesirli faktöriyel tasarım yöntemi olan Taguchi metodunda faktörler için tüm birleşimlerinin denenmesi maliyet artışı ve zaman kaybına neden olacağından faktörlerin birleşimlerinin küçük bir kesri alınıp, ortogonal dizi adı verilen özel tablolar kullanılır [7]. Ortogonal diziler, deneysel tasarım çalışmalarında kullanılmak amacıyla oluşturulmuştur [8].

Ansys paket programı gibi arka planında sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanan bilgisayar destekli mühendislik programları, tasarlanan ürünün yapısal açıdan güvenli olup olmadığını değerlendirmek için kullanılmaktadır [9-15]. SEA kullanılarak tasarlanan ürünün her noktasına gelen mekanik zorlamalar tespit edilerek yapısal bütünlüğü incelenebilir [16]. Her tasarım senaryosu için yapılarda farklı zorlamalar oluşmaktadır. Taguchi metodu bu zorlamalara göre optimum tasarım elde etmek amacıyla kullanılabilir. Bu metodun kullanılması ile belirli parametrelere göre hazırlanan tasarımlar için SEA sonuçlarına göre en uygun parametre optimizasyonu sağlanabilmektedir [17].

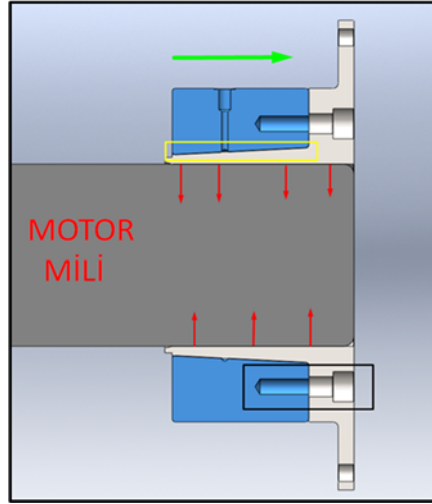
Torsiyonel Rijit Fan Kaplinler, sıkma somunu ve flanş olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Sıkma somunu AISI 4140 kalite çelik ve flanş S355 kalite malzemenin imal edilmektedir. Buradaki kalite seçimi, sıkma somun malzemesinin sert, sıkılan flanş malzemesinin daha az sertlikte olması gerektiğini belirlemektedir. Konik düzlemde alıştırma işlemi flanş üzerinde gerilmeler oluşturacaktır. Bu gerilmeler S355 kalite flanş açısından akma dayanım emniyetine göre güvenli alanda kalması gerekmektedir. Çalışma sonucunda; İki farklı konik ölçüsü, hammadde kalitesi, köşe noktalarındaki yuvarlama ve iç çap faktörleri belirlenerek sekiz farklı geçme toleransında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu veriler Taguchi tolerans tasarım yaklaşımına göre optimize edilip en uygun değer belirlenmiştir. Bulunan optimum veri kullanılarak nihai ürün için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Aktarma organının nominal tork değerini iletmesi için

hassas alıştırma ölçüleri, mekanik olarak optimizasyon veri sonucu ile hesaplanıp doğrulama gerçekleştirilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Pres geçmelerde, mil ve göbek geçme yüzeyleri arasındaki sürtünme etkisi ile moment ve hareket iletimi sağlanmaktadır. Parçaların birbiri üzerinde kaymamaları için ilaveten kama kullanılmamaktadır. Kama kullanılması ek bir emniyet oluşturmaktadır. Kamalı birleştirmelerde ısıtma ve pres gücü gereken etmenlerde olduğu için bu işlemlerin çalışma ortamlarına uyumu da dikkate alınmalıdır. Kama kullanılmadığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Sıkı geçme uygulamalarında delik bir miktar büyümekte, mil ise bir miktar küçülmektedir. Temas yüzeyleri arasında bir basınç ve sürtünmeye bağlı olarak hareket iletimi; şekil değişiminin elastik sınırlar içerisinde kalması durumunda mümkün olmaktadır. Sürtünme kuvvetinin bağlantının aksel yönde zorlanması ile bağlantının radyal yönde zorlanması ile de moment iletimi gerçekleşmektedir [18].

Çalışılmakta olan sistem, milin geniş toleranslarda montajı sonrası baskı oluşturarak geçme toleransına plastik deformasyonla geçişi sağlamaktadır. Bu geçme, boyuna pres toleransında olup herhangi bir kama elemanı olmadan tork aktarımı sağlamaktadır. Şekil 1’de belirtilmiş olan mavi renkli sıkma somunu gri renkli flanş ile sarı kutuda belirtilen konik düzlem üzerinde yeşil çizgi yönünde geçiş sağlamaktadır. Konik düzlemdeki bu geçiş siyah kutu ile belirtilen 8 Adet civatanın çektirme işlemi ile gerçekleşmektedir. Konik düzlemde çektirme sonucu birleşim sağlayan flanş, sıkma somunu tarafından baskı kuvvetine maruz kalmaktadır. Bu kuvvet kırmızı ok ile gösterilen iç çapta daralma oluşturmaktadır. Bu daralma, mil ile sıkı geçme toleransı oluşturup fan ile motor arasında tork aktarımı sağlamaktadır.



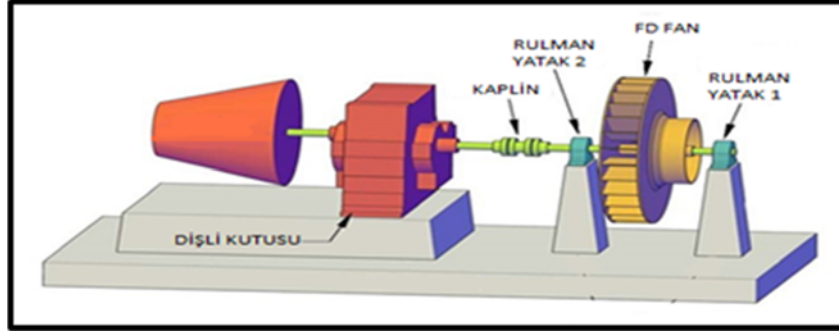
Şekil 1. Kaplin sistemi montaj resmi

Şekil 1’de sıkma işlemi uygulayan sıkma somunu için AISI 4140QT kalite seçilmiştir. Buradaki amaç; sıkılma işlemi sırasında şekil değişimini kendisinde değil de daha az akma gerilmesine sahip S355J22G3 malzemeye sahip flanş da olmasını sağlamaktır. C50 karbon çeliği flanş hammaddesinin alternatifi olarak seçilmiştir. Çizelge 1’de malzemelere ait mekanik özellikler gösterilmektedir.

Yüksek güç aktarımı sağlayan Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin aktif olarak kullanıldığı endüstriyel alanlar gözönüne alınarak 2500 kW motor Gücü ve 900 devir/dakika çalışma sınır şartları olarak ele alınmıştır. Kaplin sistemi de Şekil 2’de gösterilmiştir.

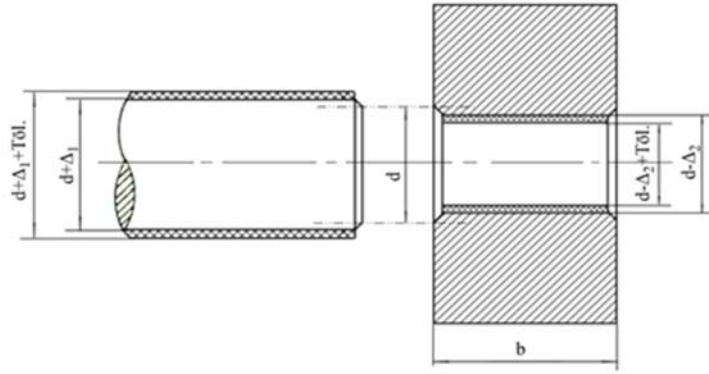
Çizelge 1. Mekanik özellikler

Mekanik özellikler	S355J2G3	AISI 4140QT	C50E
Çekme gerilmesi R-N/mm <sup>2</sup> (0-3mm)	510-680	860-1060	650
Akma gerilmesi ReH -N/mm <sup>2</sup>	355	730	355
A%-mm (L)	22	14	13
Sertlik HB	141-192	258-322	200



Şekil 2. Kaplin sistemi montaj resmi [18]

Mil çapının delik çapından daha büyük olması mil ve göbek bağlantılarında sıkı geçme oluşturmaktadır. Hem mil hem de delik anma çapının  $d$  çapı olması durumunda milin çapı anma çapından  $\Delta_1$  kadar daha büyük, delik çapı ise  $\Delta_2$  kadar küçük olmalıdır. Toleransların bu ölçülerin üzerine eklenmesi durumunda çap farkı daha da büyüyecektir.  $\Delta$  oluşan çap farkını gösterirse bu fark, toleransların dikkate alınmadığı en küçük çap farkını gösterecektir.  $\Delta$  çap farkı, milin göbek içerisine sıkıca yerleştirildiği durumda elastik şekil değişimleri sayesinde yok olmaktadır. Yüzeylerde  $P$  basıncı oluşmaktadır. Sıkı geçen malzemelerin yüzeylerinde aşırı baskının oluşması  $\Delta$  çap farkının çok fazla olmasına bağlıdır. Bu durumda, malzeme plastik deformasyona uğramaktadır. Malzeme yüzeyinde istenilen basıncın olmaması plastik deformasyonun bir sonucu olup bu da malzeme yüzeylerinin bozulmasına sebebiyet vermektedir[18].



Şekil 3. Sıkı geçme tolerans gösterimi

$$\text{Mil Çapı } d_{mil} = d + \Delta_1 \quad (1)$$

$$\text{Mil Çapı } d_{delik} = d - \Delta_2 \quad (2)$$

$$\text{Çap Farkı: } \Delta = d_{mil} - d_{delik} = d + \Delta_1 - (d - \Delta_2) = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (3)$$

Milden alınan döndürme momentinin kasnağa aktarılması ancak sürtünme momentinin döndürme momentinden daha büyük olması ile mümkündür ( $M_s > M_d$ ). Dolayısıyla sürtünme momentini döndürme momentinden belirli bir emniyet katsayısı kadar büyük seçilmelidir ( $M_s = k \cdot M_d$ ). Burada,  $k$  bağlantının hareketini iletmedeki emniyet katsayısıdır. Çalışmanın titreşim durumuna göre bu katsayı seçilebilir [19].

1)  $k=1,25$  (Titreşimsiz ya da az titreşimli bağlantılar)

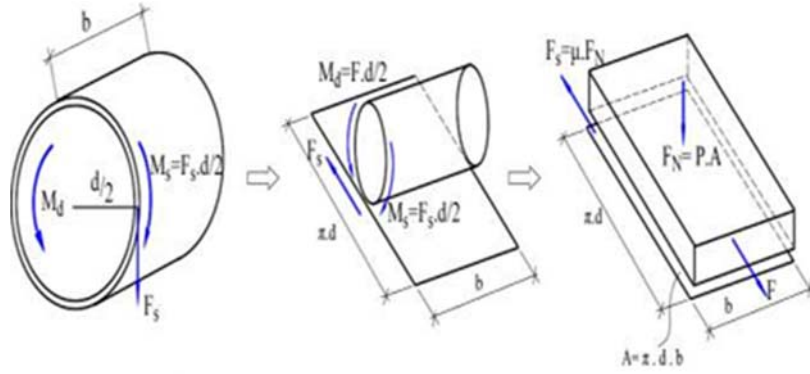
2)  $k=1,5$  (Orta titreşimli bağlantılar)

3)  $k=2,0$  (Titreşimli ve darbeli bağlantılar)

Sürtünme momentini aşağıdaki eşitlikten bulunabilmektedir;

$$M_s = F_s \cdot \frac{d}{2} = (\mu \cdot F_N) \cdot \frac{d}{2} = \mu \cdot (P \cdot A) \cdot \frac{d}{2} = \mu \cdot P \cdot (\pi \cdot d \cdot b) \cdot \frac{d}{2} \quad (4)$$

$$M_s = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot b \cdot d^2 \quad (5)$$



Şekil 4. Sürtünme momenti hesabı [18]

Hareket iletimi, minimum seviyede yüzey basıncının sağlandığı sürtünme momenti sayesinde olmaktadır. Bu basınç değeri yukarıdaki formülden çekilirse aşağıdaki şekilde elde edilir [18].

$$P_{min} = \frac{2.M_s}{\pi.\mu.b.d^2} \quad (6)$$

Sürtünme momenti ve dolayısıyla bu momenti sağlayacak basıncın oluşturulması için gerekli olan çap farkı ( $\Delta$ ), pres geçmelerin boyutlandırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Mil içi boş boru olarak düşünülürse dış ve iç yarıçapları ( $r_d, r_i$ ) olacaktır. Benzer şekilde göbeğin dış ve iç yarıçaplarını da ( $R_d, R_i$ ) ile gösterelim. C katsayısı ise yarıçaplar oranını gösterirse, buna çap oranı da diyebiliriz. Oran söz konusu olduğu için olduğu için sonuç değişmeyecektir [18].

$$C_1 = \frac{r_i}{r_d} \quad (\text{mil için}) \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{R_i}{R_d} \quad (\text{göbek için}) \quad (8)$$

Çap farkı ( $\Delta$ ), Eşitlik 9'da gösterilmektedir. Eşitlikte P yüzeyler arasındaki basıncı, d milin ve göbeğin anma çapını,  $E_1$  milin,  $E_2$  göbeğin elastisite modülünü;  $C_1$  milin,  $C_2$  göbeğin yarıçap oranını;  $\nu_1$  milin,  $\nu_2$  göbeğin poisson oranını göstermektedir [18].

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = P.d \left[ \frac{1}{E_1} \left( \frac{1+C_1^2}{1-C_1^2} - \nu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left( \frac{1+C_2^2}{1-C_2^2} - \nu_2 \right) \right] \quad (9)$$

Bu eşitlik, mil ve göbeğin malzeme özellikleri biliniyorsa mil ve göbek arasındaki çap farkının ne kadar olması gerektiğini hesaplama kolaylığını sağlayacaktır. Bu teorik bir değer olup gerçekte malzeme yüzeylerindeki pürüzlerin sıkı geçmede % 60 dolayında ezilmesi nedeniyle oluşan ekstra boşlukların da bu değere eklenmesi gerekmektedir.

Yüzeyler arasındaki basınç artması çap oranının aşırı artışı ile mümkündür. Bu durum, malzemelerin akma sınırını geçip plastik olarak bozulmasına neden olacaktır. Bu durumda malzemenin içinde oluşan kayma gerilmesinin emniyet sınırlarını aşmaması gerekir. Maksimum yüzey basıncı ve oluşan maksimum kayma gerilmesi arasında aşağıdaki eşitlikler yazılabilmektedir.

$$P_{max} = \tau_{em}(1 - C_2^2) \quad (10)$$

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{1-C_2^2} \leq \tau_{em} \frac{\sigma_{em}}{2} \quad (11)$$

Optimizasyon için kullanılacak Taguchi yönteminde ilk aşama optimize edilecek kalite karakteristiğinin belirlenmesidir. Bu karakteristik, varyasyonun ürün kalitesi üzerinde kritik bir etkisi olan bir parametre olup gözlenecek çıktı veya cevap değişkenidir [20]. Bunlar bu çalışmada iç çap daralması ve en büyük gerilme olarak belirlenmiştir.

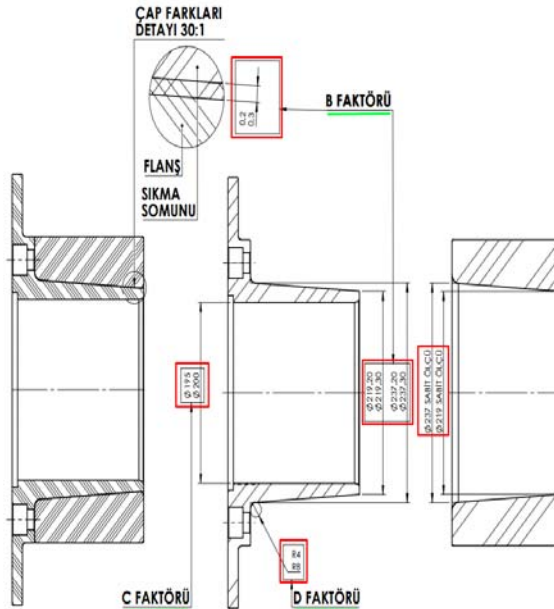
Ayarlanabilen ve korunabilen tasarım faktörleri kontrol parametrelerini oluşturmaktadır. Her test parametresi için seviyeler yani test değerleri bu noktada belirlenmektedir. Bu çalışmada tanımlanan tasarım faktörleri aşağıdaki gibidir:

- Malzemeden gelen faktör parametresinin seçiminde sıkma somunun AISI4140+QT, flanşın ise S355J2 veya C50+N malzeme kalitesinde malzemeden imal edildiği değerlendirilmiştir.
- Saha ortamında yapılan geometrik ölçümler sonucunda Torsiyonel Rijit Fan Kaplinlerinin konik kısımlarına ait başlangıç ölçüsü 219 mm ve bitiş ölçüleri 237 mm olarak  $\pm 1$  mm toleransında ölçüm sağlanmıştır. Bu ölçüler referans alınarak konik düzlem üzerinde sıkma somun ölçüsü sabit kabul edilerek sadece flanş ölçülerinde konik başlangıç ve bitiş ölçülerinin ötelenmesi ile konik düzlemin tüm yüzey boyunca teması sağlayacak, sıkı geçme toleransı oluşturulmuştur. Bu öteleme ölçüsü iki farklı değerde alıştırma senaryosu için faktör olarak kabul edilmiştir.
- Motor tahrik milinin geçeceği iç çap geometrik ölçümler sonucunda  $\varnothing 195,070$  ve  $195,055$  aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu ölçüm hassas delik içi komparatörün mikrometre ile ayarlanması sonucunda, fabrika açık hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Flanş üzerindeki plastik deformasyon sonucunda bu çaptaki daralama miktarı testin önemli parametresidir. Çap miktarı; flanş konik düzlemi ile et kalınlık ölçü miktarını doğrudan etkilemektedir. Daralma miktarı buradaki et kalınlığına bağlı olup alternatif olarak  $\varnothing 200$  mm ölçü ile test yapıldığında sonuç optimizasyonunu belirleyecek faktör olarak kabul edilmiştir.
- Yüksek deformasyona maruz kalan flanş üzerindeki keskin köşeler gerilme açısından önemli olup konik düzlem bitimindeki köşe nokta için R4 ve R8 olacak şekilde yuvarlama işlemi yapılarak optimize edilecek faktör belirlenmiştir.

Çizelge 2 ve Şekil 5'te Tasarım faktörleri ve teknik resim üzerindeki gösterimi detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Tasarım faktörleri

Parametre	Faktör kodu	Seviye 1	Seviye 2
Malzeme	A	S355J2	C50+N
Konik düzlem öteleme miktarı	B	0,2	0,3
İç çap ölçüsü	C	195	200
Flanş köşe radüsü	D	R4	R8



Şekil 5. Tasarım faktörleri

İki seviye ve dört faktör parametresinden oluşan veri girişimiz Taguchi Ortogonal Dizi Tasarımı  $L8(2^4)$  olarak yapılmıştır (Çizelge 3). Yapılan optimizasyon çalışmasının en büyük emniyet katsayısı ve en iyi yaklaşım için hesaplanan S/N oranı kullanılmıştır. Her eşleşme için SEA yapılarak testler

gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda oluşan maksimum gerilme, flanş hammaddesinin akma gerilmesi olan 355 MPa değerine oranla emniyet katsayısı belirlenmiştir. Her bir eşleşmenin sonucunda mil montajı yapılacak olan 195 mm iç çaptaki daralma ölçüsü, tork aktarılacak geçme toleransı için önem arz etmektedir.

**Çizelge 3.** Taguchi ortogonal dizi tasarımı (L8)

L8	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	1
4	1	2	2	2
5	2	1	2	1
6	2	1	2	2
7	2	2	1	1
8	2	2	1	2

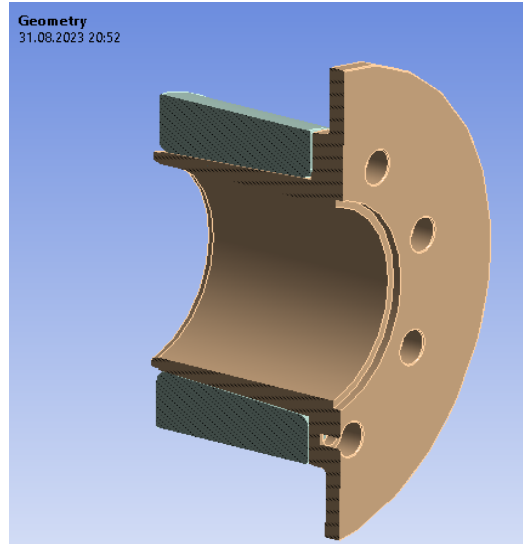
Her seviye için sonlu elemanlar analizi yapılırken sistemin iyi ve kötü durumları göz önüne alınarak analiz yapılmaktadır. İyi durum ve kötü durum için alınan sonuçların ortalaması ile S/N değeri hesaplanmaktadır.

Konik düzlem üzerinde sistem montaj esnasında iken sürtünmeye maruz kalmaktadır. Sistem üzerinde konik çekirme işlemi sırasında konik düzleme yağ enjekte edilmektedir. Kötü durumda yağ kullanılmadan yapılan alıştırma işlemi için  $\mu_s=0,19$  alınırken, iyi durum olan yağ kullanılarak yapılan alıştırma durumunda  $\mu_s=0,09$  değeri alınmıştır (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Kayma düzlemindeki sürtünme katsayısı

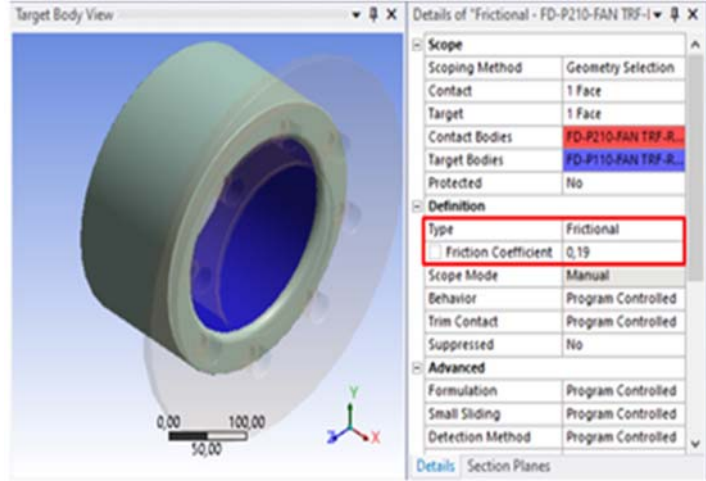
<b>İyi Durum</b>	Yağlı ( $\mu$ )	0,09
<b>Kötü Durum</b>	Kuru ( $\mu$ )	0,19

Kaplinin paket program ile modellenmiş hali Şekil 6'da verilmiştir. Ansys yazılımı, kaplinin SEA analizleri için kullanılmış olup kaplin üzerinde belirlenen parametrelere göre 8 adet tasarım ile analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Optimum tasarıma götüreceği analiz sonuçları, L8 ortogonal dizi kullanılarak Taguchi metodu ile belirlenmiştir.



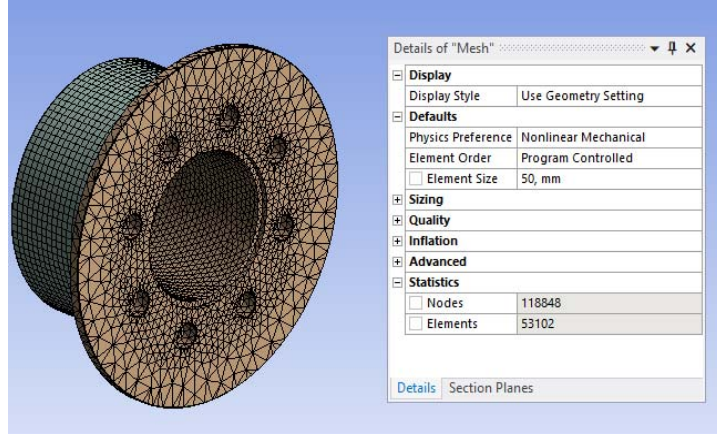
**Şekil 6.** Paket programda modellenmiş kaplin

SEA çalışmalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmekte olup elastik bölgedeki davranışlar, analizlerde doğrusal malzeme tanımlaması yapılarak incelenmiştir. Kontak yüzeyleri tanımlanırken (Şekil 7) konik düzlemler için sürtünme katsayısı kötü durum için  $\mu_s=0,19$  alınırken, iyi durum için ise  $\mu_s=0,09$  olarak alınmıştır.



Şekil 7. Kontak yüzeylerinin tanımlanması

Şekil 8’de parça sonlu elemanlara ayrılmak üzere mesh edilmiştir. Yapılan mesh işleminin sonunda ortaya çıkan veriler Çizelge 5’te gösterilmiştir. Mesh tipi Düzlemsel 2B Mesh olarak seçilmiştir.



Şekil 8. Modelin mesh hali

Çizelge 5. Mesh bilgisi

<b>Eleman boyutu (mm)</b>	<b>50 mm</b>
<b>Eleman sayısı</b>	<b>53102</b>
<b>Düğüm sayısı</b>	<b>118848</b>

Konik düzlemde hareket işlemi 8 adet civatanın çektirme gücü ile elde edilmektedir. Bu civataların flanş üzerinde tepki yüzeyleri sürtünmesiz destek yüzeyleri olarak tanımlanmıştır.

Sıkma somunu ile flanş yüzeyi herhangi bir çektirme olmaksızın doğal temas esnasında sıkma somunu ile arasında açık mesafe kalmaktadır. Bu açık mesafe tamamen kapatılması durumunda 0,2 mm ve 0,3 mm konik yüzeyler geçiş sağlayarak daralma ve plastik deformasyonu sağlayacaktır. Analiz esnasında sıkma somununa +X yönünde flanş dayanma yüzeyine kadar deplasman hareketi verilerek işlem gerçekleştirilmiştir.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Oluşturulan 8 adet tasarım ile belirlenen iyi ve kötü durum için SEA gerçekleştirilerek yapılar üzerinde maksimum Von-Misses eşdeğer gerilmesi bulunmuştur. Flanş malzemesi için belirtilen akma dayanımı referans alınarak elde edilen maksimum gerilme oranı ile emniyet katsayısı elde edilmiştir.



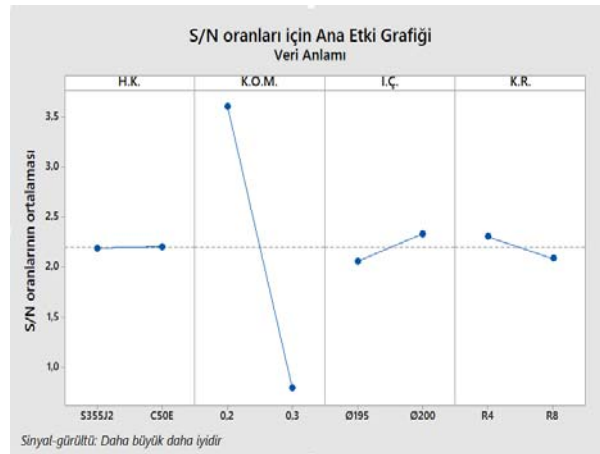
Bu sonuçlara göre Taguchi metodu ile sinyal gürültü oranları bulunmuş ve Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Analiz ve Taguchi metodu ile S/N sonuçları

	İyi durum			Kötü durum			S/N
	Maks. gerilme (MPa)	İç çap daralma (mm)	Emniyet katsayısı	Maks. gerilme (MPa)	İç çap daralma (mm)	Emniyet katsayısı	
L1	210,88	0,097	1,68	273,64	0,096	1,30	3,466
L2	210,67	0,097	1,69	275,86	0,096	1,29	3,440
L3	311,87	0,146	1,14	309,47	0,145	1,15	1,159
L4	313,27	0,146	1,13	344,73	0,145	1,03	0,681
L5	206,16	0,097	1,72	246,17	0,096	1,44	3,984
L6	207,11	0,097	1,71	277,83	0,096	1,28	3,498
L7	315,64	0,146	1,12	347,95	0,144	1,02	0,608
L8	316,35	0,146	1,12	338,03	0,144	1,05	0,718

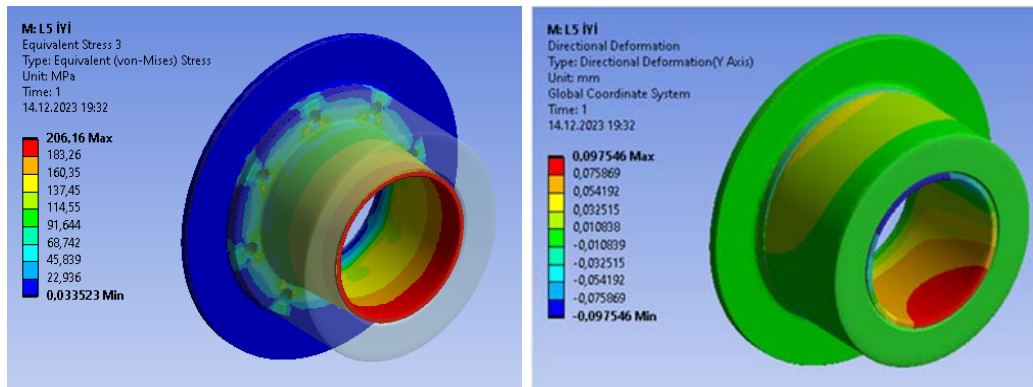
Yapılan sekiz farklı analizin tümünde çap daralması uygun aralıklardadır. Akma gerilmesinin altında maksimum gerilme gözlemlenmiştir. S/N oranları hesaplanırken emniyet katsayısının en yüksek olduğu durum sistem için uygundur.

İstatistiksel hesaplamaların ve analizlerinin uygulanmasında istatistiksel analiz programından yardım alınmıştır. Optimum parametrelerin belirlenebilmesi için program yardımı ile sinyal gürültü oranları için grafikler elde edilmiştir. Şekil 9'da SEA sonuçları kullanarak oluşturulan parametre seviyeleri için S/N grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 9. SEA sonuçlarına göre parametre seviyeleri

Tasarım aşamasındaki değişken parametreler için hesaplanan S/N değerlerinde büyük değerler bizi emniyet katsayısındaki en iyi sonuca ulaştıracaktır. Optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için SEA sonuçlarının Taguchi metodunda kullanılması ile en büyük en iyi sonuç L5'te verilen parametreler için elde edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. L5 için analiz sonuçları

Sıkı geçme toleransı motor mili ile kaplin flanşında olacaktır. Mile bağlı motorun gücü 2500 kW ve devri 900 devir/dakikadır. Bağlantıda orta düzeyde titreşim ve darbe unsuru (1,5 K) dikkate alınmıştır. Buna göre; Eşitlik 1-11 yardımı ile hesaplanan ve Çizelge 7’de verilen mekanik hesaplamalar kullanılarak malzemelerin emniyet sınırları aşılmadan bağlantıya verilecek minimum ve maksimum sıklık değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 7. Mekanik hesaplamalar

$M_d$	26527,778 Nm
$M_s$	39791667 Nmm
$P_{min}$	35,184 N/mm <sup>2</sup>
$C_1$	0
$C_2$	0,606
$\Delta_{min}$	86,480 mikron
$P_{max}$	112,302 N/mm <sup>2</sup>
$\Delta_{max}$	276,061 mikron

Bu çalışmada, yüzey pürüzlerinin %60 ezildiği varsayılmıştır. Ezilme sebebiyle oluşan boşluğun çap farklarına eklenmesi gerekmektedir. Milin hassas tornalama ile işlendiği düşünüldüğünde mil yüzeylerindeki ortalama pürüzlülük değeri (tepelerle çukurlar arasındaki mesafe) 5µ olarak alınmıştır. Delik için ise normal tornalama işlemi yapıldığı ve ortalama pürüzlülük değeri ise 11 µ olarak alınmıştır. Toplam pürüzlülük değeri 11+5= 16 µ olmakta ve bunun %60’ı ezilirse 9,6 mikronluk daha boşluk oluşmaktadır. Bu değeri 10 mikron olarak alıp çap farkının üzerine eklememiz gerekmektedir. Böylece ezilmeden dolayı eklememiz gereken çap farkı  $\delta_{ez}=10 \mu$  olmaktadır.

Yeni oluşan çap farklarını U ile gösterirsek  $U_{min}$  ve  $U_{max}$ ;

$$U_{min} = \Delta_{min} + \delta_{ez} = 85,678 + 10 = 95,678 \text{ mikron} = 0,09649 \text{ mm} \quad (12)$$

$$U_{max} = \Delta_{max} + \delta_{ez} = 267,426 + 10 = 277,426 \text{ mikron} = 0,28606 \text{ mm} \quad (13)$$

Bulunan değerler; motor dönme momentinin fan mekanizmasına aktarılması için mil ile kaplin flanşı arasındaki sıkı geçme tolerans miktarıdır. Motor mili Ø195 mm ve tolerans miktarını kaplin flanşının iç çapı için uygulanırsa;

$$\text{Torkun aktarılması için Gerek Tolerans} = \text{Ø}195_{-0,28606}^{-0,09649} = \text{Ø}194_{,71394}^{,90351} \quad (14)$$

Kama kullanılmadan ve ısıtma, presleme gibi imkanlar olmadan montaj yapılmasına olanak sağlayan Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri için flanş çapının montaj öncesinde motor miline rahatlıkla alıştırmasının yapılabilmiş olması gerekmektedir. Bu geçiş için aşağıda verilen Montaj Öncesi Ölçülerde flanşın iç çapı imal edilmelidir.

$$\text{Motor Mil Çapı} = \text{Ø}195_{0,000}^{0,000} \quad (15)$$

$$\text{Flanş Deliği İmalat Çapı (Montaj Öncesi)} = \text{Ø}195_{0,050}^{0,070} \quad (16)$$

Taguchi metodu uygulanması sonucu tespit edilen optimum sonuç veren L5 parametrelerinin kullanılması sonucu sıkma somunu ile flanş montajı gerçekleştirildiğinde iç çaptaki daralma miktarı aşağıdaki gibi bulunmuştur.

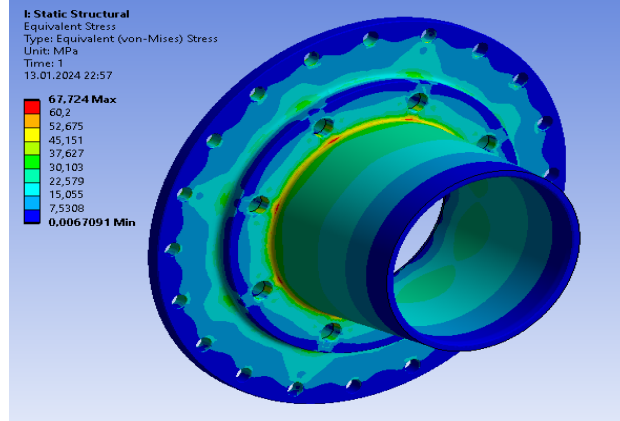
$$0,096 \times 2 \text{ (iki yönde)} = 0,192 \text{ mm} \quad (17)$$

$$(\text{Flanş} + \text{Sıkma Somunu} + \text{Mil})\text{Mont. Sonrası} = \text{Ø}195_{0,050-0,192}^{0,070-0,192} = \text{Ø}194_{,858}^{,878} \quad (18)$$

Mekanik hesaplamalar neticesinde bulunan torkun aktarılması için gerekli kaplin flanşının iç çap değeri ile optimum tasarım parametreleri kullanılarak elde edilen kaplin flanşının iç çap değeri toleranslar da dikkate alınır aşağıdaki gibi bulunmakta ve birbirleriyle uyumlu olmaktadır.

$$(\text{Optimizasyon Sonucu}) \text{Ø}194_{,858}^{,878} = \text{Ø}194_{,713}^{,903} \text{ (Mekanik Hesap Sonucu)} \quad (19)$$

Mile bağlı motorun gücü 2500 kW ve devri 900 devir/dakika'dır, Çizelge 7'de hesaplanan döndürme momenti flanş kullanılarak aktarılmaktadır. Flanşın çevresinde bulunan 20 adet Ø17 çap delik ile bağlantısı yapılmıştır. Ansys ortamında yapılan SEA sonucu sistemde maksimum 67,72 MPa gerilme elde edilmiştir (Şekil 11). S355J2 ve C50N kalite malzemelerin akma sınırı olan 355 MPa ile kıyaslandığında sistem 5,24 kat emniyetlidir.



Şekil 11. Döndürme momenti altında maksimum gerilme

#### 4. SONUÇLAR

- Torsiyonel Rijit Fan Kaplinleri, kama gibi bağlantı elemanları olmadan yüksek motor güçlerini sıkıştırma tekniği ile fan mekanizmasına aktarmaktadır. Sistemdeki sıkma somununu, iç konik yüzey ile flanş dış konik yüzeyi üzerinde hareket ettirilerek geçiş toleransı sağlanmaktadır. Aktarılabilecek tork miktarına uygun toleransın sağlanması için, fiziksel olarak ürünlerin akma gerilmesine oranla emniyetli gerilmeler altında kalması gerekmektedir.
- SEA sonuçları neticesinde Taguchi metodu ile optimum ana değişken parametreleri belirlenmiştir.
- Parametrelere bağlı sekiz farklı test sonucunda optimum sonuç elde edilmiş ve mekanik tolerans hesaplama yöntemi ile doğrulama yapılmıştır.
- Koniklik hesabındaki öteleme parametresi; malzemeler üzerindeki gerilmeleri doğrudan etkilemektedir. Bu durum göz önüne alındığında konik yüzey açılarının aynı ve paralel olması, optimum sonuç aralığında 0,2 mm ötelenmesi gerekmektedir.
- İyi ve kötü durum için konik geçiş sürtünme katsayısı maksimum gerilmeler üzerinde etki sağlayan önemli bir unsurdur. Montaj esnasında yüzeylerin yağlama durumuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Sürtünme katsayısı maksimum 0,19 geçmemelidir. Üretim esnasında bu konik geçiş yüzeyleri hassas torna tezgâhlarında işlenmelidir.
- Flanş üzerindeki dayanma, keskin köşe noktasında gerilimde artış olmaması için en az R4 olacak şekilde yuvarlama yapılmalıdır. Bu işlem sıkma somununun dayanma noktasına ulaşmasını engellemeyecek şekilde olmalıdır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Torun, F., 2006. Dişli kaplinlerin diş dibine gerilmesine etki eden parametrelerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, 80.
2. Bulgurcu, H., 2015. Havalandırma tesisatı. MMO İstanbul Şube 31. Dönem Havalandırma Tesisatı Kitap Komisyonu, İstanbul, 620.
3. Özden, O.B., Gökçe, B., 2023. Sonlu elemanlar yöntemi ve Taguchi metodu kullanılarak bir kara aracının parametrik olarak optimum tasarımının geliştirilmesi. Dicle University Journal of Engineering, 14(2), 305-313.

4. Canıyılmaz, E., 2001. Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
5. Ross, P.J., 1989. Taguchi techniques for quality engineering. McGraw-Hill, Singapore.
6. Taphasanođlu, S., 2020. Çok yanıtlı problemlere sürekli-sürekli kalite karakteristikleri için dinamik Taguchi yöntemi yaklaşımı. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
7. Murat, D., 2013. Kalite karakteristiğinin modellenmesinde tepki yüzeyi metodolojisi: Bir uygulama denemesi. Doktora Tezi, Bursa Uludađ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
8. Yalçındağ, Y., 2021. Gıda şletmelerinde Taguchi yöntemi ile süreç iyileştirme ve bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
9. Akpolat, A., 2019. Analysis of contact stresses in spur gears by finite element method. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 17, 539-545.
10. Emir, E., Benzer, E., 2021. Structural analysis of industrial foam crusher machine by using finite element method. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 29, 343-350.
11. Gök, A., 2022. Design and numerical analysis of face mask polymer shield against infectious diseases. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 22(6)6, 2250039.
12. Gök, A., Demirci, H., Gök, K., 2016. Determination of experimental, analytical, and numerical values of tool deflection at ball end milling of inclined surfaces. Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 230(2), 111-119.
13. Özden, O.B., Gökçe, B., Erdemir, A., 2022. Investigation of welded joints in finite element analysis. 2nd International Congress on Scientific Advances (ICONSAD'22), 516-522.
14. Sarı, G., Ak, A.F., Akış, A.A., Aydınoğlu, E., 2022. Experimental and numerical modal analysis of a bladed rotor. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13(1), 57- 63.
15. Esener, E., 2020. Plastisite modellerinde pekleřme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(1), 171-181.
16. Gök, K., Gök, A., Kisioglu, Y., 2019. Computer aided finite element simulation of the developed driller system for bone drilling process in orthopedic surgery. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 18(4), 583-594.
17. Shaqura, M., Shamma, J.S., 2017. An automated quadcopter CAD based design and modeling platform using solidworks API and smart dynamic assembly. Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 122-131.
18. Çayıroğlu, İ., 2024. Makine elamanları pres sıkı geçme. Ders Notları, Karabük Üniversitesi, Karabük.
19. Temiz, V., 2024. Mil göbek bağlantıları. Makine Elemanları I. Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi.
20. Pınarbaşı, A., 2019. Al 7075'in CNC frezelenmesinde şlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve kesme enerjisine etkisinin Taguchi yöntemine göre optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi Mersin, 42.