

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA ÇENTİK ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Nazlı Aşkın ARIKAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA ÇENTİK ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Nazlı Aşkın ARIKAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA ÇENTİK ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Nazlı Aşkın ARIKAN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA ÇENTİK ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Nazlı Aşkın ARIKAN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 07/02/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Volkan KOVAN (Danışman)

Dr. Öğretim Üyesi Murat ÖZENÇ

Dr. Öğretim Üyesi Recep YURTSEVEN

ÖZET

SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA ÇENTİK ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Nazlı Aşkın ARIKAN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Ocak 2023; 31 sayfa

Makine elemanlarında, mil-göbek bağlantılarından bir tanesi sıkı geçme bağlantılarıdır. Sıkı geçme bağlantıları, yatak burçlarında, volanlarda, rulmanda, millere takılan pompa çarklarında, valf yuvalarında, dişli-mil bağlantıları gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir.

Çentik etkisi, bağlantı elemanlarında önemli bir problemdir. Çünkü bağlantının dayanımını azaltmaktadır. Bu sebeple, çentikler parçada bulunan hasar olarak da nitelendirilebilirler. Sıkı geçme bağlantılarında, mil ve göbeğin temas ettiği yüzeylerde, göbek kenarlarında çentik etkisi bulunmaktadır.

Bu çalışmada, sıkı geçme bağlantılarında çentik etkisinin sayısal olarak incelenmesi üzerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, sıkı geçme bağlantılarında deneysel, analitik ve sayısal incelemelerin yapıldığı görülmektedir. Fakat tez konusuna yönelik doğrudan yapılmış olan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışma kapsamında, mil-göbek bağlantısının modellemesi ve sayısal çözümlemesi ANSYS Student 2022 ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları elde edildikten sonra, çentik etkisi faktörü hesaplanmıştır.

Çalışma sonucunda, tasarımcılar sıkı geçme bağlantılarında belirtilen çaplar için hazırlanan tablolarda teorik gerilme yığılması faktörünü ve çentik etkisi faktörünü bulabileceklerdir.

ANAHTAR KELİMELE: Çentik etkisi, Mil-göbek bağlantıları, Sıkı geçme bağlantıları, Sonlu eleman analizi.

JÜRİ: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Dr. Öğretim Üyesi Murat ÖZENÇ

Dr. Öğretim Üyesi Recep YURTSEVEN

ABSTRACT

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE NOTCH EFFECT IN INTERFERENCE FIT CONNECTIONS

Nazlı Aşkın ARIKAN

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Volkan KOVAN

January 2022; 31 pages

One of the shaft - hub connections used in the machines is interference fitting connections. Interference fitting connections are preferred in various engineering applications such as plain bearing bushes, flywheels, roller bearings, pump impellers attached to shafts, valve seats, gear-shaft connections.

The notch effect is a major problem in connection elements. Because it reduces the strength of the connection. There is a notch effect in interference fitting connections, on the surfaces where the shaft and the hub come into contact, on the edges of the hub.

In this study, the numerical investigation of the notch effect in interference fitting connections was studied. When the literature are reviewed, it is seen that experimental, analytical and numerical studies have been carried out on interference fitting connections. However, no study has been found directly on the thesis topic.

In the scope of the study, modelling and numerical analysis of the shaft-hub connection were performed with ANSYS Student 2022. After the analysis results were obtained, the notch effect factor was calculated.

As a result of the study, designers will be able to find the theoretical stress concentration factor and the notch effect factor in the tables prepared for the diameters specified in the interference fit connections.

KEYWORDS: Finite element analysis, Interference fit connections, Notch effect, Shaft-hub connections.

COMMITTEE: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Asst. Prof. Dr. Murat ÖZENÇ

Asst. Prof. Dr. Recep YURTSEVEN

ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans tezi olarak hazırladığım “Sıkı Geçme Bağlantılarında Çentik Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışmamın bilim camiasına, mühendislik çalışmalarına, makine tasarımcıları ve imalatçılarına faydalı olmasını dilerim.

Aldığım bütün kararlarda arkamda duran, maddi manevi desteklerini esirgemeyen, beni koruyup kollayan, akademik hedeflerimin arkasında duran biricik babam Saffet ARIKAN’a ve varlığıyla huzur bulduğum, büyük destekçim biricik annem Kâmile ARIKAN’a hayatımın sonuna kadar minnettarım. Onlar olmasa olmazdı.

Lisans ve yüksek lisans eğitim sürecimde tez danışmanlığımı yapan, öğrenme çabasıyla sorduğum sorulara sabırla cevap veren, beni yetiştiren, akademisyen olarak çalışkanlığını örnek aldığım, beni destekleyen danışman hocam Prof. Dr. Volkan KOVAN’a teşekkürlerimi sunarım. O da olmasa olmazdı.

Hazırlamış olduğum yüksek lisans tez çalışmamı öncelikle aileme sonra da kendini geliştirmeye, okumaya, öğrenmeye meraklı, kendi ayakları üzerinde durmak için, idealleri için çabalayan, vatana, millete hayırlı bir akademisyen olmak için uğraşan tüm kadınlarımıza atfediyorum.

Gayret bizden, takdir ve tevhik Allah’tandır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	viv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Sıkı Geçme Bağlantılarının Hesap Yöntemleri	4
2.2. Sıkı Geçme Bağlantılarının Montajı.....	7
2.2.1. Pres geçme.....	7
2.2.2. Sıcak geçme.....	8
2.3. Momentin İletilebilmesi için Gereken Minimum Basınç	8
2.4. Göbeğin Hasar Görmemesi için Olması Gereken Maksimum Basınç	9
2.5. Teorik Gerilme Yığılması Faktörü ve Çentik Katsayısı.....	10
2.6. Mevcut Tez Çalışmasına Yönelik Yapılan Çalışmalar	12
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Mil ve Göbek Parçaların Katı Modellemesi.....	15
3.2. Mil ve Göbek Sıkı Geçme Bağlantısının Analizi	15
3.3. Mil ve Göbek Sıkı Geçme Bağlantısında Çentik Katsayısının Hesaplanması	18
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
4.1. Sıkı Geçme Bağlantılarında Analitik ve Sayısal Çözümlemeler Sonucunda Elde Edilen Gerilme Değerleri	21
4.2. Sıkı Geçme Bağlantısı için Teorik Gerilme Yığılması Faktörü ve Çentik Katsayısı Tablosu	23
4.3. Boyutsuzlaştırma	25
5. SONUÇLAR	27
6. KAYNAKLAR	29
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sıkı Geçme Bağlantılarında Çentik Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

30/12/2022

Nazlı Aşkın ARIKAN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

mm	: Milimetre
L	: Göbek ve milin uzunluğu
d	: Nominal çap
d_i	: Milin iç çapı
d_0	: Göbek dış çapı
J	: Joule
K_ϕ	: Çentik katsayısı
K_t	: Teorik gerilme yığılması faktörü
σ_{ort}	: Nominal gerilme
σ_{max}	: Maksimum gerilme
MPa	: Megapaskal
kg	: Kilogram
m^3	: Metreküp
m	: Metre
K	: Kelvin
W	: Watt
d_M	: Milin dış çapı
d_G	: Göbeğin delik çapı
S	: Sıklık
σ_T	: Teğetsel gerilme
σ_r	: Radyal gerilme
σ_{tGmax}	: Göbekteki maksimum teğetsel gerilme
δ	: Milin dış çapı ile göbeğin iç çapı arasındaki fark
o	: Göbek veya milin dışını gösteren indis

i	: Göbek veya milin içinin gösteren indis
r_0	: Göbeğin dış yarıçapı
R	: Göbeğin iç yarıçapı
r_i	: Milin iç yarıçapı
E	: Elastisite modülü
ν	: Poison oranı
M_s	: Sürtünme momenti
M_d	: Döndürme momenti
F_s	: Sürtünme kuvveti
μ	: Sürtünme katsayısı
p_{min}	: Minimum basınç
F_N	: Temas kuvveti
S_k	: Kaymaya karşı emniyet katsayısı
p_{gem}	: Göbeğin emniyetli yüzey basıncı değeri
q	: Çentik duyarlılık faktörü

Bu tez kapsamında ondalık ayırıcı olarak “,” kullanılmıştır.

Kısaltmalar

ASME	: Amerikan Makine Mühendisleri Birliği
FEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sıkı geçme bağlantısı ile parçaları birleştirmeden öncesi ve sonrası; a.) sıkı geçme bağlantısı ile parçaları birleştirmeden önce; b.) sıkı geçme bağlantısı ile parçaları birleştirme (Budynas vd. 2020)	4
Şekil 2.2. İç basınca maruz kalan kalın cidarlı bir silindirde teğetsel ve radyal gerilmelerin gösterimi; a.) teğetsel gerilme dağılımı; b.) radyal gerilme dağılımı (Budynas vd. 2020)	6
Şekil 2.3. Sıkı geçme bağlantısında meydana gelen gerilme ve basınç dağılımları (Steinhilper ve Sauer 2005).....	6
Şekil 2.4. Sıkı geçme bağlantısında gerilme dağılımı; a.) elastik sıkı geçme; b.) elastik- plastik sıkı geçme (Wittel vd. 2021)	7
Şekil 2.5. Sıcak geçme (shrink fit) yöntemi uygulanarak parçaların montajı (Booker ve Truman 2020)	8
Şekil 2.6. İş merdanesi sıkı geçme bağlantısında sürtünme sonucunda milde meydana gelen aşınma hasarı (MicMillan vd. 2016)	10
Şekil 2.7. Yüksek hızlı tren tekerlek ve aks sıkı geçme bağlantısında bağlantı yüzeyinde meydana gelen oksitlenmiş aşınma kalıntıları (Shu vd. 2022)	10
Şekil 2.8. Çentiğe yönelik tasarım önlemi (Wittel vd. 2021)	11
Şekil 2.9. Sıkı geçme bağlantılarında çentik etkisi sonucunda oluşan hasar (Anonim 1)	12
Şekil 3.1. Analizi gerçekleştirilen mil ve göbek parça	16
Şekil 3.2. Sıkı geçmeli mil-göbek bağlantısında oluşturulan ağ yapısı	17
Şekil 3.3. Mil için oluşan normal gerilme değerleri	17
Şekil 3.4. Göbek için oluşan normal gerilme değerleri	18
Şekil 3.5. Ortalama gerilme ve maksimum gerilme değerlerinin elde edildiği gerilme dağılımları; a.) mil için yüzeyde oluşan gerilme dağılımları; b.) göbek için yüzeyde oluşan gerilme dağılımları	19
Şekil 4.1. H7/p6 sıkı geçme toleransına göre nominal çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler	21
Şekil 4.2. H7/s6 sıkı geçme toleransına göre nominal çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler	22

Şekil 4.3. H7/u6 sıkı geçme toleransına göre nominal çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler	22
Şekil 4.4. Mil için boyutsuzlaştırılmış çentik katsayısı grafiği.....	26
Şekil 4.5. Göbek için boyutsuzlaştırılmış çentik katsayısı grafiği.....	26



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. AISI 4340 malzemenin mekanik özellikleri (Kovan 2018)	16
Çizelge 4.1. H7/p6 sıkı geçme toleransında belirtilen çaplara göre hem mil hem göbek için sayısal hesaplama sonrası oluşturulan teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerleri	23
Çizelge 4.2. H7/s6 sıkı geçme toleransında belirtilen çaplara göre hem mil hem göbek için sayısal hesaplama sonrası oluşturulan teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerleri.....	24
Çizelge 4.3. H7/u6 sıkı geçme toleransında belirtilen çaplara göre hem mil hem göbek için sayısal hesaplama sonrası oluşturulan teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerleri.....	24

1. GİRİŞ

Mil-göbek bağlantıları, tekerleğin icat edilmesinden itibaren kullanılan en eski makine elemanlarından biridir. Mil, dönen gövdelerden oluşan ve döndürme momentini iletmek için kullanılan makine elemanıdır. Göbek, milden gelen döndürme momentini, parçası olduğu makine elemanına veya benzer şekilde ters yönde iletmek için kullanılan makine elemanıdır. Böylelikle, mil-göbek bağlantıları döndürme momentini bir milden göbeğe veya bir göbekten mile aktarabilir. Mil-göbek bağlantılarında, temas eden aktif yüzey çiftleri ile döndürme momenti veya eksenel kuvvet iletilebilir (Kovan ve Tezel 2021).

Mil-göbek bağlantıları, kuvvet bağı, şekil bağı ve malzeme bağı ile döndürme momentini iletmeleriyle 3 gruba ayrılmaktadır. Kuvvet bağı mil-göbek bağlantıları, silindirik veya konik olarak çalışma yüzeyine teğet düzlemlerde etki eden sürtünme kuvvetleri vasıtasıyla moment veya güç iletmektedir. Şekil bağı mil-göbek bağlantıları, milden göbeğe veya göbekten mile çalışma yüzeyleri yardımıyla kuvvet veya moment iletmektedir. Malzeme bağı mil-göbek bağlantılarında ise mil ve göbek arasına bir ek malzeme aracılığıyla gibi ayrılmaz malzeme bağı kurularak moment veya güç iletilemektedir.

Kuvvet bağı mil-göbek bağlantıları kendi içlerinde alt gruplara ayrılarak sürtünme kuvvetleri aracılığıyla moment veya gücü iletmektedir. Bu bağlantı türlerinden bir tanesi sıkı geçme bağlantılarıdır. Sıkı geçme bağlantılarının kullanıldığı yerler, volanlar, kayış kasnaklar, şaftlı kaplinler, tekerlek gövdeli hareket ve dişli jantları, yataklardaki yatak burçları, dişli çarklar, rulmanların bilezikleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Wittel vd. 2021).

Sıkı geçme bağlantılarında, mil ve göbek parçanın birbirlerine göre az miktarda boyut fazlalığı bulunmaktadır. Mil ve göbek parçanın ölçü değerleri birbirine çok yakındır. Bu bağlantı türünde göbek çapı, mil çapından biraz küçüktür. Mil ve göbek parçanın sıkı geçme bağlantısı gerçekleştiğinde, ortak yüzeyde uniform bir bağlantı basıncı oluşarak darbeli torkların ve eksenel kuvvetlerin iletilmesi için bir bağlantı kuvveti üretilmektedir (Wittel vd. 2021).

Sıkı geçme bağlantılarının avantajlarına bakıldığında; diğer mil – göbek bağlantı türlerine göre ekonomik olması, imalatlarının kolay olması, darbeli moment ve tork iletebilmesi, küçük çaplardaki bağlantılar söz konusu olduğunda uygun kaması vb. bağlantı yöntemlerinin üretimindeki zorluklara karşı kullanım kolaylığı olarak sıralanabilir. Dezavantajlarına bakıldığında ise, sıkı geçme bağlantısı gerçekleştiğinde montajın çözülememesi, göbeğin genişlemesi gibi durumlar temel dezavantajlardır.

Makine elemanlarında çeşitli sebeplerden dolayı çentik, delik, kademe gibi geometrik şekiller bulunabilmektedir. Kesitin ani değişikliği, çentik, delik, kademe gibi süreksizlikler, düzensiz gerilme dağılımları, bazı durumlarda yüzey çizikleri gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Gerilme yığılmalarının oluşması parçada çentik etkisi vardır şeklinde değerlendirilebilir veya çentiklerin bir sonucu olarak da gerilme yığılmaları ortaya çıkabilir. Çentik etkisi, parçalarda kırılmalara ve bozulmalara yol açabilmektedir (Childs 2019).

Güç ve kuvvet iletiminin gerçekleştiği makine parçalarının hemen hemen hepsinde kırılmalar ve deformasyonlar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu kırılmaların ve deformasyonların oluşmaması için makine tasarımlarında çentik etkisini hesaba katmak gerekmektedir. Çentik etkisinin, tasarımdaki hesaplamalara dâhil edilmesi ile deformasyonlar ve kırılmalar en aza indirilebilir veya engellenebilir.

Makine elemanlarındaki çentik diplerinde hesaplanan nominal (ortalama) gerilmenin, K_σ (çentik katsayısı) katı kadar fazla gerilme (maksimum gerilme) meydana gelmektedir. Örneğin, bir makine parçasının çentik katsayısı 3 ise, bu parça çentiksiz olan parçaya göre üç kat daha kolay kırılmaktadır.

Çentik etkisi, çentik kenarlarındaki elastik deformasyonlardır. Bununla birlikte çentikler, bir hasar olarak da nitelendirilebilirler. Çentiğin keskinliğine bağlı olarak çentik katsayısı değerleri de 1 ile 5 arasında değerler alabilmektedir. Özellikle çentikler, dinamik yükler altında mukavemet azaltıcı etkiye sahiptirler (Steinhilper ve Sauer 2005).

Çentik katsayısı (K_σ), çentiksiz parçanın taşıyabildiği gerilme genliğinin, çentikli parçanın taşıyabildiği gerilme genliğine oranı olarak tanımlanabilir (Şekercioğlu, 2015). Denklem 1.1’de K_σ değerinin nasıl bulunabileceği gösterilmektedir.

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{G\text{çentiksiz}}}{\sigma_{G\text{çentikli}}} \quad (1.1)$$

Teorik gerilme yığılması faktörü (K_t), gevrek malzemelerde çentik katsayısı (K_σ) değerine yaklaşık eşit olarak alınabilir. Bazı araştırmacılar tarafından K_t ’den K_σ ’ye geçmek amacıyla yaklaşımlar önerilmiştir. En çok kullanılan yaklaşım Thum’un yaklaşımıdır (Şekercioğlu, 2015). Thum’un belirttiği çentik hassasiyet faktörü yani K_σ ’nin K_t ’ye yaklaşma derecesi Denklem 1.2’de gösterilmektedir.

$$q = \frac{K_\sigma - 1}{K_t - 1} \quad (1.2)$$

Denklem 1.2’deki q değeri, çentik yarıçapı (r) ve çekme dayanımı (R_m)’ye göre okunmaktadır (Şekercioğlu, 2015).

Mil-göbek bağlantılarında shaftın düzgün dağılımlı bir dış basınca sahip silindir, göbeğin düzgün dağılımlı bir iç basınca sahip silindir şeklinde davranmasıyla mil ve göbek üzerinde gerilmeler meydana gelmektedir. Oluşan gerilmeler, teğetsel ve radyal gerilmeler olarak ayrılmaktadır. Sıkı geçme bağlantılarında, sıkıştırılmış parçadan sıkıştırılmamış parçaya ani bir değişim söz konusu olduğunda, göbeğin mil ile temas ettiği keskin köşelerde gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Göbek ve milin teması gerilme yığılmalarına neden olan keskin bir kenar oluşturmaktadır (Biron vd. 2013). Bundan dolayı, göbek geometrisinin tasarımı, gerilme yığılması faktörünün değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir (Budynas vd. 2020). Bununla birlikte, milin göbeğin her iki tarafından çıkıntı yaptığı sıkı geçme bağlantılarında, milin göbekten çıktığı yerlerde daha yüksek bağlantı basınçları ve maksimum teğetsel gerilmeler meydana gelmektedir. Dış momentler veya kuvvetler, sıkı geçme bağlantısına dâhil edilirse, göbek boyunca basıncın eşit olmayan dağılımı meydana gelmektedir. Bu sebeple, çok geniş göbeklerin kullanımı tavsiye edilmemektedir. Ayrıca, mil için daha yüksek mukavemete sahip bir malzeme seçilmesi gereklidir. Ama yüksek mukavemete

sahip çeliklerin çentik hassasiyetlerinin de daha yüksek olduğuna dikkat edilmelidir (Niemann vd. 2005). Ayrıca, göbek ile milin temas ettiği göbek yuvasının olduğu yerde de gerilme yığılmalarının oluşması söz konusu olacağı için, milin güçlendirilmesi gibi önlemlerde alınmalıdır (Wittel vd. 2021).

Bu çalışmada, mil-göbek sıkı geçmeli bağlantıların çentik etkisi sonlu elemanlar yöntemine göre sayısal olarak incelenmeye çalışılmıştır. Bunun için, 25 mm'den 100 mm'ye kadar göbek dış çapına sahip, H7/p6, H7/s6, H7/u6 sıkı geçme toleranslarında, elastik bölgede çalışılarak, çentik katsayısı tablosu oluşturmak hedeflenmiştir. Böylelikle, bir makine tasarımcısı oluşturduğu mil-göbek sıkı geçmeli bağlantıların çapları (25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 mm) söz konusu olduğunda, hazırlanmış olan çentik katsayısı tablosundan faydalanabilecektir. Ayrıca, tasarımlarını bu tabloya göre de şekillendirebilecektir.

Aşağıda belirtildiği gibi bu tez, 5 bölümden oluşmaktadır:

1. bölümde, mil-göbek bağlantılarından sıkı geçme bağlantıları, çentik etkisi hakkında genel bilgilere, tezin amacı ve konusuna yer verilmiştir.

2. bölümde, mil-göbek bağlantılarından, sıkı geçme bağlantılarında gerilme hesaplamaları, yüzey basıncı hesaplamaları, sıkı geçme bağlantısının montajının nasıl yapıldığı, içi boş ve dolu mildeki gerilme hesaplamaları, elastik ve elasto-plastik davranışları, sıkı geçme bağlantılarında meydana gelen hasarlar, sıkı geçme bağlantılarında gerilme yığılmalarının, çentik etkisinin nerelerde meydana geldiği hakkındaki teorik bilgilere ve tez konusuyla ilişkili olarak daha önce yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

3. bölümde, sıkı geçme bağlantısının analizi için mil ve göbek parçaların katı modellemesi, analizi ve çentik katsayısı hesabının nasıl yapıldığına yönelik detaylı bilgilere yer verilmiştir.

4. bölümde, sayısal ve analitik hesaplama sonucunda elde edilen teorik gerilme yığılması faktörü, çentik katsayısı değerlerine ve gerilme değerlerine, boyutsuzlaştırmaya yer verilmiştir.

5. bölümde, tez çalışması için genel sonuçlara ve gelecek dönemlerde yapılacak olan çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Sıkı Geçme Bağlantılarının Hesap Yöntemleri

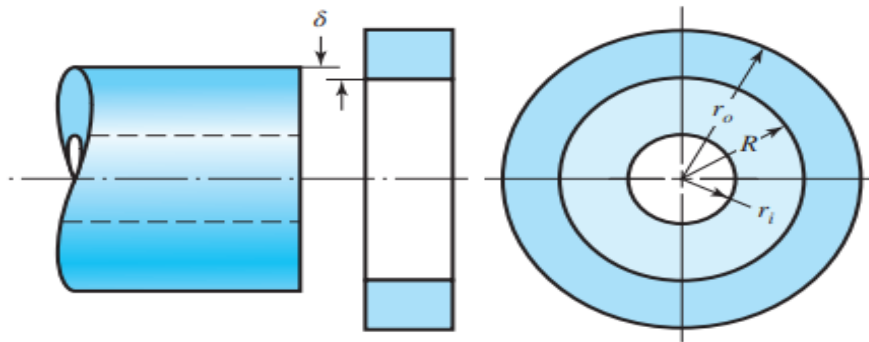
Sıkı geçme bağlantıları, mil-göbek bağlantılarından kuvvet bağı ilkesine göre çalışmaktadır. Bu bağlantıda, momenti iletebilmek için gereken basınç, çap farkı ile meydana gelmektedir. Bunun için, milin dış çapı (d_M), göbeğin delik çapından (d_G) biraz büyüktür. Göbek ve milin montajı gerçekleştiğinde bir sıkılık (S) meydana gelmektedir. Bu sıkılık kavramı, Denklem 2.1'deki gibi gösterilmektedir. Buna bağlı olarak da, temas eden yüzeylerde bir basınç oluşmaktadır (Akkurt 2005).

$$S = d_M - d_G \quad (2.1)$$

Mil ve göbeğin yüzeyinde meydana gelen basınç, her iki parçada da gerilmeler ve şekil değiştirmeler meydana getirmektedir. Meydana gelen gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin hesabı, elastisite biliminin iç ve dış basınç altında bulunan kalın cidarlı silindirler teorisine dayanmaktadır (Akkurt 2005). Buradaki gerilme değerleri, Lamé-Clapeyron tarafından geliştirilmiş ve Timoshenko tarafından daha ayrıntılı sunulmuştur. Lamé - Clapeyron denklemleri, elastik bölgedeki gerilmelerin hesabına dayanmaktadır. Malzemenin plastik bölgedeki çalışma aralığını dikkate almamaktadır. Özellikle, çapın küçüldüğü ve toleransın arttığı durumlarda geleneksel formülün kullanımında bu durum dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı FEM (sonlu elemanlar yöntemi) ile yapılan gerilme analizlerinin önemi ön plana çıkmaktadır (Kovan 2018; Madej ve Sliwka 2021). Ayrıca, Lamé - Clapeyron denklemi, göbek ve milin aynı uzunlukta olduğu bağlantılar için geçerli bir denklemdir. Mil, göbeğin her iki tarafından çıkıntı yaparsa, temas bölgesinin uçlarında meydana gelen gerilme yığılmaları Lamé denklemi ile değil; sonlu elemanlar analizi ile çözülebilir (Qiu ve Zhou 2016).

Kalın cidarlı bir silindirin iç veya dış basınca maruz kalması durumunda ve şekil değiştirmelerin elastik bölgede kalması durumunda teğetsel gerilmeler (σ_t) ve radyal gerilmeler (σ_r) meydana gelmektedir (Akkurt 2005). Bu çalışmada da, elastik bölgede olma durumu dikkate alınmıştır.

Sıkı geçme bağlantısı ile birleştirilmiş ve birleştirilmemiş iki silindirik parçanın görseline Şekil 2.1'de yer verilmektedir.



Şekil 2.1. Sıkı geçme bağlantısı ile parçaları birleştirmeden öncesi ve sonrası; **a.)** sıkı geçme bağlantısı ile parçaları birleştirmeden önce; **b.)** sıkı geçme bağlantısı ile parçaları birleştirme (Budynas vd. 2020)

Şekil 2.1'deki görsel dikkate alınarak denklemler oluşturulabilir. Görseldeki δ simgesi, milin dış çapı ile göbeğin iç çapı arasındaki farkı temsil etmektedir. Görseldeki gösterilmiş olan "o" ve "i" indisleri sırasıyla dış ve içi tanımlamaktadır. r_o simgesi, göbeğin dış yarıçapını, R simgesi, nominal yarıçapı, r_i simgesi, milin iç yarıçapını göstermektedir. Bu kısımdaki, oluşturulan denklemlerde ise yarıçap (r) değil, çap (d) dikkate alınarak denklemler oluşturulacaktır. Sıkı geçme bağlantısının mil ve göbeğin temas ettiği yüzeyde meydana gelen temas basıncı Denklem 2.2'de yer almaktadır. Bu denklemde, (d), nominal mil çapı, (d_i), milin iç çapı, (d_o), göbek dış çapını, (E), elastisite modülü, (ν), poisson oranını göstermektedir (Budynas vd. 2020).

$$p = \frac{\delta}{\frac{d}{E_o} \left(\frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} + \nu_o \right) + \frac{d}{E_i} \left(\frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} - \nu_i \right)} \quad (2.2)$$

Mil ve göbek parçanın malzemelerinin aynı olması durumunda temas basıncı denklemi, Denklem 2.3'teki gibi düzenlenebilir (Budynas vd. 2020).

$$p = \frac{E\delta}{2d^3} \left(\frac{(d_o^2 - d^2)(d^2 - d_i^2)}{d_o^2 - d_i^2} \right) \quad (2.3)$$

δ simgesi ile gösterilen milin dış çapı ile göbeğin iç çapı arasındaki fark, Denklem 2.4 ile maksimum boşluk değeri Denklem 2.5, minimum boşluk değeri Denklem 2.6 ile gösterilmektedir (Budynas vd. 2020).

$$\delta = d_{mil} - d_{göbek} \quad (2.4)$$

$$\delta_{maks} = d_{maks} - D_{min} \quad (2.5)$$

$$\delta_{min} = d_{min} - D_{maks} \quad (2.6)$$

Mil ve göbek arasında meydana gelen teğetsel gerilmeler, Denklem 2.7 ve Denklem 2.8 yardımıyla, radyal gerilmeler ise Denklem 2.9 ve Denklem 2.10 yardımıyla hesaplanmaktadır (Budynas vd. 2020).

$$\sigma_{t, mil} = -p \frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{t, göbek} = p \frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{r, mil} = -p \quad (2.9)$$

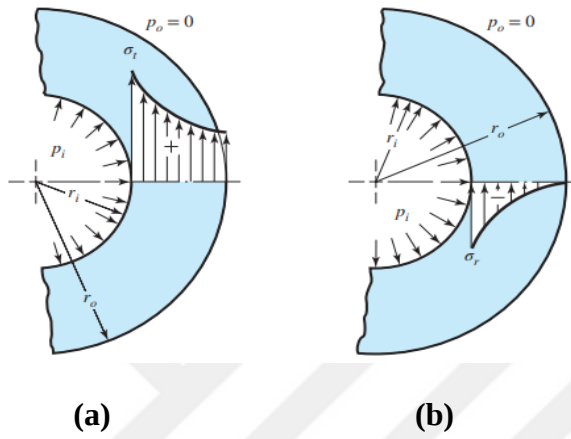
$$\sigma_{r, göbek} = -p \quad (2.10)$$

Dolu milde radyal ve teğetsel gerilmeler tüm kesit boyunca sabit ve eşittir

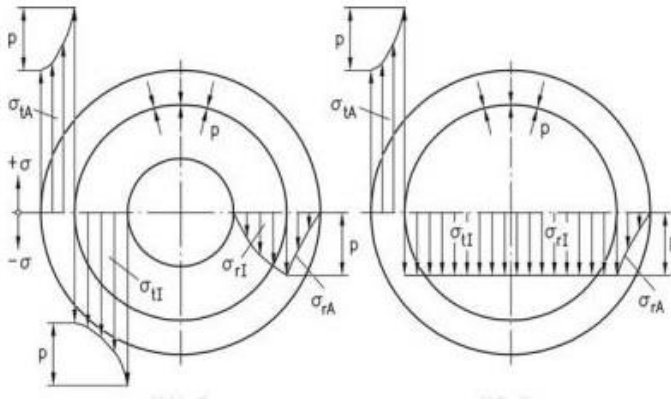
(Steinhilper ve Sauer 2005). Bahsedilen eşitlik, Denklem 2.11 ile gösterilmektedir.

$$\sigma_r = \sigma_t = -p \quad (2.11)$$

Göbekte en büyük gerilmeler, mil ile göbeğin temas ettiği iç çapta meydana gelmektedir. Bu bölgede, r yarıçaplı teğetsel gerilmenin büyüklüğü, radyal gerilmeden daha büyüktür. Ayrıca, teğetsel gerilmeler çekme gerilmeleri, radyal gerilmelerin basma gerilmeleri olduğu belirtilebilir (Steinhilper ve Sauer 2005). Teğetsel ve radyal gerilmelerin dağılımı ve işaretleri, iç basınca maruz kalan kalın cidarlı bir silindirde Şekil 2.2’de gösterilmektedir (Budynas vd. 2020).



Şekil 2.2. İç basınca maruz kalan kalın cidarlı bir silindirde teğetsel ve radyal gerilmelerin gösterimi; **a)** teğetsel gerilme dağılımı; **b)** radyal gerilme dağılımı (Budynas vd. 2020)

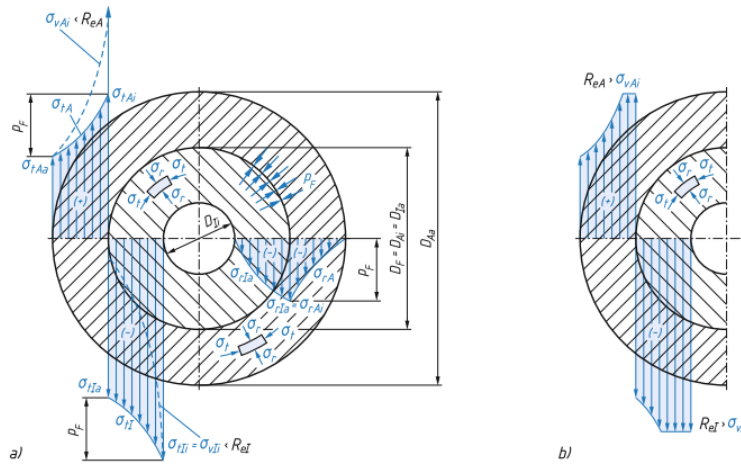


Şekil 2.3. Sıkı geçme bağlantısında meydana gelen gerilme ve basınç dağılımları (Steinhilper ve Sauer 2005)

Şekil 2.3’e göre, dolu mildeki radyal ve teğetsel gerilmeler aynıdır. Bu durumda, içi dolu milde gerilmelerin dağılımı milin çapına bağlı değildir. İçi boş milin ve göbeğin duvarları üzerinde gerilmeler eşit olmayan şekilde dağılmaktadır. En büyük gerilmeler, göbeğin iç çapında ve içi boş mil üzerinde meydana gelmektedir. Göbek kenarına gelmeden önce, radyal gerilme değeri 0 değerindedir. Mil üzerinde radyal gerilme değeri

oluşmaktadır. Oluşan bu gerilme değeri, negatif işaretlidir. Radyal ve teğetsel gerilmelerin zıt işaretlerinden dolayı, göbekte göbek kenarına doğru artan bir gerilme ile birlikte karşılıklı gerilmeler söz konusudur. Bu nedenle, plastik şekil değişimi, göbek kenarında bağlantının geri kalanına göre daha erken başlayacaktır. Bunun için, özellikle kırılğan malzemelerin (seramik) gibi kullanıldığı göbeklerde hasar oluşmaması için önleyici tedbirler alınmalıdır (Steinhilper ve Sauer 2005). Sünek malzemelerin kullanıldığı göbeklerde ise, sıkı geçme bağlantısının işlevselliği bozulmadan akma noktasının aşılmasına müsaade edilir (Niemann vd. 2005).

Sıkı geçme bağlantısındaki gerilme dağılımı incelendiğinde meydana gelen teğetsel (σ_t) ve radyal (σ_r) gerilmelerin (+) ve (-) olan işaretleri dikkate alınarak eşdeğer gerilme değeri elde edilebilir. Bu değer, malzemenin akma dayanımından düşükse elastik sıkı geçme, malzemenin akma dayanımından büyükse elastik-plastik sıkı geçme bağlantısı meydana gelmektedir (Wittel 2021). Bu durum, Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Sıkı geçme bağlantısında gerilme dağılımı; **a.)** elastik sıkı geçme; **b.)** elastik – plastik sıkı geçme (Wittel vd. 2021)

Ayrıca, çentik hassasiyeti de bir malzemenin sünek mi yoksa gevrek mi olduğuna göre de değişmektedir. Gevrek malzemeler, çentiğe karşı daha hassasken; sünek malzemeler daha az hassasiyet göstermektedir. Ek olarak, kamalı ve konik geçme mil göbek bağlantılarına göre, sıkı geçme bağlantısının hasara uğrama olasılığının %90 oranında daha az olduğu da belirtilmiştir (Vetter vd. 2019).

2.2. Sıkı Geçme Bağlantılarının Montajı

Sıkı geçme bağlantılarında, göbek parçayı milin üzerine geçirebilmek için pres (eksenel) geçme ve sıcak (radyal) geçme adında iki montaj türü bulunmaktadır.

2.2.1. Pres geçme

Pres geçmelerde, göbek mil üzerine eksenel yönde pres ile geçirilmektedir. Bundan dolayı, bir diğer adıyla eksenel sıkı geçme denir. Buradaki montaj işleminde iyi bir sonuç alabilmek amacıyla presleme hızının 2 mm/s'yi geçmemesi ve mil ucunda (2-5

mm) uzunluğunda 5°'lik pah kırma tavsiye edilmektedir. Pres geçmelerde yüzeylerin zedelenme durumunun söz konusu olması bağlantıyı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durumdan dolayı, pres kuvvetini azaltabilmek amacıyla yüzeyler yağlanabilir. Büyük pres kuvveti gereken durumlarda da, takma ve sökme işlemleri hidrolik sistemler ile yapılmaktadır(Akkurt 2005). Pres ile geçme yöntemi ile montaj sağlanması dışında, mil ve göbek arasına, açılan kanallardan basınçlı yağ gönderilerek de montaj ve demontaj işlemi gerçekleştirilebilir.

2.2.2. Sıcak geçme

Sıcak geçme ile sıkı geçme bağlantıları radyal geçme olarak da adlandırılmaktadır. Bu montaj türünde, göbek ısıtılmakta veya mil soğutulmaktadır. Göbeğin ısıtılmasından dolayı delik çapı büyümekte ve mile kolaylıkla geçmektedir. Bunun sonucunda montaj esnasında mil ile göbek deliği arasındaki boşluk sağlanmış olmaktadır. Montajdan sonra büzülme sonucunda mil ve göbek arasında bir basınç oluşmaktadır. Bundan dolayı sıkı geçme bağlantısı başlığı altında montaj çeşidi olarak bu türe büzülme bağlantısı da (shrink fit) denilmektedir. Bu montaj türünde, pres ile montaja göre yüzey pürüzlülüğü de bozulmamaktadır. Ekonomik yöntem olarak, göbeği bir fırın içerisinde ısıtmak, mili soğutmaktan daha ekonomiktir. Mil soğutulmak istenirse kuru buz (karbondioksit karı) ile sıvı hava (sıvı nitrojen) kullanılabilir (Akkurt 2005; Şekercioğlu 2015). Şekil 2.5’de de, sıcak geçme yöntemi uygulanarak, göbek parçaları oda sıcaklığında tutulurken, millerin sıvı nitrojen ile soğutulması ile montaj çalışması gösterilmektedir (Booker ve Truman 2020).



Şekil 2.5. Sıcak geçme (shrink - fit) yöntemi uygulanarak parçaların montajı (Booker ve Truman 2020)

2.3. Momentin İletilebilmesi için Gereken Minimum Basınç

Sıkı geçme bağlantısında oluşan sürtünme momenti (M_s), döndürme

momentinden (M_d) büyük olmalıdır. Ayrıca, mil ve göbek arasındaki temas basıncı değeri en az p_{min} kadar olmalıdır. Aksi durum söz konusu olursa, mil, göbek üzerinde kayar ve iletilmek istenen moment iletilemez (Şekercioğlu 2015).

$$M_s > M_d \quad (2.11)$$

$$M_s = F_s \cdot \frac{d}{2} = \mu \cdot F_N \cdot \frac{d}{2} ; \quad p_{min} = \frac{F_N}{A} \rightarrow F_N = p_{min} \cdot \pi \cdot d \cdot L \quad (2.12)$$

$$M_s = \mu \cdot p_{min} \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot p_{min} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot L \quad (2.13)$$

$$p_{min} = \frac{2 \cdot M_d \cdot S_k}{\mu \cdot \pi \cdot d^2 \cdot L} \quad (2.14)$$

M_s : Sürtünme momenti

M_d : Döndürme momenti

d : Göbek çapı

L : Göbek genişliği

F_s : Sürtünme kuvveti

μ : Sürtünme katsayısı

F_N : Temas kuvveti

p_{min} : Minimum basınç

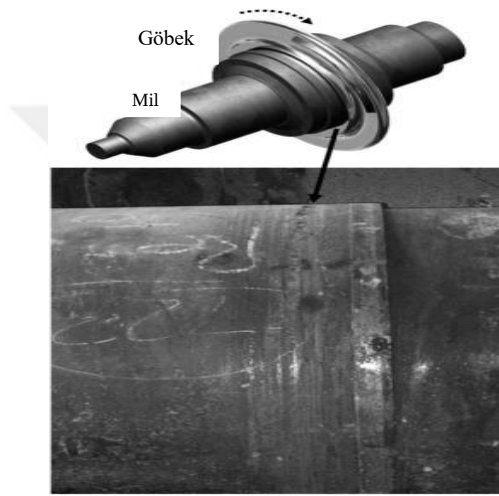
S_k : Kaymaya karşı emniyet katsayısı

2.4. Göbeğin Hasar Görmemesi için Olması Gereken Maksimum Basınç

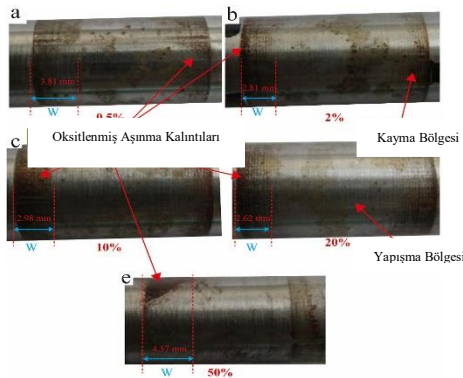
Sıkı geçme bağlantısında oluşan temas basıncı değeri, göbeğin emniyetli yüzey basıncı değerinden (p_{gem}) küçük olması gerekmektedir. Aksi takdirde, göbekte çatlama ve hatta kırılmalar meydana gelebilir. Yüzey basıncının küçük olması, oturma yüzeylerinde ezilmenin meydana gelmemesini de sağlar. Ek olarak, temas basıncının oluşabilmesi için minimum sıkılığın da sağlanması gerekir. Maksimum sıkılığın meydana geldiği durumlarda, plastik deformasyonun meydana gelme olasılığı da artar (Akkurt 2005; Şekercioğlu 2015).

Özetlenmesi gerekirse, sıkılık az olursa, sıkı geçme bağlantısı moment iletme işlevini yerine getiremeyebilir; sıkılığın maksimum olması durumunda, oluşan basıncın müsaade edilebilir basınç değerini aşması durumunda mil ve göbekte hasar meydana gelebilir. Meydana gelen hasar mekanizmaları, kırılma ve çatlama olayı dışında sürtünme korozyonu ve aşınma hasarı olarak da ortaya çıkmaktadır (Qiu ve Zhou 2016). Sürtünme korozyonu, metal aşınması ve metalde ufalanma şeklinde görülmektedir. Bu korozyon türünde, korozyon ve aşınma birlikte oluşmaktadır. Titreşime maruz kalan statik yük ile yüklenmiş parçalarda ve nemin nüfuz etmesi sonucunda görülmektedir. Aşınma hasarı ise, birbirine temas eden ve birbirine göre bağlı hareket gösteren sürtünme halindeki

parçaların, yüzeylerinde sürtünmenin etkisi ile meydana gelen malzeme kaybına denir. Sıkı geçme bağlantılarında, temas basıncının en yüksek olduğu bölgede, mikro kaymanın olduğu yerlerde, yüklemenin değişken olduğu durumlarda aşınma daha hızlı meydana gelmektedir (Kollmann 1984; Booker ve Truman 2020). Bununla birlikte, değişen ve şiddetlenen eğilme momentleri, yüzeyde ileri-geri kayma hareketleri meydana getirebilir. Bu durumda, aşınma ve korozyonun bir sonucu olarak mil, yorulma kırılmasına da uğrayabilir (Kollmann 1984). Şekil 2.6'da bir iş merdanesi sıkı geçme bağlantısında sürtünme sonucunda milde meydana gelen aşınma hasarı gösterilmektedir (McMillan vd. 2016). Aynı şekilde, Şekil 2.7'de de yüksek hızlı tren tekerlek ve aksı sıkı geçme bağlantısında milde meydana gelen oksitlenmiş aşınma kalıntıları gösterilmektedir (Shu vd. 2022).



Şekil 2.6. İş merdanesi sıkı geçme bağlantısında sürtünme sonucunda milde meydana gelen aşınma hasarı (McMillan vd. 2016)



Şekil 2.7. Yüksek hızlı tren tekerlek ve aksı sıkı geçme bağlantısında bağlantı yüzeyinde meydana gelen oksitlenmiş aşınma kalıntıları (Shu vd. 2022)

2.5. Teorik Gerilme Yığılması Faktörü ve Çentik Katsayısı

Makine parçaları üzerinde bulunan faturalar, kama kanalları, delikler, diş açılan delikler, perçin delikleri, kaynak ağızları parçanın sürekli mukavemet değerlerini düşürmektedir (Şekercioğlu 2015). Parçadaki geçişler, girintiler, delikler, oluklar,

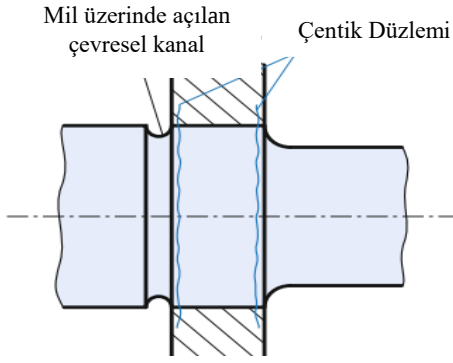
gerilme dağılımını doğrudan etkilemektedir. Çentiklere ek olarak boşluklar, segregasyonlar, cüruf kalıntıları da dayanımı azaltmaktadır. Çentik olmayan bir parçada kuvvet akışı kesit boyunca eşit dağılmış şekildedir. Çentik keskinliğinin büyük olması, daha büyük teorik gerilme yığılması faktörünü (K_t) oluşturmaktadır. Teorik gerilme yığılması faktörü, ısıtım işlemi olarak örneğin yüzey sertleştirme, monevişlemeyi de (temperleme) hesaba katmaktadır (Wittel vd. 2021).

Kırılma malzemelerde çentik olması, sünek malzemelere göre olumsuz etkilere sahiptir. Sünek malzemelerde çentik bölgesinde akma sınırının biraz aşılması olumsuz etki yaratmamaktadır (Wittel vd. 2021).

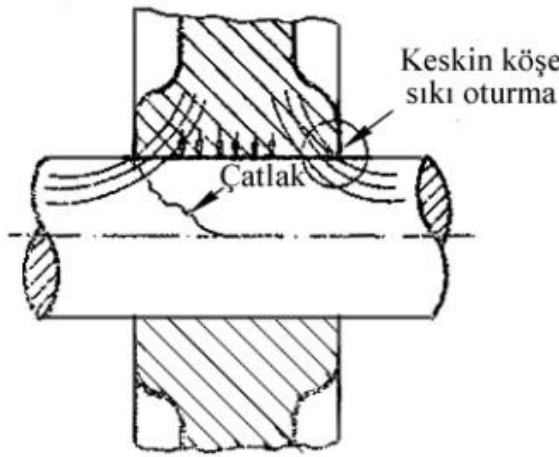
Yorulma hasarları da genel olarak çentik etkisiyle başlamaktadır. Çentiklerin, yorulma ömrü üzerindeki olumsuz etkisi üzerinde durulup, bu durum parçada göz önüne alınıp dikkat edilirse, parçanın uzun süreli kullanımı söz konusu olabilir. Çünkü, çentiğin bulunduğu yerde oluşan gerilme yığılmaları, yorulma dayanımını azaltan etkenlerdendir. Teorik gerilme yığılması, çentikten dolayı gerilme yığılması oluşan maksimum gerilmenin (σ_{max}), o bölgedeki ortalama gerilme (σ_{ort}) değerine bölünmesi ile tanımlanır (Wang vd. 2017). Denklem 2.15'te de teorik gerilme yığılması faktörünün eşitliği gösterilmektedir.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ort}} \quad (2.15)$$

Sıkı geçme bağlantısında ise, milin ve göbeğin temas ettiği yüzey üzerinde çentik etkisi bulunmaktadır. Bu kısımdaki çentik etkisi, 3 eksenli gerilme durumundan, basınç değişimlerinden, iletilen momentin gerilme dağılımı üzerindeki etkilerinden ve temas yüzeyindeki mikro kaymalardan, sıkıştırılmış parçadan sıkıştırılmamış parçaya geçişten dolayı meydana gelmektedir. Meydana gelen çentik etkisini azaltabilmek amacıyla göbeğin mil ile temas ettiği köşelerde tasarım değişikliklerine gidilebilir. Çünkü, çentik etkisi tasarım değişikliklerinden yüksek oranda etkilenmektedir (Wittel vd. 2021). Bunun için, göbeğin koniklik açısı arttırılabilir böylelikle göbeğin et kalınlığı azaltılabilir. Göbek genişliği yarıya kadar azaltılıp, göbek dış çapı ve göbek kenarı arasında yuvarlatmalar yapılabilir. Göbek kenarlarında, maksimum gerilme oluşacağı için, göbek kenar bölgesinde oluşturulan boşluklar, gerilme yığılmalarını da azaltacaktır (Kollmann 1984; Truman ve Booker 2007; Saraç 2020). Bununla birlikte, kuvvet aktarımını yumuşatmak amacıyla mil üzerinde çevresel kanal açılarak keskin geçişler önlenip, tasarımda esneklik sağlanarak çentik etkisi azaltılabilir (Wittel vd. 2021). Bu husus, göbeğin pres ile mile oturması şeklinde Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Ayrıca, mil üzerinde de çentik etkisi meydana gelebilir. Mil yüzeyinin sertleşmesi ve soğuk şekillendirme bu duruma sebep olabilir. Bunun için yüksek mukavemetli mil malzemesi kullanılarak çentik etkisi azaltılabilir. Şekil 2.8'de de sıkı geçme bağlantılarında meydana gelen çentik etkisine yönelik tasarım önlemi görseline yer verilmiştir. Ek olarak, Şekil 2.9'da da sıkı geçme bağlantılarında meydana gelen çentik etkisi sonucundaki hasar görseline yer verilmiştir.



Şekil 2.8. Çentiğe yönelik tasarım önlemi (Wittel vd. 2021)



Şekil 2.9. Sıkı geçme bağlantılarında çentik etkisi sonucunda oluşan hasar (Anonim 1)

2.6. Mevcut Tez Çalışmasına Yönelik Yapılan Çalışmalar

Mevcut tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar, aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Kovan ve Altan (2011a), sonlu elemanlar analizinden faydalananarak farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip sıkı geçmeli mil-göbek bağlantılarının gerilme analizlerine yer vermişlerdir.

Kovan (2011b), tercih edilen çap serileri ve sıkı geçme toleransları için gerilme ve frekans analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmasının sonlu elemanlar analizinden faydalandığı kısmını Comsol Multiphysics yazılımında gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlarda, geleneksel hesaplamada kullanılan Lamé-Clapeyron denkleminin plastik bölge için sıkı geçme bağlantısı gerilme hesabında yetersiz kaldığını ve çözüm için nümerik çalışmanın faydalı olacağını vurgulamıştır.

Kovan (2018), bir başka çalışmada, sıkı geçme bağlantısında kullanılan hafif metal dişli ve çelik mil sıkı geçme bağlantılarının elastik-plastik sıkı geçme gerilmelerini ve frekans analizini analitik ve sayısal hesaplama yöntemlerini kullanarak incelemiştir.

Çalışmasının sonucunda, çap küçülmesinin ve tolerans sıklığının artmasından dolayı plastik deformasyonun meydana geldiğini gözlemlemiştir. Ayrıca, yapılan sayısal hesaplamaların analitik hesaplamalara göre daha doğru sonuç verdiği vurgulanmıştır.

Tezel (2019), mikro modüllü dişli mil sıkı geçme bağlantısında elastik - plastik sıkı geçme gerilmelerini incelemiştir. Ayrıca, geleneksel hesaplama yöntemi Lamé-Clapeyron denklemi ve nümerik hesaplama sonuçlarını karşılaştırmıştır. Nümerik analiz için Ansys yazılımını kullanmıştır. Çalışmasının sonucunda, nominal çap arttıkça teğetsel ve radyal gerilmelerin azaldığını, sıkı geçme tolerans çiftlerinin de H7/u6, H7/s6, H7/p6 şeklinde büyükten küçüğe doğru sıralandığını bulmuştur.

Yapılmış olan çalışmalarda farklı makine parçalarının sıkı geçme bağlantı yönteminden yararlanarak da bağlantıya yönelik çözümler önerildiği de gözlemlenmiştir.

Wu vd. (2016), çalışmalarında sıkı geçme bağlantılı pim ile bağlanmış kompozit plakalarda açılan deliklerdeki gerilmeleri hesaplamak için bir analitik yöntem önermişlerdir. Delik kenarlarındaki yer değiştirme ve yük koşullarını analiz etmişlerdir. Bu analiz için Abaqus yazılımından faydalanmışlardır. Kompozit plakaların bağlanması için açılan pim deliklerinin etrafında gerilme yığılmaları gözlemlemiştir. Ayrıca, önerdikleri analitik yöntemi doğrulamak için de hem sayısal hem de deneysel sonuçlardan faydalanmışlardır.

Radi vd. (2017), Lamé-Clapeyron denkleminde ve Timoshenko teorisine dayalı analitik bir model önermişlerdir. Mil-göbek bağlantısındaki eğilmeyi analitik olarak çözümlenmiştir. Mil ucuna uygulanan kuvvet çiftine maruz kalan bağlantının matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Ayrıca, mil-göbek ayrılması sonucunda aşınma ve yorulma aşınmasına neden olan kuvvet çiftinin değerini belirlemişlerdir.

Bazı çalışmalarda, mil-göbek bağlantısı tasarımına yönelik optimizasyon çalışmalarına yer verilmiştir.

Ulrich ve Binz (2021), mil-göbek bağlantısı için tasarım önerilerine yer vermişlerdir. Ekstrüzyon ile üretilen mil-göbek bağlantıları için optimizasyon yoluyla elde edilen dairesel olmayan temas yüzey şekilleri oluşturmuşlardır. Oluşturulan tasarımların göbek gövdesi boyunca daha düzgün gerilme dağılımı ile sonuçlandığını, lokal gerilme noktalarının ortadan kalkması ile bağlantı mukavemeti üzerinde faydalı sonuçlar elde edileceğini belirtmişlerdir.

Pedersen (2016), mil-göbek bağlantısındaki temas basıncını iyileştirmek için bağlantıda göbek için şekil optimizasyonlarına yer vermiş ve düzgün dağılımlı gerilmelere ulaşabilmeyi amaçlamıştır. Bunun için, çeşitli göbek tasarımları çalışmada yer almaktadır. Çalışmada, tasarımdaki değişiklikler ile temas basıncının iyileşeceğini göstermiştir.

Hüyük vd. (2014), pimli boru geometrilerinin, sıkı geçme bağlantılarının elastik – plastik analizini sunmuşlardır. Analiz için Simulia Abaqus yazılımını kullanmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarında, pim ve borunun sıkı geçme bağlantısında hem pimin hem de borunun elastik deformasyona uğradığını daha sonra borunun elastik, pimin plastik deformasyona uğradığını açıklamışlardır. En sonda hem borunun hem pimin plastik

deformasyona uğradığını ve bunun sonucunda da bağlantı mukavemetinin %20 değerine kadar düştüğünü belirtmişlerdir.

Analitik ve sayısal yöntemler ile çözümlemelerin yer aldığı çalışmalar da literatürde bulunmaktadır.

Croccolo vd. (2013), çalışmalarında ortotropik silindirlerin sıkı geçme bağlantısı sonucunda gerilme dağılımlarını değerlendirmek için önerdikleri modeli analitik olarak çözümlemişlerdir. Çalışmalarının sayısal çözümleme kısmında Ansys yazılımından faydalanıp, doğrusal olmayan statik analiz ile çözümlemeleri gerçekleştirmişlerdir. Analitik ve sayısal çözümleme sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Croccolo ve Vincenzi (2010), çalışmalarında mil-göbek sıkı geçme bağlantılarındaki maksimum gerilme değerini bulmayı amaçlamışlardır. Analizlerinde kullanmış oldukları göbek parça, kaplıdır. Mil ve kaplinin bağlantısında mil, kaplinin her iki tarafından uzamaktadır. Yani, mil ve kaplin aynı uzunlukta değildir. Bu durumda, gerilme yığılması değerini hesaplamışlar ve göbeğin her bir noktasındaki gerilme değerlerini incelemişlerdir.

Cui vd. (2021), reaktör soğutma sıvısı pompasına ait olan rotor kutusundaki sıkı geçme bağlantısının montajı sonucunda oluşan gerilme dağılımını hesaplamışlardır. Gerilmeyi hesaplamak için, Lamé-Clapeyron denklemini analitik çözümde kullanarak, gerilme dağılımlarını sayısal hesaplamada incelemişlerdir.

Mevcut literatür incelendiğinde mil-göbek bağlantılarından sıkı geçme bağlantılarına yönelik pek çok deneysel, sayısal, analitik incelemelere yönelik çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Özellikle, yukarıda da bahsedilen literatür özetlerinde, sayısal çalışmaların farklı yazılımlar ile yapıldığı ve analitik çözümlemeler ile desteklendiği çalışmalar bulunmaktadır. İlgili teknik kitaplarda örnek olarak birkaç sıkı geçme toleranslarında ve birkaç çap örneğinde çentik etkisi değerleri gösterilmiştir. Fakat, çalışmada yapılan sıkı geçme toleransları (H7/p6, H7/s6, H7/u6) ve farklı çaplarda (25, 30, 40, 50, 60, 80, 100) mm ölçülerini esas alarak çentik katsayısı değerlerini hesaplayıp, tablo olarak sunulan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bundan dolayı, yapılan çalışma özgün bir değer kazanmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, tez çalışmasına yönelik analizi yapılacak olan mil ve göbek parçanın tasarımına, analizine ve çentik katsayısının hesabına yer verilecektir. Parçaların katı modellemesi ve statik analiz için ANSYS Student 2022 yazılımı kullanılmıştır.

3.1. Mil ve Göbek Parçaların Katı Modellemesi

Mil – göbek parçanın katı modellemesi, ANSYS Design Modeler katı modelleme yazılımında gerçekleştirilmiştir.

Makine tasarımı için tercih edilmesi gereken geometrik boyutlar ve toleransları ifade eden standart ASME (American Society of Mechanical Engineers) B4.2 (2009) kaynağıdır. Bu kaynağa göre, H7 delik toleransı için önerilen H7/p6, doğru hizalama gerektiren parçalarda, H7/s6, orta seviye kuvvet aktarımında, H7/u6, yüksek gerilmeye maruz kalan parçaların kuvvet aktarımında kullanılmaktadır (ASME B4.2 1978).

Ekonomik olarak, imalat yapabilmek için üretim toleranslarının kullanılması gerekmektedir. Tolerans, imalatı yapılacak parçanın en büyük boyutu ve en küçük boyutu arasındaki farktır. Toleranslar, fonksiyonun gerektirdiğinden daha sıkı olmamalıdır (Niemann vd. 2005).

Genel olarak tez çalışması için ise 25 mm'den 100 mm çapa kadar H7/p6, H7/s6, H7/u6 sıkı geçme toleransları oluşturularak 21 farklı sıkı geçmeli mil-göbek bağlantılarının analizleri gerçekleştirilmiştir.

Göbek parçanın et kalınlığı ve milin uzunluğu, referans alınan çalışmadaki $L=3d$ oranına bağlı olarak katı modeller oluşturulmuştur. Referans alınan araştırmadaki ölçülere göre $d/d_i = 3$, $d_0/d = 3$ oranları dikkate alınarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca içi boş mil değil, içi dolu mil ve göbek bağlantısının analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2. Mil ve Göbek Sıkı Geçme Bağlantısının Analizi

Bu çalışmada, sayısal çözümlemenin gerçekleştirilmiş olduğu analiz programı, ANSYS Student 2022, sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlemeler gerçekleştiren programdır. Çalışmadaki gerilme değerleri sonuçları, ANSYS Student 2022 Statik Yapısal Analiz bölümünden elde edilmiştir.

Analizde mil ve göbek parçaların malzeme türleri tanımlanmıştır. Mil-göbek sıkı geçme bağlantılarında mil ve göbek parça için aynı malzeme kullanılmakla birlikte, milin veya göbeğin farklı malzemelerden olması durumu da söz konusu olabilir. Genel olarak kullanılan malzemeler çelik, dökme demir, pirinç ve alüminyum olabilir. Bu çalışmada ise seçilen mil ve göbek malzemeleri AISI 4340 ıslah çeliğidir. AISI 4340 ıslah çeliği, iyi mekanik özellikler sergileyen, aşınmaya dayanıklı, yüksek sertliğe ve tokluğa sahip olan nikel ilaveli ıslah çeliği türüdür. Uygulama alanları olarak, aks kovanlarında, krank ve kam millerinde, otomobil ve motor parçaları gibi çok fazla zorlanan parçalarda malzeme türü olarak kullanılmaktadır (Anonim 2).

Analizde kullanılan malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. AISI 4340 malzemenin mekanik özellikleri (Kovan 2018)

Malzeme Özellikleri	
Elastisite Modülü (MPa)	199948
Poison Oranı	0,32
Yoğunluk (kg/m ³)	7850
Gerilme Dayanımı (MPa)	1796
Akma Dayanımı (MPa)	1496
Termal İletkenlik (W/m.K)	0,2256
Özgül Isı (J/kg.K)	1386

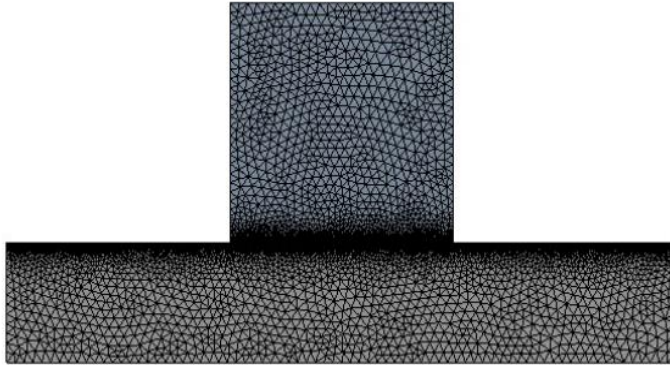
Model için programdaki statik analiz bölümünden faydalanılmıştır. Şekil 3.1’de programa aktarılan sıkı geçme bağlantılı eksenel simetrik mil ve göbek parçalar gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Analizi gerçekleştirilen mil ve göbek parça

Sıkı geçme bağlantısı analizini çözümlemeden önce mil ve göbek parçalar için mesh işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, modeli küçük küçük parçalara bölmeyi sağlamaktadır. Parça, küçük bölümlere ayrılarak, çözümleme sağlanıp, analiz sonuçlarına ulaşılmaktadır. Mesh oluşturulurken daha küçük eleman boyutu kullanılması ve ağ yapısının sıkılaştırılmasıyla, göbek ve milin temas ettiği yüzeylerdeki sonuçların doğruluğunun artması hedeflenmiştir. Fakat mesh işleminde eleman boyutu küçüldükçe çözümleme süresi de artmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarında hataları en az indirebilmek

için uygun bir mesh (ağ) boyutu seçilmiştir. Şekil 3.2’de sıkı geçmeli mil-göbek bağlantısının mesh yapısı gösterilmektedir.

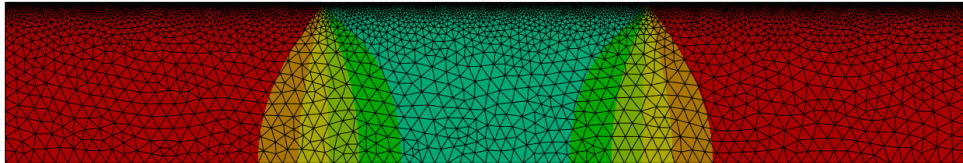


Şekil 3.2. Sıkı geçmeli mil-göbek bağlantısında oluşturulan ağ yapısı

Analizin çözümlenmesi işlemi tamamlandıktan sonra analitik hesaplamaların da yapılmasının ardından; analiz sonuçlarına göre her düğüm karşılık gelen gerilme değerleri oluşturulmuştur. Analiz sonucunda Ø25H7/u6 için hesaplanan radyal ve teğetsel gerilme değerleri mil için Şekil 3.3’te, göbek için Şekil 3.4’te gösterilmektedir.

A: Static Structural
Mil Normal Gerilme X
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
27.12.2022 16:22

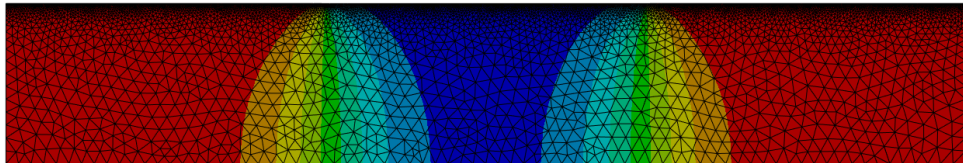
15.178 Max
-28.756
-72.69
-116.62
-160.56
-204.49
-248.43
-292.36
-336.3
-380.23 Min



Ansys
2022 R2
STUDENT

A: Static Structural
Mil Normal Gerilme Z
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
27.12.2022 17:38

13.507 Max
-16.014
-45.536
-75.058
-104.58
-134.1
-163.62
-193.14
-222.67
-252.19 Min

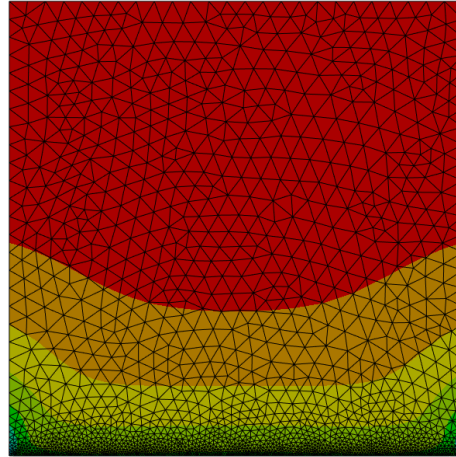


Ansys
2022 R2
STUDENT

Şekil 3.3. Mil için oluşan normal gerilme değerleri

A: Static Structural
Göbek Normal Gerilme X
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
27.12.2022 17:39

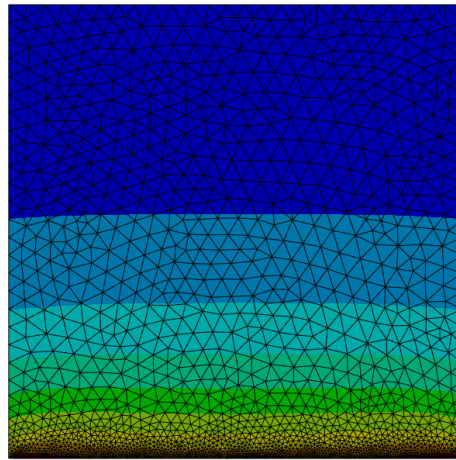
0.030941 Max
-52.694
-105.42
-158.14
-210.87
-263.59
-316.32
-369.04
-421.77
-474.49 Min



Ansys
2022 R2
STUDENT

A: Static Structural
Göbek Normal Gerilme Z
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
27.12.2022 17:39

333.96 Max
302.64
271.7
240.56
209.41
178.27
147.13
115.99
84.985
53.703 Min

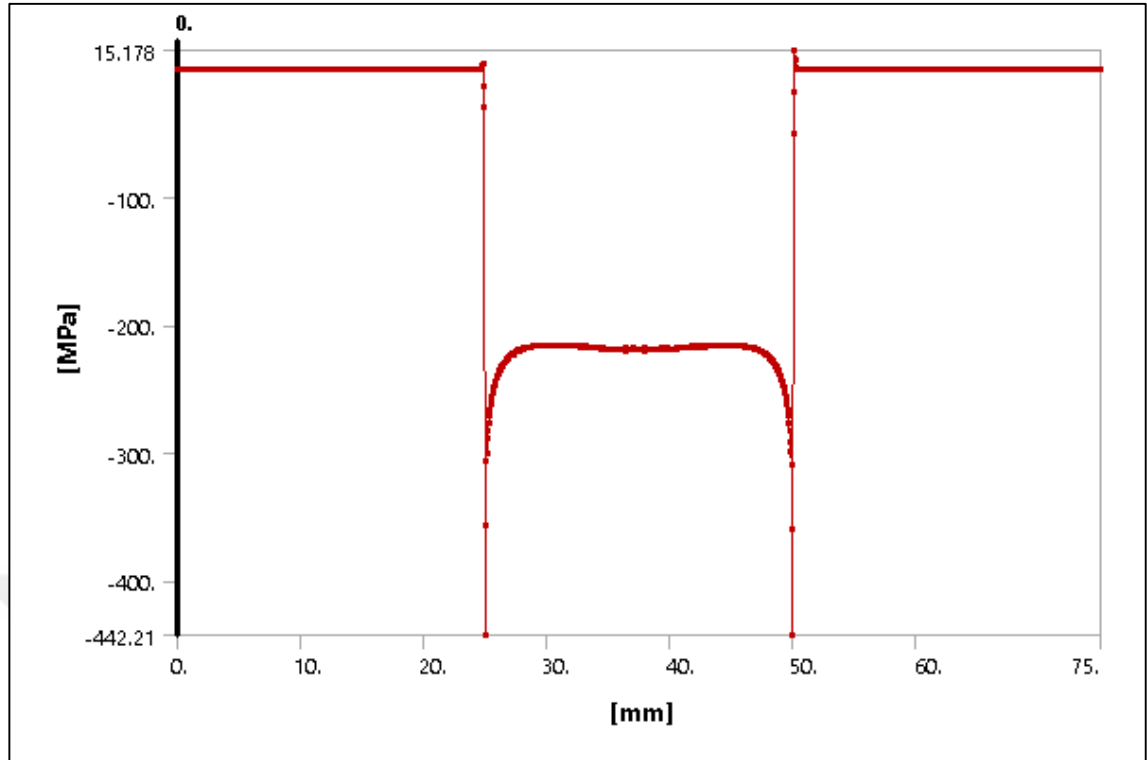


Ansys
2022 R2
STUDENT

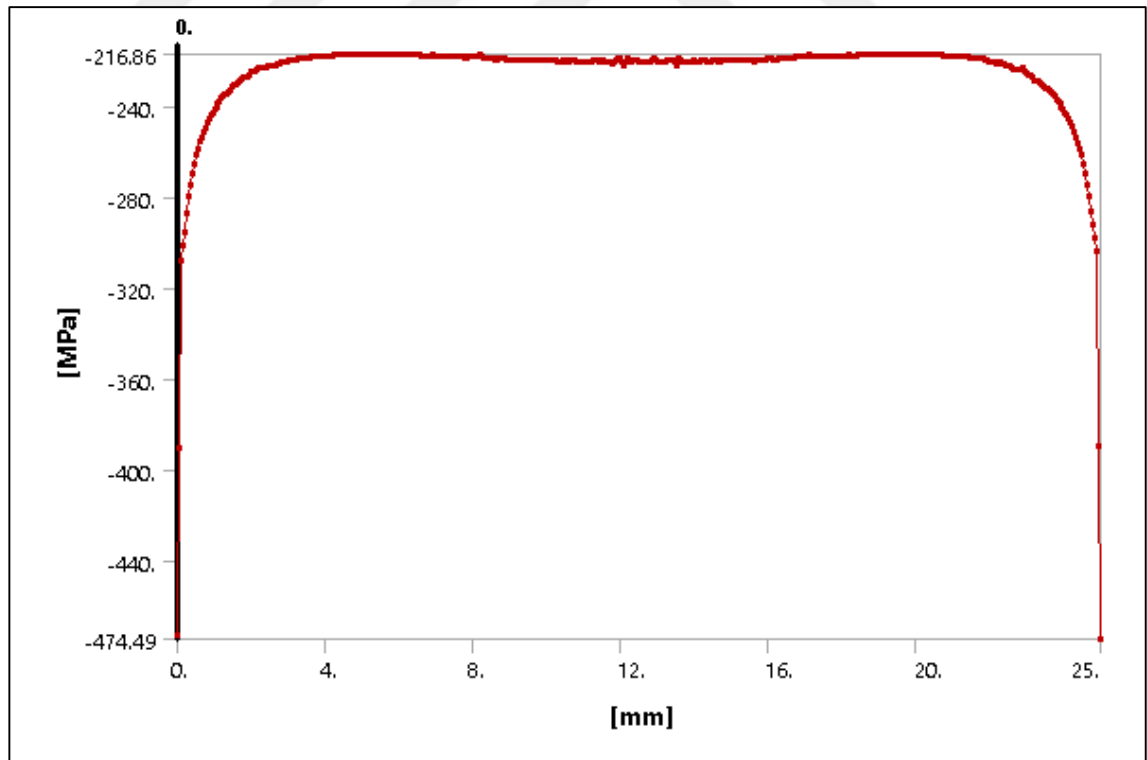
Şekil 3.4. Göbek için oluşan normal gerilme değerleri

3.3. Mil ve Göbek Sıkı Geçme Bağlantısında Çentik Katsayısının Hesaplanması

Tez çalışması kapsamında analiz sonuçları elde edildikten sonra, teorik gerilme yığılması faktörü ve çentik katsayısı hesabı gerçekleştirilmiştir. Teorik gerilme yığılması faktörünü bulmak için statik analiz sonucunda maksimum gerilme ve ortalama gerilme değerleri elde edilerek maksimum gerilme değeri, ortalama gerilme değerine bölünmüştür. Bu işlem için, hem göbek hem de mil parçanın maksimum gerilme değerleri elde edilmiştir. Göbek ve mil için ortalama gerilme ve maksimum gerilme değerlerinin elde edildiği gerilme dağılımları Ø25 H7/u6 için Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.5. Ortalama gerilme ve maksimum gerilme değerlerinin elde edildiği gerilme

dağılımları; **a.)** mil için yüzeyde oluşan gerilme dağılımları; **b.)** göbek için yüzeyde oluşan gerilme dağılımları

Teorik gerilme yığılması faktörü hesabı gerçekleştirildikten sonra çentik katsayısı hesabı gerçekleştirilmiştir. Bunun için de (Akkurt 2005)'in kitabında yer alan ıslah çelikleri için çentik duyarlılık faktörü 0,6 olarak alınmıştır ($q=0,6$). Teorik gerilme yığılması faktörü ve çentik duyarlılık faktörü, Denklem 3.1'de yerine koyularak çentik katsayısı değeri bulunmuştur. Teorik gerilme yığılması faktörü ve çentik katsayısı hem mil hem göbek parça için hesaplanmıştır.

$$q = \frac{K_c - 1}{K_t - 1} \quad (3.1)$$

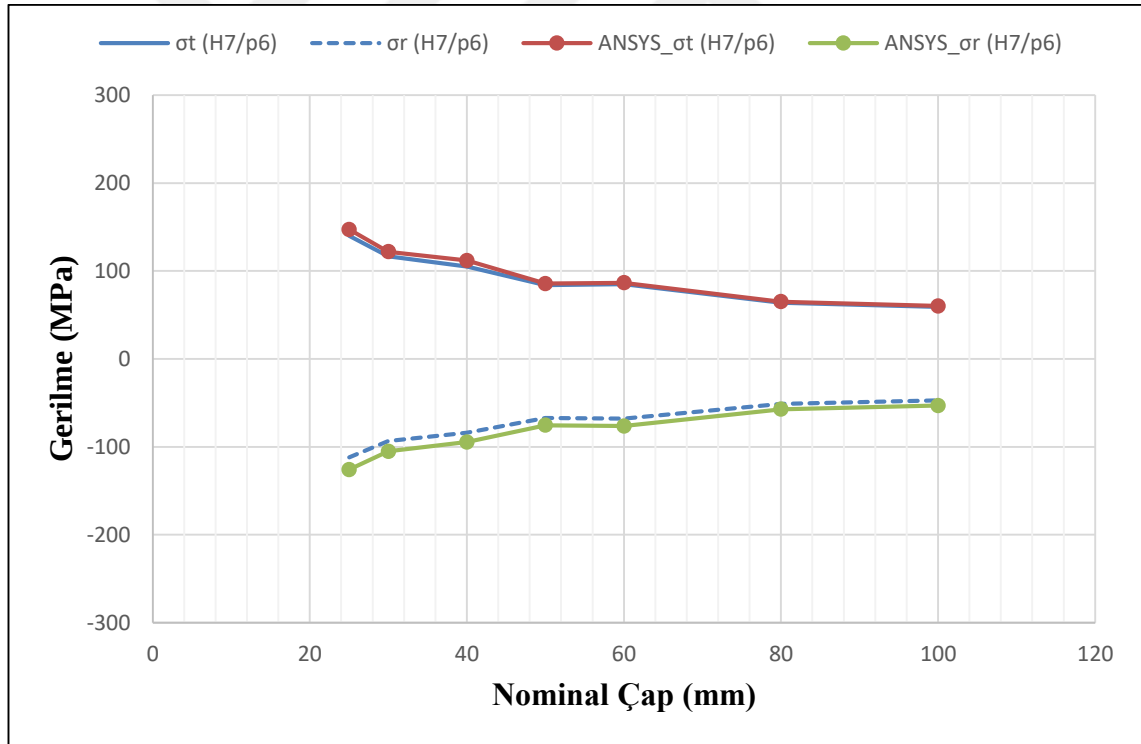
Tez kapsamında analizleri yapılmış sıkı geçme bağlantılarının analitik ve sayısal hesaplamalar ile elde edilen teğetsel ve radyal gerilme değerleri, teorik gerilme yığılması faktörü, çentik katsayısı ve boyutsuzlaştırma değerlerine tezin 4. bölümü olan "Bulgular ve Tartışma" kısmında yer verilecektir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

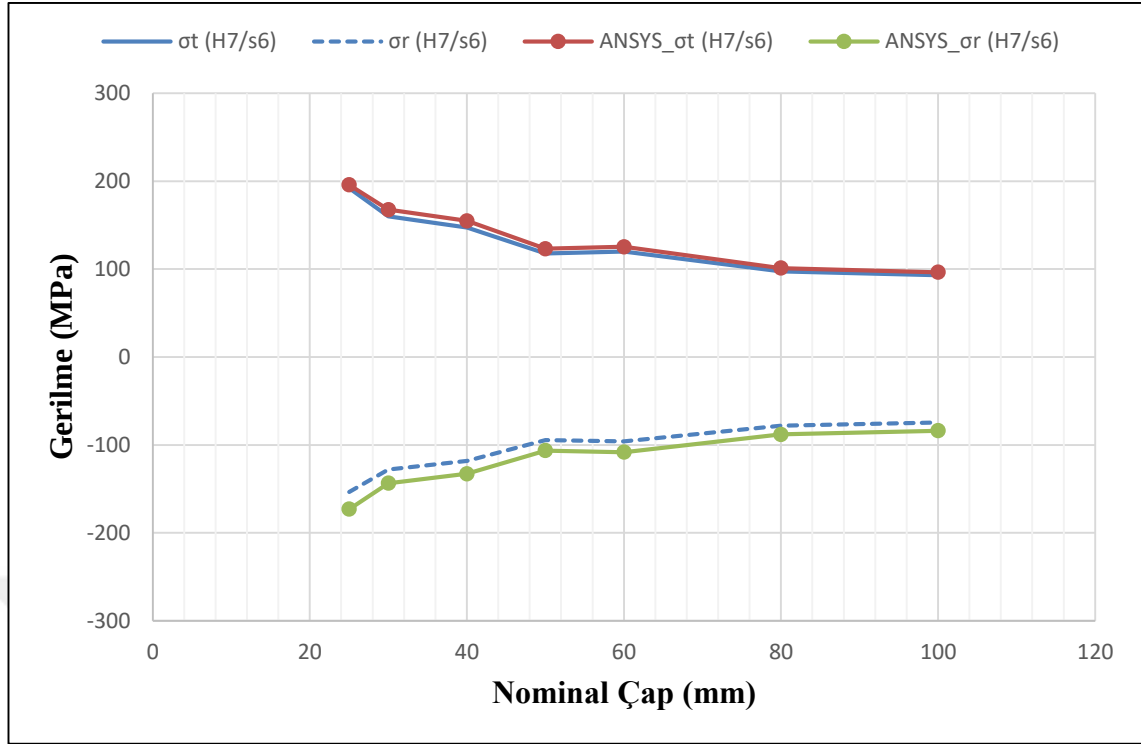
4.1. Sıkı Geçme Bağlantılarında Analitik ve Sayısal Çözümlemeler Sonucunda Elde Edilen Gerilme Değerleri

Sıkı geçme bağlantısı için, belirtilen çap aralığında ve üç farklı sıkı geçme toleransında yapılan analitik ve sayısal çalışmaların sonuçları aşağıda sunulmuştur. 25 mm'den 100 mm'ye kadar çap artmasıyla hem teğetsel gerilme hem de radyal gerilme değerleri azalış göstermektedir. Bununla birlikte, hem analitik sonuçlar hem de sayısal sonuçlarda sıkı geçme toleransları (sıkılık) arttıkça da teğetsel ve radyal gerilme değerleri artmaktadır.

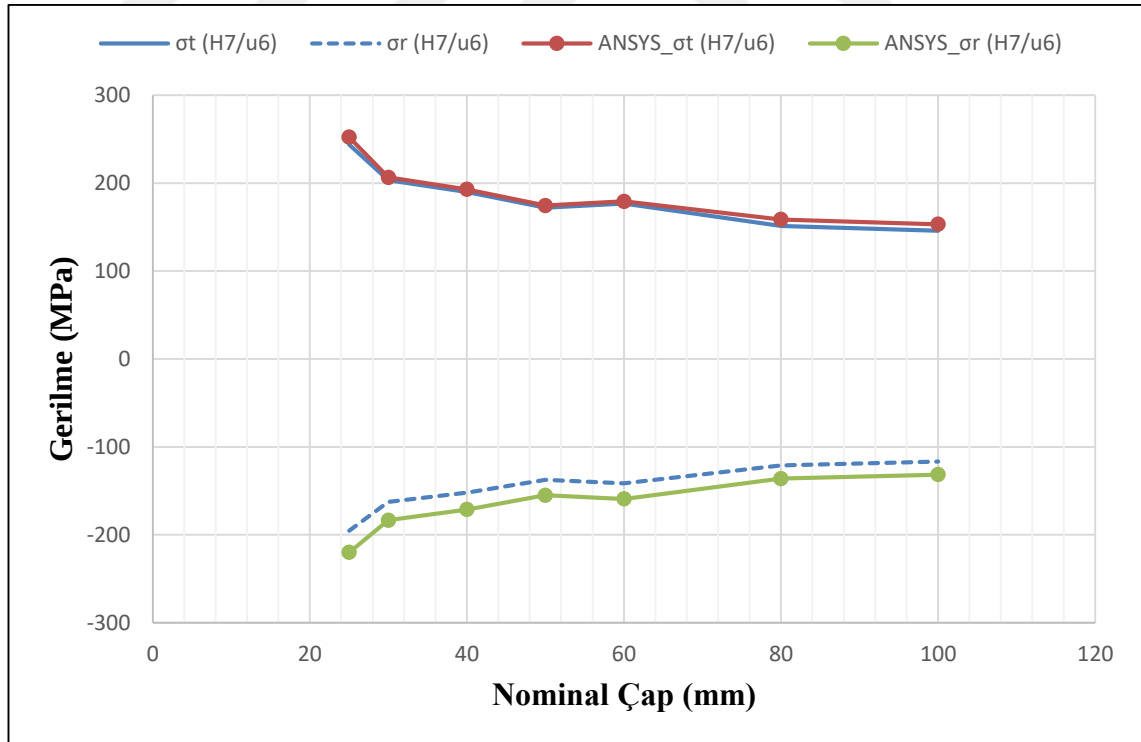
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te H7/p6, H7/s6, H7/u6 sıkı geçme toleransına göre çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilme değerlerinin grafiklerine yer verilmiştir. Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 incelendiğinde, sayısal ve analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen teğetsel gerilmelerin birbirine çok yakın olduğu; aynı şekilde radyal gerilme değerlerinin de birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durumda analitik hesaplamaların yetersiz kaldığı gerilme yığılmaları vb. gibi durumlarda sayısal hesaplamaların daha güvenilir sonuçlar verebileceği belirtilebilir.



Şekil 4.1. H7/p6 sıkı geçme toleransına göre nominal çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler



Şekil 4.2. H7/s6 sıkı geçme toleransına göre nominal çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler



Şekil 4.3. H7/u6 sıkı geçme toleransına göre nominal çapa bağlı olarak analitik ve sayısal hesaplama sonucunda elde edilen teğetsel ve radyal gerilmeler

4.2. Sıkı Geçme Bağlantısı için Teorik Gerilme Yığılması Faktörü ve Çentik Katsayısı Tablosu

Sıkı geçme bağlantısı için analiz tamamlandığında, mil ve göbek için farklı çaplar ve sıkı geçme toleranslarında elde edilen teorik gerilme yığılması faktörü ve çentik katsayısı değerlerinden oluşan tablolar Çizelge 4.1’de H7/p6 için, Çizelge 4.2’de H7/s6 için, Çizelge 4.3’te H7/u6 toleransları için sunulmuştur.

Oluşturulan tabloya göre tasarımcılar, sıkı geçme bağlantılarının belirli çaplarda ve sıkı geçme toleranslarında elde edilen teorik gerilme yığılması faktörü ve çentik katsayısı değerlerinden faydalanabilecekler ve bu çalışmayı referans alarak farklı çaplar için teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerlerini bulabileceklerdir.

Çentik etkisi, parçalarda kırılmalara sebep olabilmektedir (Childs 2019). Makine tasarımında hesaplamalar gerçekleştirilirken çentik katsayısının da hesaba katılmasıyla kırılmalar ve deformasyonların önüne geçilebilir. Hesaplanan çentik katsayısı değerine göre parçanın çentiksiz parçaya göre kaç kat daha kolay kırılabileceği görülmektedir. Çentik etkisini önleyebilmek adına tasarım ile ilgili alınan önlemler yanında malzemeye yönelik önlemlerde alınmaktadır. Tasarım açısından, gerilme yığılmalarını azaltacak şekilde göbekte tasarım değişikliğinin yapılmasının yanında, malzeme açısından gevrek malzemeler değil, sünek malzemelerin tercih edilmesi önemlidir. Gevrek malzemelerden imal edilmiş göbek parçalar, yüzeyde bulunan çatlaklara karşı hassastır. Göbek parça, servis aşamasında ek basınçlardan etkilenirse, çatlaklar yayılmaya başlayacaktır. Bu sebeple, sıkı geçme bağlantısındaki temas basıncı ve çalışmada meydana gelen gerilmelerde, malzemenin akma mukavemetini geçmemelidir. Çünkü, göbek parçanın hasara uğraması bağlantının bulunduğu yerdeki diğer parçalara da zarar verebilir (Booker ve Truman 2020). Ek olarak, milde hasara uğrayan parça olarak bağlantıda sorunlar oluşturabilir.

Çizelge 4.1. H7/p6 sıkı geçme toleransında belirtilen çaplara göre hem mil hem göbek için sayısal hesaplama sonrası oluşturulan teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerleri

H7/p6				
d(mm)	Mil (K _t)	Göbek (K _t)	Mil (K _ç)	Göbek (K _ç)
25,00	2,22	2,24	1,73	1,74
30,00	2,08	2,23	1,65	1,74
40,00	2,08	2,23	1,65	1,74
50,00	1,96	2,23	1,57	1,74
60,00	1,96	2,23	1,57	1,74

Çizelge 4.1'in devamı.

80	1,96	2,23	1,58	1,74
100	1,96	2,23	1,58	1,74

Çizelge 4.2. H7/s6 sıkı geçme toleransında belirtilen çaplara göre hem mil hem göbek için sayısal hesaplama sonrası oluşturulan teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerleri

H7/s6				
d(mm)	Mil (K_t)	Göbek (K_t)	Mil (K_ç)	Göbek (K_ç)
25,00	1,91	2,18	1,55	1,71
30,00	2,21	2,23	1,73	1,74
40,00	2,22	2,24	1,73	1,74
50,00	2,08	2,23	1,65	1,74
60,00	2,08	2,23	1,65	1,74
80,00	2,08	2,23	1,65	1,74
100,00	2,08	2,23	1,65	1,74

Çizelge 4.3. H7/u6 sıkı geçme toleransında belirtilen çaplara göre hem mil hem göbek için sayısal hesaplama sonrası oluşturulan teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı değerleri

H7/u6				
d(mm)	Mil (K_t)	Göbek (K_t)	Mil (K_ç)	Göbek (K_ç)
25,00	2,01	2,16	1,61	1,69

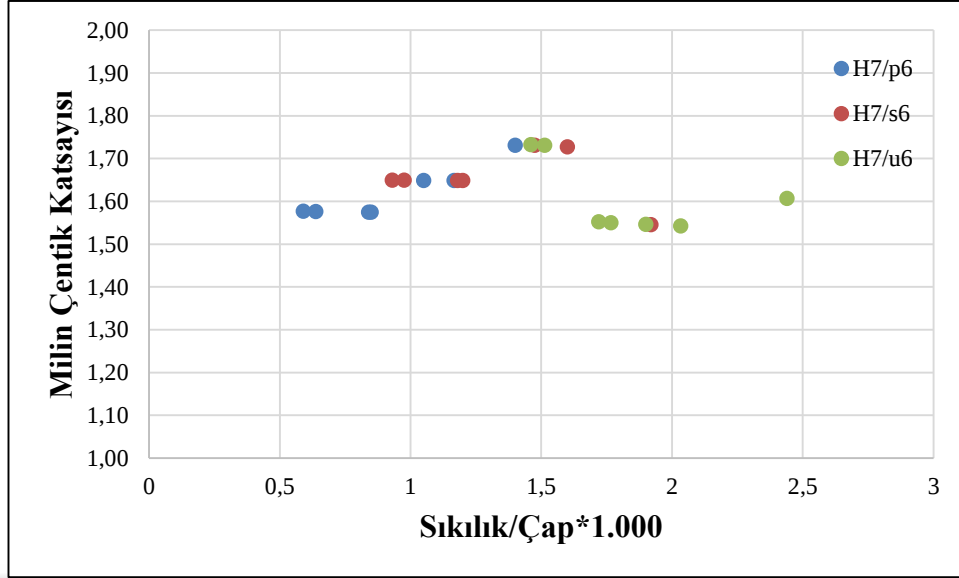
Çizelge 4.3'ün devamı.

30	1,90	2,18	1,54	1,71
40	1,91	2,18	1,55	1,71
50	1,92	2,20	1,55	1,72
60	1,92	2,19	1,55	1,71
80	2,22	2,24	1,73	1,74
100	2,22	2,24	1,73	1,74

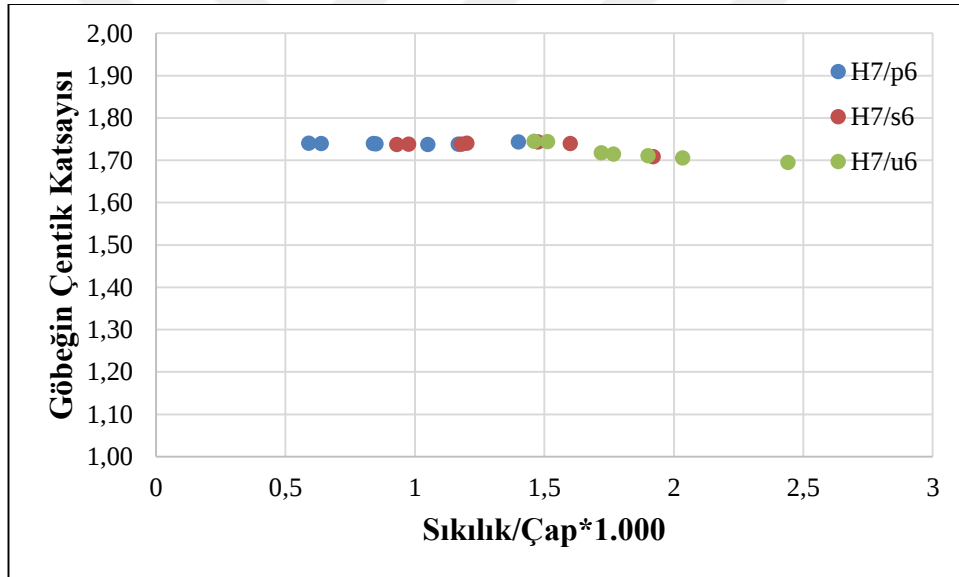
Çentik katsayısı değerleri, 1 ile 5 arasında değerler almaktadır (Steinhilper ve Sauer 2005). Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3'te de görüldüğü üzere, mil ve göbek için hesaplanan çentik katsayısı değerlerinin bu aralıkta olduğu görülmektedir. Ayrıca, çentik katsayısı ve teorik gerilme yığılması faktörü arasında ($1 \leq K_{\text{ç}} \leq K_t$) ilişkisi bulunmaktadır (Şekercioğlu 2015). Üç sıkı geçme toleransında da görüldüğü üzere bulunan çentik katsayısı ve teorik gerilme yığılması faktörü değerleri için, çentik katsayısı değerinin teorik gerilme yığılması faktörü değerinden küçük çıkması bu ilişkiyi doğrulamaktadır.

4.3. Boyutsuzlaştırma

Yukarıda da görüldüğü gibi, 25-100 mm aralığında çaplar ve H7/p6, H7/s6 ve H7/u6 geçmeler için sıkı geçme gerilmeleri ve teorik gerilme yığılması faktörü, çentik katsayısı değerleri sayısal yöntemler ile hesaplanabilmektedir. Lamle denklemlerinin plastik bölgedeki kalın cidarlı montajların gerilmeleri için iyi sonuçlar vermediği ve bu nedenle, kalın cidarlı silindir teorisine dayanan geleneksel yöntemin bazı sınırlamaları olduğu görülmüştür. Bu nedenle sıkı geçme bağlantılarının SEM (Sonlu Elemanlar Metodu) tabanlı gerilme analizlerinin sonuçları, geleneksel yöntemden elde edilenlere göre daha eksiksiz ve doğru olduğu söylenebilir. Ancak burada geçme/çap oranı kullanılarak boyutsuzlaştırma yapılması sonuçları daha kullanılır hale getirebilir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'e göre H7/p6, H7/s6, H7/u6 için mil ve göbekte, sıkılık/çap değerlerine bağlı olarak çentik katsayıları grafikleri görülmektedir. Çap/sıkı geçme tolerans çiftleri için çentik katsayılarının belirli aralıklarda olduğu görülmektedir. İncelenen çaplar ve toleranslar için milin çentik katsayısının 1,55-1,75 aralığında, göbeğin çentik katsayısının ise 1,70-1,75 aralığında olduğu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 4.4. Mil için boyutsuzlaştırılmış çentik katsayısı grafiği



Şekil 4.5. Göbek için boyutsuzlaştırılmış çentik katsayısı grafiği

5. SONUÇLAR

Sıkı geçmeli mil-göbek bağlantıları, kuvvet bağı ile döndürme momenti ve eksenel kuvveti iletmek için makine elemanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Mil-göbek bağlantıları içerisinde sıkı geçme bağlantıları pek çok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan ekonomik olması, statik ve dinamik yük şartları altında mükemmel yük taşıyabilmesi, tasarım kolaylığı, başka mil-göbek bağlantılarına göre pime ve kamalara ihtiyaç duyulmaması, diğer bağlama elemanlarına göre ağırlık tasarrufu açısından verimli olması diğer mil-göbek bağlantı türlerine göre tercih edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu bağlama elemanları, yatak burçlarında, volanlarda, rulmanlarda, millere takılan pompa çarklarında, valf yuvalarında, dişli-mil bağlantıları gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir.

Çentik etkisi (gerilme yığılmaları), bağlantı elemanlarında önemli bir problemdir. Özellikle, mil-göbek bağlantılarında bulunan çap değişikliğinde, kama kanallarında, pim deliklerinde, sıkı geçme bağlantılarında göbek parçanın sıkı geçme yerlerinde çentik etkisi meydana gelmektedir. Çentik etkisi, bağlantının dayanımını azaltmaktadır.

Bu çalışmada, mil-göbek bağlantılarından biri olan sıkı geçme bağlantılarında çentik etkisinin sayısal olarak incelenmesi üzerinde çalışılmıştır. Bunun için, $L=3d$ eşitliği dikkate alınarak 7 farklı göbek çapı ve 3 farklı sıkı geçme toleransında sıkı geçme bağlantıları oluşturulmuş, ANSYS Student 2022 programında doğrusal statik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan bu çalışmada, tasarımcı sıkı geçme bağlantısı için hazırlanan belirli çap aralığındaki teorik gerilme yığılması faktörü, çentik katsayısını tablo halinde bulabilecektir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve araştırmacılara sunulan öneriler şu şekildedir:

- Sıkı geçmeli mil-göbek bağlantısında gerçekleştirilen analizde görüldüğü üzere, gerilmenin en büyük olduğu yerler göbek ile milin temas yüzeyinde meydana gelmektedir. Eğer, malzemenin akma dayanımı, maksimum gerilme değerinden daha küçük olursa plastik deformasyon göbek kenarlarından başlayarak göbek iç yüzeyine doğru devam edecektir.

- Çentik katsayısını bulmak için yapılan sayısal ve analitik hesaplamalarda göbek ve mil için elde edilen ortalama, maksimum radyal gerilme değerleri, teğetsel gerilmeler ve radyal gerilmeler çap arttıkça azalmaktadır. Bununla birlikte 3 farklı sıkı geçme tolerans çifti için sıklık arttıkça da radyal ve teğetsel gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir.

- Hesaplanan çentik katsayısı değerleri oluşturulan tablodan ve grafiklerden görülmektedir. Sıkı geçme bağlantılarında, diğer mil-göbek bağlantı türlerine göre örneğin, kamalı bağlantıda olduğu gibi bir kama yuvası açılma durumu söz konusu olmadığı için bahsedilen mil-göbek bağlantısına nazaran sıkı geçme bağlantılarında çentik hassasiyeti daha azdır denilebilir ve bu durumda sonuçlara yansımış olabilir.

- Göbek parçayı çentik etkisine karşı korumak için çeşitli konstrüktif önlemler alınarak, sıkı geçme bağlantısında tasarımda değişiklikler yapılmalıdır. Örneğin, göbeğin et kalınlığı azaltılabilir bunun için göbek tasarımında koniklik açısı artırılabilir. Ya da göbek genişliğinin yarısına kadar çap düşürülerek, göbek dış çapı ile göbek kenarı

arasındaki radyüs (yuvarlatma) değerleri arttırılabilir, göbek köşelerinde boşluklar oluşturulabilir, göbekte çevresel oyuklar meydana getirilebilir. Mil için ise meydana gelecek çentik etkisine karşı yüksek mukavemete sahip malzemeler kullanılabilir.

- Çentik etkisini azaltabilmek amacıyla bir diğer önlem olarak da göbek parçalarda gevrek malzemeler yerine sünek malzemeler tercih edilmelidir. Çünkü, gevrek malzemeler çentik etkisine karşı daha hassasken; sünek malzemeler çentik etkisine karşı daha az hassasiyet göstermektedir.

- Yapılan çalışmada, mil-göbek parçaların malzemeleri aynıdır. Göbek ve milde farklı malzemeler (çelik, dökme demir, hafif metaller) kullanılarak çentik etkisi incelenebilir.

- Çalışmada kullanılan çap serilerinden daha küçük ve daha büyük çaplarda çalışma tekrar edilerek çentik katsayısı değerleri hesaplanabilir.

- Hesaplanan çentik katsayısı değerleri, çalışma elastik bölgede gerçekleştiği için plastik bölgeye kıyasla bağlantıyı hasara uğratmayabilir.

- Yapılmış olan çalışma, elastik bölgede göbek ve mil parçanın aynı davranışı göstermesi ile ANSYS Student 2022 statik analiz bölümünde gerçekleştirilmiştir. Parçaların elastik-plastik malzeme davranışlarını incelemek için doğrusal olmayan analiz çalışması gerçekleştirilebilir.

- Hesaplamalar sonucunda elde edilen teorik gerilme yığılması faktörü ve çentik katsayısı arasında $1 \leq K_c \leq K_t$ ilişkisi bulunmaktadır. Analizden elde edilen sonuçlar bu ilişkiyi doğrulamaktadır.

- Yapılan çalışmada mil ve göbek parça elastik bölgede olduğu için hem analitik hem de sayısal çözümlerle elde edilen teğetsel ve radyal gerilme değerleri oldukça birbirine yakındır. Bu da güvenilir bir şekilde sayısal çözümlemedeki sonuçlara göre işlem yapılabileceğini göstermektedir. Çünkü, sayısal çözümlemede gerilme yığılmalarının, plastik deformasyonun nerelerde meydana gelebileceği konusunda yorumlar yapılabilir. Fakat, analitik çözümlerle bu olanak bulunmamaktadır.

- Sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözümleme yaparken parçanın mesh (ağ) yapısı oluşturma aşamasında, analiz sonuçlarında meydana gelebilecek hataları en aza indirebilmek için uygun mesh boyutu seçilmesine dikkat edilmiştir. Çünkü, uygun bir mesh boyutunun elde edilememesi analiz sonuçlarındaki ortalama ve maksimum gerilme değerlerine yansiyacaktır. Bu da teorik gerilme yığılması ve çentik katsayısı hesaplamalarında, mesh boyutu değişikçe farklılıklar oluşturabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akkurt, M. 2005. Makine Elemanları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- ASME B4.2-1978. Preferred Metric Limits and Fits. ASME International, New York.
- Biron, G., Aurelian, V., Lucian, T. 2013. Optimal design of interference fit assemblies subjected to fatigue loads: A sequential approximate multi – objective optimization approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 47(3): 441-51.
- Booker, J.D., Truman C.E. 2020. Strengthening and weakening mechanisms in interference-fitted joints, 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure, 405-418.
- Budynas, R.G., Nisbett, J.K., Shigley, J.E. 2020. Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill, New York.
- Childs, P. 2019. Mechanical Design Engineering Handbook, Shafts, Elsevier, United Kingdom, pp. 295-375.
- Croccolo, M., Vincenzi, V. 2010. Stress concentration factors in compression-fit couplings. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 224(6): 1143-1152.
- Croccolo, M., Agastinis, D.M., Mauri, P. 2013. Influence of the assembly process on the shear strength of shaft – hub hybrid joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 44: 174-179.
- Cui, Y., Zhang, L., Zhang, R., Li, F. 2021. Stress analysis of shrink fitting process of ultra - thin reactor coolant pump rotor – can. *Annals of Nuclear Energy*, 162: 108492.
- Gamer, U., Lance, R.H. 1983. Residual stress in shrink fits. *International Journal of Mechanical Sciences*, 25(7): 465-470.
- Hüyük, H., Music, O., Koç, A., Dudgr, C., Bayram, C.G. 2014. Analysis of elastic-plastic interference fit joints. *Procedia Engineering*, 81: 2030-2035.
- Kollmann, F. 1984. Welle-Nabe-Verbindungen, Springer, Almanya.
- Kovan, V., Altan, G. 2011a. Elasto-plastic stress analysis of surface roughness effect on press fits, 6th International Scientific Conference on Tribology, pp. 122-126, Balttrib, Kaunas, Litvanya.
- Kovan, V. 2011b. Elasto-plastic separation frequency analysis of interference fitted hollow shaft-hub connections by finite element method. *Advances in Engineering Software*, 42: 644-648.
- Kovan, V. 2018. Elasto-plastic separation frequency analysis of interference fitted joints in lightweight materials. *International Journal of Computational Methods*, 15(1):1-15.
- Kovan, V., Tezel, T. 2021. Poligon Mil-Göbek Bağlantıları: Geometri, Hesap ve Tasarımı, Malzeme Teknolojisi ve Tasarım Bilimlerine Yeni Yaklaşımlar, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları, pp. 318-336.
- Madej, J., Sliwka, M. 2021. Analysis of Interference - Fit Joints, *Applied Sciences*, 11(23).

- McMillan, M., Booker, J., Smith, D., Onisa, C., Korsunsky, A., Song, X., Baimpas, N., Evans, A. 2016. Analysis of increasing torque with recurent slip in interference – fits. *Engineering Failure Analysis*, 62: 58-74.
- Niemann, G., Winter, H., Höhn, B.H. 2005. Maschinenelemente. Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen, Springer, Almanya.
- Pedersen, N.L. 2016. On optimization of interference fit assembly. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(2): 349-359.
- Qiu, J., Zhou, M. 2016. Analytical solution for interference fit for multi - layer thick - walled cylinders and the application in crankshaft bearing design. *Applied Sciences*, 6(6): 13-16.
- Radi, E., Lanzoni, L., Strozzi, A., Bertocchi, E. 2017. Shaft-hub press fit subjected to bending couples: analytical evolution of the shaft-hub detachment couple. *Applied Mathematical Modelling*, 50: 135-160.
- Saraç, I. 2020. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş mil-göbek bağlantılarında lineer-elastik gerilme analizi ve göbek kenar geometrisinin dayanıma etkisinin araştırılması. *El – Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(3): 994-1007.
- Shu, Y., Yang, G., Liu, Z. 2022. Experimental study on fretting damage in interference fit area of high - speed train wheels and axles based on specimen. *Engineering Failure Analysis*, 141: 106619.
- Steinhilper, W., Sauer, B. 2005. Konstruktionselemente des Mashinenbaus, Springer, Almanya.
- Şekercioğlu, T. 2015. Makine Elemanları Hesap Şekillendirme. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Tezel, T. 2019. Mikro modüllü dişli – mil sıkı geçme bağlantılarında mil çapı ve delik toleransının gerilme dağılımına etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 330-335.
- Truman, C.E., Booker, J.D. 2007. Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly. *Engineering Failure Analysis*, 14: 557-572.
- Ulrich, D., Binz, H. 2021. Applications in engineering science an enhanced design method for 3D contact surfaces on shaft – hub connections joined through lateral extrusion. *Applications in Engineering Science*, 6: 100047.
- Vetter, S., Leidich, E., Neikes, K., Schlecht, B. 2019. The survival probability of shafts and shaft – hub connections. *Engineering Failure Analysis*, 103: 195-202.
- Wang, J., Ning, K., Tang, L., Malekian, R., Liang, Y., Li, Z. 2017. Modeling and finite element analysis of load-carrying performance of a wing turbine considering the influence of assembly factors. *Applied Sciences*, 7(3): 298.
- Wittel, H., Spura, C., Jannasch, D. 2021. Roloff/Matek Maschinenelemente. Springer, Almanya.
- Wu, T., Zhang, K., Cheng, P., Liu, D., Li, Y. 2016. Analytical modeling for stress distribution around interference fit holes on pinned composite plates under tensile load. *Composites Part B*, 100: 176-185.

Anonim 1: <https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/MakineElemanlari/MakineElemanlariDersNotlari-3.Hafta.pdf> [Son Eriřim Tarihi: 18.10.2022].

Anonim 2: <http://www.onerler.com.tr/tr/4340-elik/> [Son Eriřim Tarihi: 29.09.2022].



ÖZGEÇMİŞ

NAZLI AŞKIN ARIKAN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2019-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2013-2017	Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya
Hazırlık	Akdeniz Üniversitesi
2012-2013	Yabancı Diller Yüksekokulu, Hazırlık Eğitimi, Antalya

ESERLER

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- Arıkan N.A.**, "Failure Analysis of an Automobile Crankshaft", 6th Engineers of Future International Student Symposium, Zonguldak, Bülent Ecevit Üniversitesi, Türkiye, 1-2 Temmuz 2022, pp. 309-314. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)
- Arıkan N.A.**, "4D Printing: Investigation of the Usability of 4D Printing with 3D Printing", 6th International Student Symposium, Zonguldak, Bülent Ecevit Üniversitesi, Türkiye, 1-2 Temmuz 2022, pp. 61-68. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)
- Arıkan N.A.**, Kovan V., Tezel T., "Stress Relaxation and Prevention in Bolt Connections", V. International İstanbul Scientific Research Congress, İstanbul, Türkiye, 14 Ağustos 2021, pp. 507-511. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)
- Arıkan N.A.**, Kovan V., Tezel T., "Corrosion Damage and Prevention in Pipeline Welding Joints", V. International İstanbul Scientific Research Congress, İstanbul, Türkiye, 14 Ağustos 2021, pp. 512-519. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)
- Arıkan N.A.**, Kovan V., Tezel T., "Nickel Based Superalloys Used in the Field of Energy and Technological Expectations", 2nd International Conference on Technology

and Science, Burdur, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Türkiye, 15 Kasım 2019, pp. 68. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Arıkan N.A., “Sağlık Endüstrisinde 3, 4 ve 5 Boyutlu Baskı Teknolojisinin İncelenmesi ve Uygulamaları”, II. Ulusal Öğrenci Kongresi, İstanbul, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Türkiye, 16 Mayıs 2022, pp. 32. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

2- Arıkan N.A., “3B ve 4B Baskı ile İmalatın Uygulama Alanlarında Kullanımına Genel Bakış”, 1. Kocatepe Mühendislik Bilimleri Öğrenci Sempozyumu, Afyon, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Türkiye, 30 Mayıs 2022, pp. 95. (Özet Bildiri)

