



## ULTRA YÜKSEK BASINÇTA ÇALIŞAN KALIN CİDARLI SİLİNDİRLERİN TASARIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Mevlüt AYDIN , <sup>2</sup>Mevlüt TÜRKÖZ , <sup>3</sup>Yusuf Furkan YAPAN 

<sup>1,2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>1</sup>maydin@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>mturkoz@ktun.edu.tr, <sup>3</sup>yapan@yildiz.edu.tr

(Geliş /Received: 05.02.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.04.2022)

**ÖZ:** Bu çalışmada ultra yüksek basınç altında çalışan kalın cidarlı silindirlerin tasarımına etki eden geometrik parametreler araştırılmıştır. Bu kapsamda, 350 MPa basınç altında, tasarım parametrelerinin silindir iç yüzeyinde meydana gelen maksimum gerilmelere ve katmanlar arasındaki maksimum ara yüzey basıncına etkileri analitik ve nümerik olarak belirlenmiştir. Tasarım parametreleri sırasıyla iç silindir çapı, iç ve dış cidar kalınlıkları ile tek taraflı sıkı geçme toleransıdır. Parametrelerin etkileşimi ve sonuçların anlamlılığını araştırmak için tam faktöriyel deney tasarımı oluşturulmuştur. Sonuçlara regresyon ve varyans analizleri uygulanmıştır. Sonuç olarak silindirde oluşan maksimum gerilmeye etki eden en önemli parametrenin % 32.7 ile sıkılık toleransı olduğu bulunmuştur. İç cidar kalınlığının ise %6.2 oranla gerilme düzeyi üzerinde en az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca kalın cidarlı silindirlerin tasarımında Sonlu Elemanlar Analizlerinin de (SEA) kullanılabilirliğini göstermek için basınç altındaki silindirlerde meydana gelen Von-Mises eşdeğer gerilmeleri ve ara yüzey basıncı SEA ile de elde edilmiştir. SEA sonuçlarının analitik sonuçlarla karşılaştırılması ile SEA'ların güvenilirlikleri belirlenmiştir. SEA'lar iki farklı (Ansys ve Solidworks) sonlu elemanlar çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiş ve aralarındaki hesap farkı tespit edilmiştir. Gerilme değerinde Solidworks ve analitik çözüm arasındaki fark % 2.05 iken Ansys ve analitik çözüm arasındaki fark % 0.5 olarak hesaplanmıştır. Buradan SEA çözücülerinin her ikisinin de oldukça yüksek doğrulukta tahminlerde bulunabildiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ara yüzey basıncı, Katmanlı silindir, Sıkı geçme, Sıkılık toleransı, Ultra yüksek basınç

### Numerical and Analytical Investigation of the Parameters Affecting the Design of Ultra High Pressure Thick Wall Cylinders

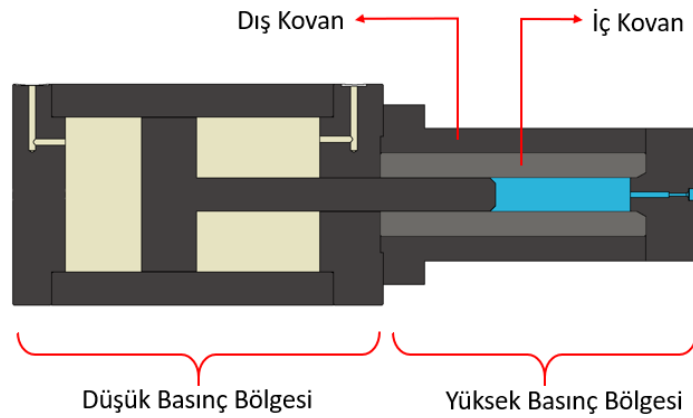
**ABSTRACT:** In this study, geometric parameters affecting the design of thick-walled cylinders operating under ultra-high pressure were investigated. In this context, the effects of design parameters on the maximum stresses occurring on the inner surface of the cylinder and the maximum interface pressure between the layers under 350 MPa pressure were determined analytically and numerically. The design parameters are the inner cylinder diameter, the inner and outer wall thicknesses, and the one-sided shrinking allowance respectively. A full factorial experimental design was created to investigate the interaction of the parameters and the significance of the results. Regression and variance analysis were applied to the results. As a result, it was found that the most important parameter affecting the maximum stress in the cylinder was the shrinking allowance with 32.7%. It was observed that the inner wall thickness had the least effect on the stress level with a rate of 6.2%. In addition, Von-Mises equivalent stresses and interface pressure between the cylinders under internal pressure were obtained by Finite Element Analysis (FEA) to show the usability of (FEA) in the design of thick-walled cylinders. The reliability of the FEAs was determined by comparing the results of the FEA with the analytical results. FEAs were

performed using two different finite element solvers (Ansys and Solidworks) and the calculation difference between them was determined. In the stress value, the difference between Solidworks and analytical solution was 2.05%, while the difference between Ansys and analytical solution was 0.5%. From this, it has been determined that both FEA solvers can make predictions with very high accuracy.

**Keywords:** Layered cylinder, Shrinkage pressure, Shrink fit, Shrinkage allowance, Ultra-high pressure

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ultra yüksek basınçlar sanayide hidroşekillendirme işleminde; su jeti ile kesmede; sızdırmazlık ve patlatma dayanım ve yorulma gibi testlerde kullanılmaktadır. Bunun yanında yapıların basınç taşıma kapasitesini artıran ofofretaj, endüstriyel temizlik ve yüksek basınçta pastörizasyon işlemlerinde de ultra yüksek basınçlardan yararlanılmaktadır. Ultra yüksek basınçlar, basınç yükselticiler kullanılarak elde edilmektedir. Basınç yükselticilerle, iki farklı alana sahip bir mil yardımıyla 200-450 MPa gibi ultra yüksek basınçlar elde edilmektedir. Basınç yükselticilerde Şekil 1’de görüldüğü gibi düşük basınç bölgesi standart bir hidrolik silindir olup 25 MPa gibi standart hidrolik basınçlarla çalışmaktadır. Milin önündeki yüksek basınç bölgesine doldurulan sıvının basıncı, alan oranı kadar artırılmaktadır. Bu basınçlarda ani gelişen hasarlar, ölümcül tehlikede ve yüksek maliyette olabilmektedir. Bu nedenle basınç yükselticilerde tekrarlı yüksek gerilmelere maruz kalan Kalın Cidarlı Silindirler (KCS), genellikle yüksek akma ve yorulma dayanıma sahip malzemelerden çok katmanlı olarak imal edilmektedir. Bunun yanında hidrolik silindirlerin tasarımında güvenle kullanılacak boyutların belirlenmesi de önem arz etmektedir.



Şekil 1. Tek etkili basınç yükseltici (Aydın ve diğ., 2020)

Figure 1. Single acting pressure intensifier

KCS’ler hidrolik, kimya, makine imalat, petrol, askeri ve nükleer santral endüstrilerinde kullanılmaktadır. Yüksek basınçlı reaktör kapları, proses tesisleri, hava kompresör üniteleri, hidrolik tanklar, ekstrüzyon kovanları, namlular, gaz depolama tankları gibi birçok örnek uygulaması mevcuttur.

Çok katmanlı olarak üretilen KCS’ler birbirlerine sıkı geçme işlemiyle montaj edilmektedir. Sıkı geçmenin oluşturduğu gerilme durumu neticesinde, tek bir silindirde kullanılan toplam malzemeden daha az malzeme kullanarak, daha yüksek basınçlara direnen bir yapı oluşmaktadır (Öztürk, 2011; Aydın ve diğ.,2020).

Literatürde, çok katmanlı silindirlerin sıkı geçme işleme ile montaj edilmesinden kaynaklanan ara yüzey basınç değerleri, silindirlerin sıkı geçirilmesiyle ömürlerindeki değişimleri içeren, analitik ve nümerik hesabının yapıldığı birçok çalışma mevcuttur (Öztürk ve Tse-Chien , 2011; Öztürk, 2010; Zhang ve diğ., 2000; Parades ve diğ., 2010; Aydın ve diğ., 2020). Öztürk (2010), çelik-çelik ve çelik alüminyum malzemeleriyle kalın cidarlı katmanlı silindirlerin farklı sıkı geçme toleranslarında meydana gelen ara yüzey basıncını analitik ve nümerik olarak değerlendirmiştir. Sıkı geçme işleminde oluşan gerilmeler,

cidar boyunca SE ile hesaplanmış ve analitik değerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, katmanlı silindirlerin sıkı geçme prosesini SEA'lerin büyük oranda başarılı yaptığı belirtilmiştir. Ek olarak karmaşık geometriye sıkı geçirilmiş parçaların gerilmelerinin tespitinde analitik yöntemler yerine SEA'lerin daha güvenilir olduğu gösterilmiştir. Parades ve diğ. (2010), sıkı geçme ile montajı yapılan bir sistemi hem sayısal hem de deneysel olarak araştırmıştır. Sayısal sonuçların gayet başarılı olduğu belirtilmiştir. Aydın ve diğ. (2020), sıkı geçirilmiş katmanlı silindirlerde ara yüzey basıncının silindirlerin yorulma ömrüne etkisini incelemiştir. Yapılan SEA'lar sonucunda, sıkı geçme arttıkça yorulma ömründe artış meydana gelmiştir. Aynı şartlar altında tek katmanlı silindirin ömrü 5586 çevrim olurken optimum katmanlı silindirde ömür %99 artışla 9530 çevrime yükselmiştir. Aydın ve Türköz (2021) tarafından yapılan çalışmada, farklı malzeme çiftleriyle oluşturulan katmanlı silindir tasarımlarında tek katmanlı bir yapıya göre ağırlığın %36 oranına kadar azaltılabileceği nümerik analizlerle bulunmuştur. Benuzzi ve Donzella (2004), analitik ve sayısal çalışmalar kullanarak karmaşık yapıya sahip bir demiryolu aksı ve tekerleğinin sıkı geçirilmesinde uygulanan kuvvetleri araştırmışlardır. Bu tarz karmaşık parçalarda SEA sonuçlarının analitik sonuçlara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Özel ve diğ. (2005), katmanlı silindirler arasındaki sıkı geçme değerini belirlemek için farklı göbek-mil bağlantıları için gerilme ve deformasyon değerlerini SEA ile incelemiştir. İç silindirin dış yüzeyindeki ve delik yüzeyindeki gerilmeler analitik olarak Lamé denklemleriyle hesaplanıp doğrulanması yapılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalara benzer olarak; karmaşık geometriye sahip sıkı geçirilmiş numunelerin hesaplamalarında Sonlu Elemanlar sonuçlarının analitik sonuçlara göre daha kullanışlı olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada özellikle sıkı geçirilmenin başladığı anda başlangıç noktalarında oluşan plastik bölge incelenmiştir. İncelemeler sonucunda silindirlerin uç bölgelerinde merkez bölgelerine nazaran daha güvensiz ve daha yüksek gerilmeler oluştuğu belirtilmiştir. Geren ve diğ. (2000) su jetlerinde kullanılan ve basınç seviyesine göre tek veya çok katmanlı olarak üretilen basınç yükselticilerin tasarım sınırlarını analitik olarak hesaplayıp geometrik boyutlar için en uygun aralıkları belirlemiştir. Yapılan çalışmada 4 farklı iç silindir çapında ve 4 farklı iç basınçta güvenlik katsayılarının nasıl değiştiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak tek katmanlı silindirlerde 2000 bar basınç ve 70 mm cidar kalınlığının sınır değer olarak alınması gerektiğini, çift katmanlı yapılarda, dış silindir cidar kalınlığının belirli bir değerden sonra güvenlik katsayısına etkisinin oldukça az olduğu bulunmuştur. Zhang ve diğ. (2000) dişli çark göbek bağlantıları için kullanılan sıkı geçme işlemlerinde oluşan gerilme değerlerini, Lamé denklemleri ile analitik olarak belirleyip, SEA ile karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada karmaşık geometri kullanılmıştır ve Lamé denklemlerinin karmaşık geometrilerde etkili bir yöntem olmadığını belirterek üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçlarının sıkı geçme işlemlerinde daha gerçekçi sonuçlar verdiğini vurgulamıştır.

Sıkı geçme sırasında oluşan gerilmelerin tahmini için var olan denklemler üzerinde yenileme çalışmaları ve çoğu çalışmada kullanılan Lamé denklemlerine ek olarak yeni analitik metodların önerildiği çalışmalar bulunmaktadır (Wang ve diğ., 2018; Campos ve diğ., 2019). Wang ve diğ. (2018) tarafından presle sıkı geçirilmiş malzemelerde meydana gelen düzensiz gerilme dağılımlarını tahmin eden yeni bir teorik model önerilmiştir. Teorik model, deneylerle ve analitik analizlerle doğrulanmıştır. Çalışmada sıkı geçme işlemindeki temas uzunluğu ve sıklık oranı da etki parametresi olarak araştırılmıştır. Farklı malzeme çiftlerinin (Ni36CrTiAl - 50Ni-50Fe, AISI 1045 - AISI 1045) tam temas koşullarındaki gerilme dağılımları analiz edilmiştir. Sonuçta teorik modelin gerilme dağılımını tahmin etmede yüksek doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Aynı modelin farklı malzeme çiftlerinde de kullanılabileceği belirtilmiştir. Campos ve Hall (2019), Lamé denklemlerini basitleştirmiştir. Basitleştirilmiş formüller ve klasik Lamé denklemleri SEA sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Basitleştirilmiş denklemlerin her iki sonuçla da uyumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca ince cidarlı sıkı geçme işlemlerinde çevresel gerilmenin kalınlığa bağlı olmadığı bulunmuştur. Tezel (2019) yaptığı çalışmada mikro modüllü dişlilerin göbek-mil bağlantılarında farklı sıkı geçme toleranslarında oluşan gerilme dağılımlarını sayısal ve analitik olarak hesaplayıp karşılaştırmasını yapmıştır. Çalışmada kullanılan mil-göbek toleransları sırasıyla H7/p6, H7/s6 ve H7/u6'dır. Çalışmada AISI 4340 çeliği kullanılmıştır. Ayrıca modülü 1 mm, diş sayısı 20 olan 6 mm genişliğindeki dişlinin göbek çapı 2,2,5,3,4,5,6,8 ve 10 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak nominal çap

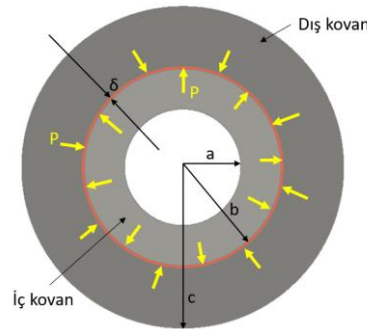
artıkça teğetsel ve radyal gerilmenin azaldığı anlaşılmıştır. Ancak bu durum sistemdeki güvenlik katsayısını düşürdüğünden aradaki dengenin iyi bir şekilde sağlanması gerektiği vurgulanmaktadır. Ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin tüm nominal çap değerleri için büyükten küçüğe doğru H7/u6, H7/s6, H7/p6 şeklinde sıralanmaktadır.

Bu çalışmada basınç yükselticileri oluşturan hidrolik silindirlerin tasarımına, iç silindir çaplarının, iç ve dış silindir cidar kalınlıklarının ve sıklık değerinin etkileri analitik hesaplamalarla belirlenmiştir. Ayrıca iki farklı SEA yazılımının KCS tasarımında kullanılabilirliği sonuçların analitik sonuçlarla kıyaslanması yoluyla ortaya konulmuştur. Silindir içine uygulanan basınç neticesinde oluşan radyal ve teğetsel gerilmeler ile ara yüzey basınçları analitik olarak Lamé Denklemleriyle ve lineer statik SEA ile hesaplanmıştır. Literatürdeki araştırmalardan farklı olarak geometrik parametrelerin meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmelere etki düzeyleri varyans analizi yapılarak ortaya konulmuştur. Yapılan çalışma KCS tasarımı yapan sanayi kuruluşlarına ve konuyla ilgili akademik çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, iki katmanlı olarak imal edilen kalın cidarlı silindirlerde, tasarım parametrelerinin, 350 MPa çalışma basıncı altında oluşan iç gerilmelere etkisi analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. İncelenen parametreler iç silindir yarıçapı ( $a$ ), iç ve dış silindir cidar kalınlıkları ve sıkı geçme toleranslarıdır. Şekil 2’de incelenen katmanlı silindirin şematik görüntüsü verilmiştir. Burada,  $a$ ; iç silindir iç yarı çapını,  $b$ ; iç silindir dış yarı çapını,  $c$ ; dış silindir dış çapını,  $\delta$ ; sıkı geçme toleransını  $p$ ; iç basıncı,  $p_0$  ise dış basıncı temsil etmektedir. Parametrelerin etki düzeyleri varyans analizi ile ortaya konulmuştur. Yine katmanlı olarak üretilen silindirlerin sıkı geçme tolerans değerlerine göre oluşan ara yüzey basınçları da analitik ve nümerik olarak belirlenmiştir.

Nümerik analizler ANSYS ve SOLIDWORKS SEA çözücülerini ile yapılmıştır. Nümerik sonuçlar, analitik sonuçlarla karşılaştırılarak her iki SEA çözücüsünün hata oranları tespit edilmiştir.



**Şekil 2.** İç içe sıkı geçmiş silindirlerin sıkı geçme toleransı ( $\delta$ ) ve sıkı geçirilmiş silindirlere etki eden ara yüzey basıncı

*Figure 2. Shrinkage allowance ( $\delta$ ) of compound cylinders and interface pressure acting on shrink fitted cylinders*

## Katmanlı Silindirlerde Gerilme Hesabı (Stress Calculation in Layered Cylinders)

Ultra yüksek basınçta çalışan KCS’lerde çok yüksek gerilme seviyeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler altında yapının hasar görmeden çalışabilmesi için uygun şekilde boyutlandırılması oldukça önemlidir. Katmanlı KCS’lerde silindirlerin sıkı geçirilmesi sonucunda oluşan temas basıncı, iç silindir yüzeylerinde basma yönünde ön gerilme oluşturmaktadır. İç kovanda basma gerilmesi şeklinde oluşan ön gerilme, basınç neticesinde oluşan çekme gerilmesini düşürmektedir. Ayrıca iç yüzeyde olabilecek mikro çatlakların da ilerlemesini engelleyerek yapının yorulma dayanımını artırmaktadır. Bu nedenle çok katmanlı silindirler, eş değer kalınlıktaki tek katmanlı silindire göre çok daha yüksek gerilmelere dayanabilmektedir. Katman sayısına maruz kalınan iç basınca göre karar verilmektedir. Katmanlı olarak

üretileen ve aralarında sıkı geçme alıştırma toleransı ( $\delta$ ) olan silindirler, birbirlerine ya preste ya da ısıtılarak geçirilmektedir. Ancak en çok kullanılan birleştirme işleminin ısıtılarak geçme işlemidir. Silindirlerin montajı için dış silindir ısıtılır ve içine iç silindir yerleştirilir. Montaj tamamlandıktan sonra soğumaya bırakılır. Bu esnada boyut farkından dolayı ara yüzeyde “sıkı geçme basıncı” ( $p$ ) denilen basınç ortaya çıkar (Ugural,1995).

Ara yüzey basıncının silindir iç yüzeyinde ön gerilme oluşturması silindirlerin yorulma ömürlerini ve dayanımlarını pozitif yönde etkilemektedir. Denklem 1’de iki silindirinin sıkı geçmesi sonucunda ortaya çıkan ara yüzey basıncının formülü görülmektedir (Harvey, 1984).

$$p = \frac{E \cdot \delta}{b} * \frac{(b^2 - a^2) * (c^2 - b^2)}{2 * b^2 * (c^2 - a^2)} \quad (1)$$

Kalın cidarlı silindirler iç ve dış basınçlara maruz kaldığında radyal ( $\sigma_r$ ) ve teğetsel ( $\sigma_t$ ) gerilmeler ortaya çıkar. Bu gerilmeler için Lamé eşitlikleri (Denklem 2 ve 3) kullanılmaktadır (Harvey, 1974).

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} * \left[ C_1 * (1 + \nu) - C_2 * \frac{1 - \nu}{r^2} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \nu^2} * \left[ C_1 * (1 + \nu) + C_2 * \frac{1 - \nu}{r^2} \right] \quad (3)$$

Eşitliklerdeki  $E$ , elastiklik modülü,  $\nu$  poisson oranı,  $C$  ise gerilme sabitidir.  $C_1$  ve  $C_2$  iç ve dış basınca göre değişen sabitler olup Denklem 5 ve 6’da gösterilmiştir. Analitik hesap yapılırken iç ve dış basınca göre sabitler değişmektedir.

$$C_1 = \frac{1 - \nu}{E} * \frac{a^2 * p_i - b^2 * p_0}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1 - \nu}{E} * \frac{a^2 * b^2 * (p_i - p_0)}{b^2 - a^2} \quad (6)$$

Burada,  $a$  iç silindir iç yarı çapını,  $b$  iç silindir dış yarı çapını,  $p_i$  iç basıncı,  $p_0$  ise dış basıncı gösterir.  $C_1$  ve  $C_2$  değerleri Denklem 2 ve 3’te yerine koyulduğunda radyal ve teğetsel gerilmeler;

$$\sigma_r = \frac{(a^2 * p_i) - (b^2 * p_0)}{b^2 - a^2} - \frac{(p_i - p_0) * a^2 * b^2}{r^2 * (b^2 - a^2)} \quad (7)$$

$$\sigma_t = \frac{(a^2 * p_i) - (b^2 * p_0)}{b^2 - a^2} + \frac{(p_i - p_0) * a^2 * b^2}{r^2 * (b^2 - a^2)} \quad (8)$$

elde edilmektedir.

### Katmanlı Silindirlerin Lineer Statik SEA’ları (Linear Static FEA’s of Layered Cylinders)

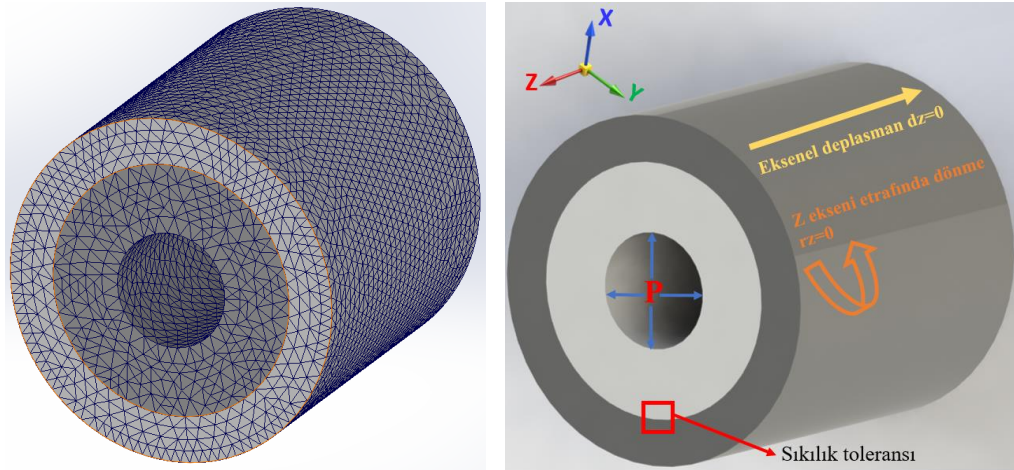
Bu çalışmada KCS’lerin tasarımında Sonlu Elemanlar Analizlerinin (SEA) kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak boyutlar sabit tutularak Çizelge 1’de verilen sıkı geçme toleranslarında ara yüzey basınçları belirlenmiş ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonraki analizlerde iç basınç altındaki KCS’lerde oluşan maksimum gerilmeye geometrik parametrelerin etkisi tespit edilmiştir. KCS’ler Solidworks yazılımında geometrik olarak modellendikten sonra 0.2-2 mm aralığında tetragonal elemanlara ayrılmıştır. Ansys yazılımında ise 2 mm hexagonal elemanlara ayrılmıştır. Sonrasında malzeme, sınır şartlar ve basınç parametreleri tanımlanmıştır (Şekil 3). Malzemeler izotropik lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir. Modellemede sınır şartı belirlenirken; silindirlerin eksen ve dönme doğrultusunda hareketleri kısıtlanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda iç silindir daha sert, dış silindir daha

sünek malzemeden seçilmektedir. Bu çalışmada, iç silindir AISI 4340 ıslah çeliği, dış silindir St52 genel imalat çeliği olarak düşünülmüştür. Ancak lineer statik SEA'da malzeme elastisite modülü ve poisson oranı değerleriyle modellendiği için her iki malzeme için de aynı değerler kullanılmıştır. Burada malzemelerin farklılığı, meydana gelen gerilmelerin akma mukavemetleriyle kıyaslanması noktasında dikkate alınmaktadır.

**Çizelge 1.** Sıkı geçme prosesinde kullanılan parametreler

*Table 1. Parameters used in shrink-fit process*

İç silindir iç yarıçapı, a (mm)	25
İç silindir dış yarıçapı, b (mm)	55
Dış silindir dış yarıçapı, c (mm)	85
Boy (mm)	150
Sıkı geçme toleransı ( $\delta$ ) (mm)	0.03, 0.06, 0.09



**Şekil 3. a)** Katmanlı silindirlerin sonlu elemanlarına ayrılması **b)** Uygulanan sınır şartları

*Figure 3. a) Meshing of layered Cylinders b) Boundary conditions*

Malzeme olarak elastik malzeme modeli kullanılmış olup çekme testi sonucunda elde edilen akma gerilmesi, çekme gerilmesi, elastiklik modülü ve poisson oranı değerleri programlara tanıtılmıştır. Analizler yapılırken silindirlerin aksel ve dönme yönünde hareketi sabitlenmiştir. Tasarlanan geometriler SEA programlarındaki sıkı geçme komutu ile birbirine montaj edilmiştir. Basınç tanımı iç silindirin iç yüzeyindeki tüm elemanlara uygulanmıştır. Analizlerde doğruluğu sağlamak için aynı silindirler üç farklı sıkılık toleransı (0.03, 0.06 ve 0.09 mm) montaj edilmiş ve Denklem 2'de verilen formül ile hesaplanan analitik sonuçlarla doğrulanması yapılmıştır.

### **İç Basınç Altındaki Katmanlı Silindirlerin Lineer Statik Analizi (Linear Static Analysis of Layered Cylinders Under Internal Pressure)**

Katmanlar arası oluşan basınç analizlerinden sonra iç içe geçmiş iki katmanlı KCS'lerin yüksek iç basınç altında davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda, 350 MPa basınç altında iç içe geçmiş KCS'lerin Von Mises eşdeğer gerilmeleri SEA ile hesaplanmıştır. Nümerik olarak elde edilen sonuçlarla Denklem 7 ve 8 ile hesaplanan analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Basınç altında maksimum gerilme silindir iç yüzeyinde meydana gelmektedir. Maksimum gerilmeler, silindirin iç yüzeyindeki tüm elemanların von-Mises eşdeğer gerilme değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Analizlerdeki parametreler iç silindir çapı, iç cidar kalınlığı, dış cidar kalınlığı ve sıkı geçme toleransı olarak belirlenmiştir. SEA ve analitik sonuçları karşılaştırmak için Çizelge 2'de görülen 4 parametre ve her bir parametrenin de üç

düzeyi için Taguchi L<sub>9</sub> deney tasarım matrisine göre analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece SEA yazılımları dokuz farklı tasarım için doğrulanmıştır. Taguchi yöntemi sadece nümerik çalışmaların analitik sonuçlarla doğrulanması için uygulanmıştır. İstatistiksel analizlerde tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Böylece Taguchi tasarımında kullanılmamış olan parametre seviyelerinden kaynaklanan belirsizlikler de ortadan kaldırılmıştır. Taguchi L<sub>9</sub> deney tasarım çizelgesi Çizelge 3'te verilmiştir.

#### Parametre Etkilerinin Regresyon ve Varyans Analizleriyle Belirlenmesi (Determination of Parameter Effects by Regression and ANOVA Analysis)

KCS tasarımında geometrik parametrelerin etkisi Çizelge 2'de görülen parametre seviyeleri ile tam faktöriyel analitik hesaplamalar yapılarak belirlenmiştir. Böylece 4 parametre ve 3 seviye için toplamda 81 sonuç elde edilmiştir. Sonuçlara regresyon ve varyans analizleri uygulanarak parametrelerin sonuçlar üzerindeki anlamlılığı ve etki seviyesi belirlenmiştir.

Çizelge 2. Deney parametre ve seviyeleri

Table 2. Experiment parameters and their levels

Parametreler	Parametre Seviyeleri		
	1	2	3
İç silindir iç yarıçapı (a) (mm)	17.5	25	32.5
İç silindir cidar kalınlığı (mm)	15	30	45
Dış cidar kalınlığı (mm)	15	30	45
Tek taraflı sıklık toleransı	0.03	0.06	0.09

Çizelge 3. Taguchi L<sub>9</sub> Deney parametreleri ve ölçüleri

Table 3. Taguchi L<sub>9</sub> experiment parameters and dimensions

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri			
	İç silindir iç yarıçapı (a) (mm)	İç silindir cidar kalınlığı (mm)	Dış silindir cidar kalınlığı (mm)	Tek taraflı sıklık toleransı
1	17.5	15	15	0.03
2	17.5	30	30	0.06
3	17.5	45	45	0.09
4	25	15	30	0.09
5	25	30	45	0.03
6	25	45	15	0.06
7	32.5	15	45	0.06
8	32.5	30	15	0.09
9	32.5	45	30	0.03

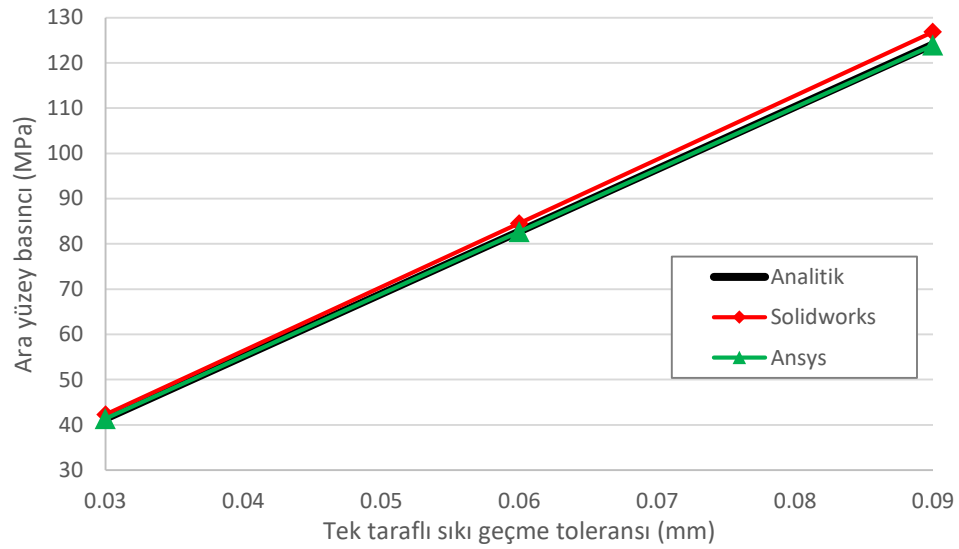
#### SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışmada ilk olarak katmanlı KCS'lerin, üç farklı sıklık toleransı ile sıkı geçme işlemi sonucunda oluşan ara yüzey basıncının analitik ve nümerik olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra, silindirlere 350 MPa iç basınç uygulayıp iç silindirde oluşan eşdeğer gerilmelerin analitik hesabı yapılmıştır ve tasarım parametrelerinin etki düzeyleri varyans analizi ile belirlenmiştir.

#### Katmanlı Silindirlerin Sıkı Geçme Prosesi (The Shrink-Fit Process of Layered Cylinders)

Üç farklı sıklık toleransı ile yapılan sıkı geçme süreci analizleri sonucunda elde edilen ara yüzey basınçları Şekil 4'te verilmiştir. Ansys yazılımı ile Analitik sonuçlar birbiriyle oldukça uyumlu çıkmıştır.

Solidworks yazılımından elde edilen sonuçların ise analitik sonuçlardan bir miktar farklı olduğu görülmektedir. Çizelge 4'te sıklık değerine göre değişen gerilme değerlerinin karşılaştırması ve analitik ve nümerik sonuçlar arasındaki sapma oranları gösterilmiştir. Ansys programı ile analitik değerler arasındaki fark ortalama % 0.05 olarak belirlenirken Solidworks yazılımında bu fark ortalama %2.28'ye çıkmıştır. Her ne kadar Solidworks yazılımındaki sapma oranı bir miktar daha fazla çıksa da %98'e yaklaşan bir doğruluk değeri SEA'ler için oldukça yeterlidir.



Şekil 4. Tek taraflı sıklık değerlerine göre ara yüzey basınç değerleri karşılaştırması

Figure 4. Comparison of interface pressure values according to shrinkage allowance

Çizelge 4. Ara yüzey basınçlarının doğrulanması ve sapma oranı hesabı

Table 4. Verification of interface pressures and deviation ratios

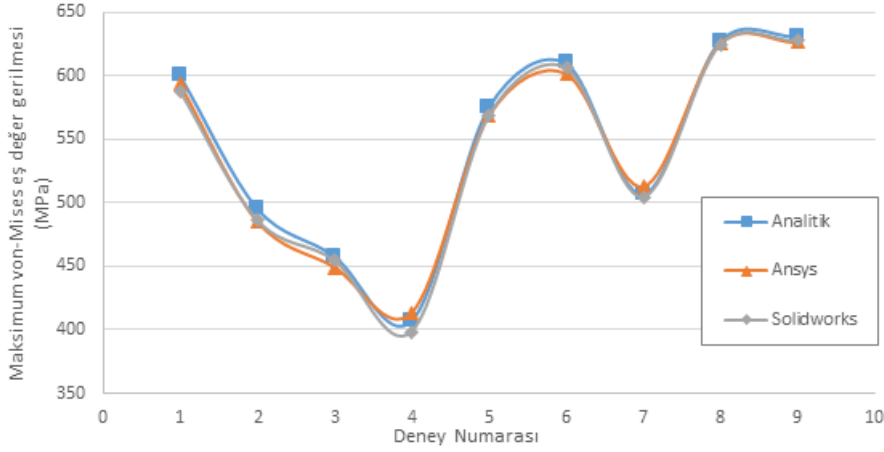
Sıklık Toleransı (mm)	ANSYS	SOLIDWORKS	Analitik	Sapma Oranı (ANSYS) (%)	Sapma Oranı (SOLIDWORKS) (%)
	p (MPa)	p (MPa)	p (MPa)		
0.03	41.342	42.31	41.34	0.005	2.346
0.06	82.65	84.55	82.69	0.048	2.249
0.09	123.89	126.8	124.03	0.113	2.233
<b>Ortalama</b>				<b>0.05</b>	<b>2.28</b>

#### İç Basınç Altında Katmanlı Silindirlerin Gerilme Analizleri (Stress Analysis of Layered Cylinders Under Internal Pressure)

Katmanlı silindirlerin iç yüzeyine 350 MPa basınç uygulandıktan sonra analitik ve nümerik olarak hesaplanan maksimum gerilmeler Şekil 5'te karşılaştırılmıştır. SEA'lardan farklı geometrik ölçülerdeki silindir tasarımlarında hesaplanan gerilmeler analitik sonuçlarla oldukça uyumlu çıkmıştır. SEA'nın tahmin başarısı literatürde katmanlı KCS tasarımıyla ilgili Öztürk, 2010; Zhang ve diğ., 2000; Parades ve diğ., 2010; Campos ve diğ., 2019 tarafından yapılan çalışmalarla benzer seviyede elde edilmiştir. Her iki SEA yazılımı için analitik değerlerden sapma oranları Çizelge 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Solidworks yazılımında sapma oranı % 1.1, Ansys yazılımında %1.3 değerinde çıkmıştır. Solidworks'ün gerilme değerini tahmindeki başarısı ara yüzey basınç değerinin tahminine göre artmış ve sapma oranı



Ansysis ile neredeyse aynı olmuştur. Buradan KCS'lerin lineer statik SE analizlerinde Solidworks yazılımının profesyonel SEA yazılımlarıyla aynı derecede güvenilirlik sunabildiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5. İç basınç altında silindirlerin gerilme analizi

Figure 5. Stress analysis of cylinders under internal pressure

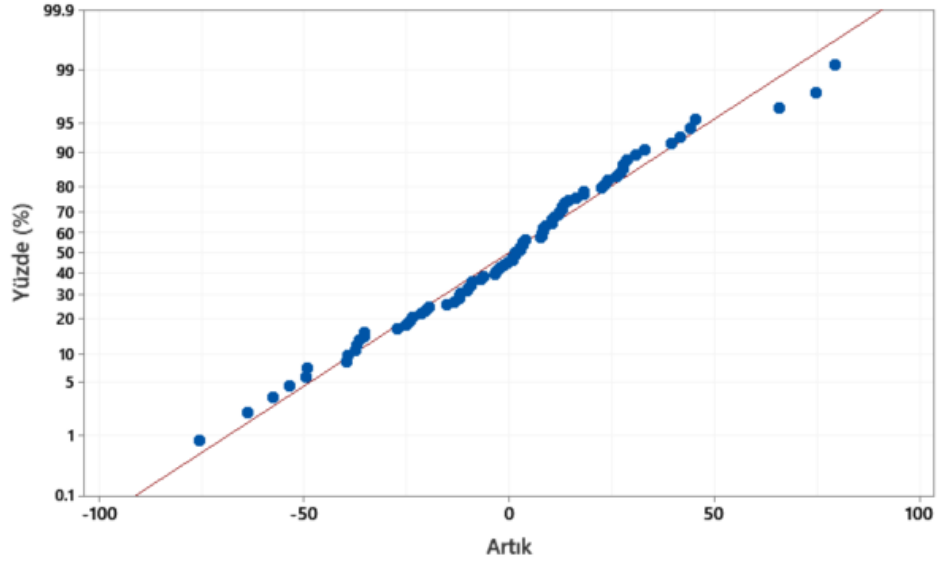
Çizelge 5. Taguchi L<sub>9</sub> tablosuna göre elde edilmiş eşdeğer gerilmeler

Table 5. Equivalent stresses obtained according to the Taguchi L<sub>9</sub> DOE

Deney No	Analitik (MPa)	Ansys (MPa)	Solidworks (MPa)	Ansys Sapma (%)	Solidworks Sapma (%)
1	600.6	593.5	587.9	1.2	2.1
2	495.7	485.2	486.1	2.1	1.9
3	458.0	449.0	454.4	2.0	0.8
4	406.8	412.9	398.1	1.5	2.1
5	574.9	568.4	568.1	1.1	1.2
6	610.0	601.7	606.3	1.4	0.6
7	506.7	512.6	504.5	1.2	0.4
8	627.2	625.2	624.6	0.3	0.4
9	631.0	626.3	627.5	0.7	0.6
<b>Ortalama</b>				<b>1.3</b>	<b>1.1</b>

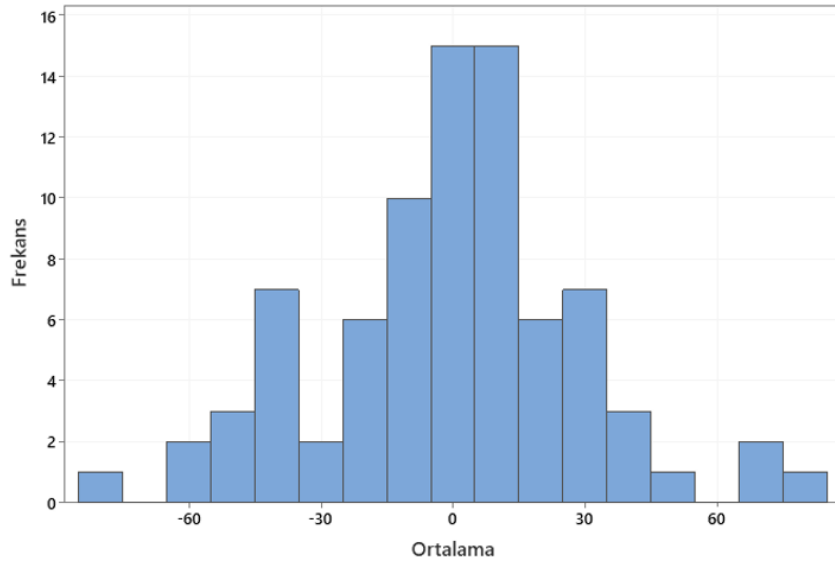
### Geometrik Parametrelerin Etki Sonuçları (Effect Results of Geometric Parameters)

350 MPa gibi ultra yüksek iç basınçta çalışan katmanlı KCS'lerde oluşan gerilmelerin hesabı ve tasarım esnasında hangi parametrenin bu gerilmeler üzerinde ne kadar etkili olduğunu bilmek önemlidir. Bu çalışmada, belirlenen dört parametrenin silindir iç yüzeyindeki maksimum eşdeğer gerilmeye etkilerini detaylı incelemek için tam faktöriyel deney tasarımına göre elde edilen sonuçlara regresyon ve varyans analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda oluşan regresyon eğrisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Sonuçların, regresyon denkleminde türetilen regresyon eğrisine yakınsadığı görülmektedir. Bu da sonuçların deney sistemi üzerinde anlamlılığını göstermektedir.



Şekil 6. Regresyon analizi sonucunda oluşan regresyon eğrisi  
Figure 6. Regression curve plotted as a result of regression analysis

Şekil 7’de ise deney sonuçlarından üretilen normal dağılım histogram grafiği verilmiştir. Histogram üzerine normal dağılım eğrisi yerleştirildiğinde sonuçların istatistiksel olarak mantıklı olduğu ve normal dağılımda seyrettiği görülmektedir. Regresyon analizi sonucu sistemin güvenilirliğini temsil eden R-square (adj) değeri %87.4 çıkmıştır. Mühendislik problemlerinde %70 ve üstü değerler kabul edilebilir olmakla birlikte %87.4 sistemin büyük oranda güvenilir olduğunu net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 7. Regresyon analizi sonucunda oluşan histogram normal dağılım grafiği  
Figure 7. Normal distribution histogram graph obtained from regression analysis

Regresyon analizlerinden sonra, tam faktöriyel deney tablosu sonuçlarına varyans analizi uygulanmıştır. Sonuçlar doğrultusunda oluşan varyans analiz çizelgesi Çizelge 6’da verilmiştir. Varyans analizi ile her bir parametrenin iç gerilmelere olan katkı yüzdeleri, etki ve anlamlılık testleri olan f-testi ve p-testi sonuçları hesaplanabilmektedir. Anlamlılık testi sonucu olan p-değerleri tüm parametreler için istatistiksel anlamlılık sınırı olan 0.05 değerinden çok daha düşük seviyede çıkmıştır. Bu da deney parametrelerinin ve seviyelerinin sonuçlar üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir.

Sonuçlara göre en etkili parametre %32.7 ile sıkı geçme toleransı olmuştur. Hassas ve çok küçük ölçüler olan sıklık toleransının ve ara yüzeyde oluşturduğu basıncın katmanlı KCS tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametre olduğu anlaşılmıştır. Sıklık toleransından sonra maksimum eşdeğer gerilmeye sırasıyla dış cidar kalınlığı %27.5, iç silindir iç yarıçapı %22.3 ve iç silindir cidar kalınlığı %6.2 oranla etki etmiştir. İç basınca maruz kalan katmanlı silindirlerde, emniyet ve gerilme açısından iç silindir cidar kalınlığının artırılması alınacak önlemlerden ilki gibi düşünülse de sıklık toleransı ve dış silindir cidar kalınlığının çok daha önemli olduğu görülmektedir.

**Çizelge 6.** Kullanılan parametre ve maksimum gerilmelere etki yüzdeleri

Table 6. Used parameter and percentages of influence on maximum stresses

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Etki Yüzdesi	Ortalama Kareler	F değeri	P değeri
İç silindir iç yarıçapı (mm)	2	136571	%22.28	68285	70.93	< 0.001
İç silindir cidar kalınlığı (mm)	2	38039	%6.21	19020	19.76	< 0.001
Dış silindir cidar kalınlığı (mm)	2	168484	%27.49	84242	87.50	< 0.001
Tek taraflı sıklık toleransı	2	200433	%32.71	100216	104.09	< 0.001
<b>Hata</b>	72	69317	%11.31	963		
<b>Toplam</b>	80	612844	100.00%			

Tam faktöriyel deney tasarım tablosuna göre, analitik olarak hesaplanmış eş değer gerilmelere parametre seviyelerinin etki grafikleri Şekil 'de gösterilmiştir. İç silindir iç yarıçapı artarken maksimum gerilme beklenildiği şekilde artmıştır. İç silindir iç yarıçapı kullanılacağı sistemin kapasitesi açısından sabit bir değere sahipse özellikle dış silindir cidar kalınlığı ve sıklık toleransının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. İç silindir cidar kalınlığının etkisi daha az olmakla birlikte cidar kalınlığını artırmak maksimum eşdeğer gerilme değerinde de artışa neden olmaktadır. Bunun nedeni iç silindir cidar kalınlığı arttıkça dış silindir cidar kalınlığının da küçülmesi ve bu nedenle iç silindirde oluşan basma gerilmesinin azalmasıdır. Dolayısıyla iç silindir cidar kalınlığını artırmak gerilme açısından avantajdan çok dezavantaja dönüşmektedir. Bu nedenle basınçlı silindir tasarımı yapılırken emniyet açısından iç silindir cidar kalınlığını büyük yapmaktan ziyade bilakis iç silindir cidar kalınlığını azaltmak gerekmektedir. Ancak iç silindir cidar kalınlığı azaldıkça dış silindirde oluşan eşdeğer gerilme artmaktadır. Bu nedenle iç silindir cidar kalınlığının dış silindirde akma oluşturmayacak ölçülerde olmasına dikkat edilmelidir. Böylece iç silindir malzemeleri pahalı olduğu için maliyet açısından da büyük avantaj elde edilmiş olur.

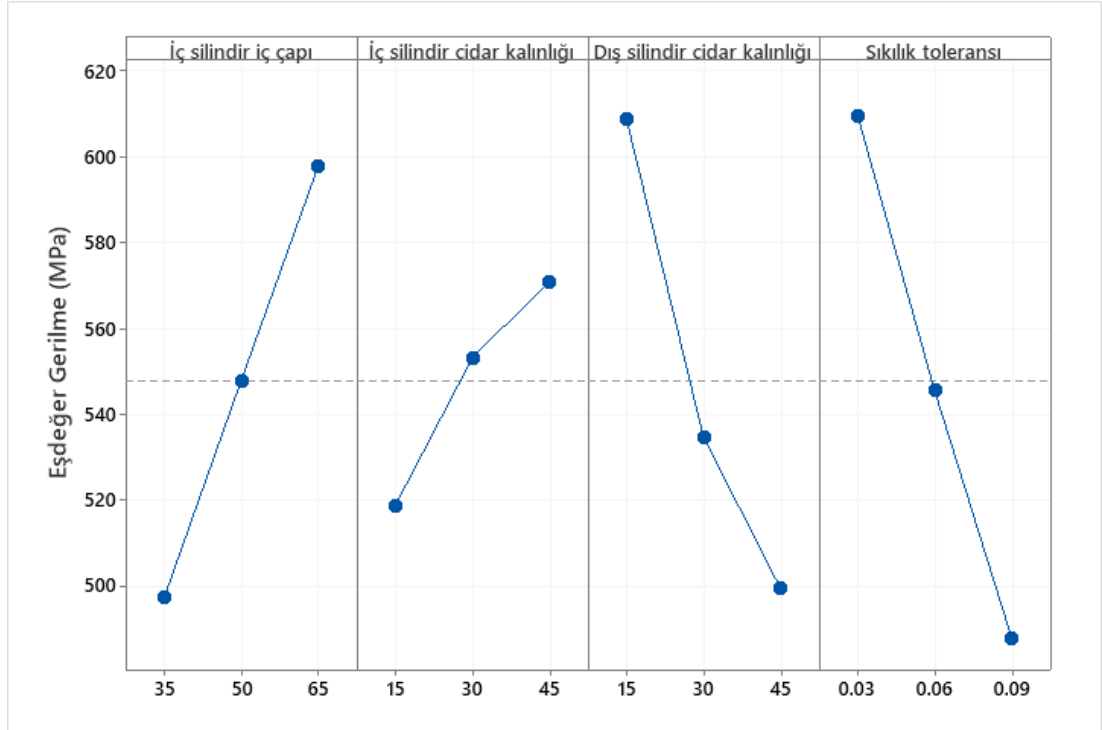
Dış silindir cidar kalınlığı arttığında iç silindirde oluşan basma gerilmeleri de artmaktadır. Bu basma gerilmeleri yüksek basınçtan kaynaklanan çekme gerilmelerini sönmülediğinden dış silindir cidar kalınlığının artmasıyla iç silindirde oluşan eş değer gerilme azalmaktadır. Bu da çevrimsel yükleme altında çalışan sistemde en kritik bölge olan silindir iç yüzeyinin ortalama gerilmesini azaltmakta ve böylece yorulma ömrünü artırmaktadır. Ancak malzeme maliyeti açısından optimum cidar kalınlığının tercih edilmesi gerekmektedir.

En etkili parametre olan tek taraflı sıklık toleransı artarken, iç silindir iç yüzeyinde oluşan ortalama gerilme önemli oranda azalmaktadır. Bunun sebebi, sıklık toleransı artarken silindirlerin ara yüzeyinde meydana gelen basıncın artmasıdır. Bu basınç iç yüzeyde önemli oranda basma gerilmeleri oluşturmaktadır. Basma gerilmeleri de çevrimsel iç basınç nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini azaltarak ortalama gerilme seviyesini düşürmektedir. Bu da, iç silindir yorulma ömrünü artırmaktadır.

Parametrelerin iç silindirde oluşan gerilmelere etkisi genel olarak değerlendirildiğinde tasarım açısından silindir cidar kalınlıklarını artırmak yerine daha az maliyetli olan sıklık toleranslarını değiştirerek hedeflenen iç gerilmelerin elde edilmesinin çok daha uygun bir çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Katmanlı KCS tasarımında amaç en az gerilmeyi verecek bir tasarım yapmak olduğu için seçilen parametre seviyelerinde optimum değerler 35 mm iç silindir çapı, 15 mm iç silindir cidar kalınlığı, 45 mm

dış silindir cidar kalınlığı ve 0.09 mm tek taraflı sıklık için elde edilmiştir. Bu seviyelerde iç silindir iç yüzeyinde oluşan gerilme 311 MPa olmuştur.



Şekil 8. Parametre ve seviyelerinin iç silindir gerilmelerine etkileri

Figure 8. Effects of parameters and levels on inner cylinder stresses

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ultra yüksek basınç altında çalışan KCS tasarımına etki eden geometrik parametreler araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak farklı sıklık toleranslarında meydana gelen ara yüzey basıncı ile iç basınç altında silindirlerde oluşan gerilmeler analitik ve nümerik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Ardından iç silindir çapı, iç ve dış silindir cidar kalınlıkları ile tek taraflı sıkı geçme toleransının, 350 MPa basınçta silindirlerde meydana gelen eşdeğer gerilmelere etkisi incelenmiştir. Her bir parametre için üçer düzey belirlenerek tam faktöriyel deney tasarım tablosu oluşturulmuş ve analitik olarak 81 adet tasarımın gerilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar regresyon ve varyans analizleriyle değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Katmanlı silindirlerin farklı toleranslardaki sıkı geçme işlemi Ansys ve Solidworks yazılımında nümerik olarak incelendiğinde meydana gelen ara yüzey basıncının ortalama olarak Solidworks yazılımında %2.28, Ansys yazılımında ise %0.06 oranında analitik değerden farklı olduğu bulunmuştur. Her ne kadar Solidworks yazılımındaki sapma oranı bir miktar daha fazla çıksa da %98'e yaklaşan bir doğruluk değeri SEA'ler için oldukça yeterlidir.
- Yazılımların, farklı geometrik ölçülerdeki KCS'lere iç basınç uygulandığında meydana gelen gerilme değerlerini tahmin etme başarısı Taguchi L<sub>9</sub> deney matrisine göre araştırıldığında Solidworks yazılımının %1.13, Ansys yazılımının %1.27 hata payı ile gerilmeleri başarıyla tahmin ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Yazılımların hem kendi aralarındaki hem de analitik sonuçlarla arasındaki bu fark eleman boyutu, çözücü ve matematiksel modellerden kaynaklanabilmektedir. Bu hata oranları kabul edilebilir ve oldukça başarılı değerlerdir.

- Parametrelerin etkisini analiz etmek için tam faktöriyel deney tasarımına göre analitik olarak hesaplanan gerilme değerlerine regresyon ve varyans analizi yapıldığında regresyon analizi sonuçlarının normal dağılımda olduğu ve yapılan hesaplamaların anlamlılığı ortaya konulmuştur. Varyans analizi sonuçlarına göre iç silindirde oluşan maksimum eşdeğer gerilme üzerine en etkili parametre %32.7 ile sıklık toleransı olmuştur. Diğer parametrelerin etki oranlarının ise sırasıyla, dış silindir cidar kalınlığı için %27.5, iç silindir iç yarıçapı için %22.3 ve iç silindir cidar kalınlığı için %6.2 olduğu bulunmuştur. Buradan KCS tasarımında silindir cidar kalınlıklarını artırmak yerine daha az maliyetli olan sıklık toleranslarını değiştirerek hedeflenen iç gerilmelerin elde edilmesinin çok daha uygun bir çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Parametre seviyelerinin etkileşim grafiklerine göre dış silindir cidar kalınlığı ve sıklık toleransı artarken maksimum eşdeğer gerilmede büyük oranda azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi ara yüzeyde oluşan basıncın iç basınçla oluşan eşdeğer çekme gerilmelerini düşürmesidir. İç silindir çapı arttıkça toplam eşdeğer gerilme de beklenildiği şekilde artmıştır. İç silindir cidar kalınlığını artırmanın yine eşdeğer gerilme değerini artırdığı bulunmuştur. Bu nedenle KCS tasarımında yüksek mukavemetli ve pahalı olan iç silindir malzemesinin dış silindirde akma oluşturmayacak minimum ölçülerde alınmasının hem maliyet hem emniyet açısından çok daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

#### KAYNAKÇA (REFERENCE)

- Aydın. M., Yapan Y.F., Türköz M., "Investigation on Effect of Shrinkage Allowance to the Fatigue Life of Compound Cylinders Operating at High Pressure", *International Conference on Engineering Technologies*, 370-373, Konya, 19-21 November 2020
- Aydın M., Türköz M., "Effect of Shrink Fit Process on Total Equivalent Stress and Total Amount of Material", *International Conference on Engineering Technologies*, 405-408, Konya, 18-20 November 2021
- Benuzzi D. ve Donzella G. "Prediction of the press-fit curve in the assembly of a railway axle and Wheel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit* 218(1):51-65 (2004)
- Campos, U. A. ve Hall, D. E., "Simplified Lamé's equations to determine contact pressure and hoop stress in thin-walled press-fits", *Thin-Walled Structures*, 138, 199-207. (2019)
- Geren N., Tunç T., "Su jeti Kesme Sistemlerinde Kullanılan Basınç Arttırıcılarda Gerilme Analizleri ve Tasarım Sınırları", *Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, Ankara , Eylül 2000
- Harvey, J. F., 1974, *Theory and Design of Modern High Pressure Vessels*, Van Nostrand, Princeton.
- Öztürk F., W.O.O. Tse-Chien, Simulations of interference and Interfacial pressure for three disk shrink fit assembly, *Gazi Univ. J. Sci.* 23 (2) (2010) 233–236.
- Ozturk, F., 2011, "Finite-element modelling of two-disc shrink fit assembly and an evaluation of material pairs of discs", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 225, No. 2, pp. 263–273
- Özel, A., Temiz, Ş., Aydın, M. D., ve Şen, S., 2005, "Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method", *Materials & design*, Vol. 26 No. 4, pp.281-289.
- Paredes, M., Nefissi, N. ve Sartor, M., 2012, "Study of an interference fit fastener assembly by finite element modelling, analysis and experiment", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, Vol.6, No.3 pp. 171–177
- Ugural, A. C. and Fenster, F. K., 1995, *Advanced strength and applied elasticity*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Zhang, Y., McClain, B., ve Fang, X. D., 2000, "Design of interference fits via finite element method" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.42 No.9, pp.1835-1850.
- Wang, X., Lou, Z., Wang, X., Hao, X., ve Wang, Y. 2019, "Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(8), 2834-2846.